**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą

Baigiamasis magistro projektas

**Arnas Dagys**

Projekto autorius

**Doc. Egidijus Puida**

Vadovas

**Kaunas, 2026**

**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą

Baigiamasis magistro projektas

Termoinžinerija (6211EX023)

**Arnas Dagys**

Projekto autorius

**Doc. Egidijus Puida**

Vadovas

**Doc. Algimantas Balčius**

Recenzentas

**Kaunas, 2026**

**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Arnas Dagys

# Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;

2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąraše;

3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);

4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Arnas Dagys

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

**Kaunas technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# Baigiamojo magistro projekto užduotis

**Išduota studentui (-ei)** – Arnas Dagys

## 1. Projekto tema

Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą

*(Lietuvių kalba)*

Integration of Renewable Energy Sources into District Heating Networks

*(Anglų kalba)*

## 2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: atlikti galimybių techninę, energetinę ir ekonominę analizę, integruojant į pasirinkto miesto centralizuoto šilumos tinklo sistemą papildomas šilumos generavimo sistemas, naudojančias atsinaujinančius energijos išteklius.
Uždaviniai:
1. Pagrįsti nagrinėjamo objekto analizės aktualumą.
2. Atlikti mokslinės ir techninės literatūros analizę, nagrinėjančią analogiškus atvejus.
3. Atlikti nagrinėjamos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos energijos gamybos ir tiekimo analizę.
4. Įvertinti šiluminės energijos gamybos iš saulės ir jos integravimo į nagrinėjamą centralizuoto šilumos tiekimo tinklą potencialą.
5. Įvertinti šilumos siurblių panaudojimo galimybes energijos gamybai ir tiekimui į centralizuoto šilumos tiekimo tinklą.
6. Įvertinti akumuliacinės talpos integravimo į centralizuotą šilumos tiekimo tinklą galimybes.
7. Įvertinti vėjo energijos panaudojimo galimybes elektros energijos gamybai nagrinėjamos centralizuoto šilumos tinklo sistemos reikmėms.
8. Atlikti pasirinktų atsinaujinančių energijos šaltinių technologijų energetinę ir ekonominę analizę nagrinėjamoje sistemoje.

## 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Projektas turi atitikti KTU rašto darbų rengimo metodinių nurodymų reikalavimus ir MIDF baigiamųjų projektų rengimo ir gynimo metodinius reikalavimus.

## 4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikomi.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Projekto autorius | Arnas Dagys | | 2026-02-12 |
| | *(Vardas, Pavardė)* | *(Parašas)* | *(Data)* |
| Projekto vadovas | Egidijus Puida | | 2026-02-12 |
| | *(Vardas, Pavardė)* | *(Parašas)* | *(Data)* |
| Krypties studijų programų vadovas | Algimantas Balčius | | 2026-02-12 |
| | *(Vardas, Pavardė)* | *(Parašas)* | *(Data)* |

Dagys, Arnas. Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Egidijus Puida; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija, Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: atsinaujinantys energijos šaltiniai, centralizuoti šilumos tinklai, energinis efektyvumas, $CO_2$ emisijų mažinimas.

Kaunas, 2026. 72 p.

## Santrauka

Baigiamojo magistro darbo tikslas – atlikti galimybių techninę, energetinę ir ekonominę analizę, integruojant į pasirinkto miesto centralizuoto šilumos tinklo sistemą papildomas šilumos generavimo sistemas, naudojančias atsinaujinančius energijos išteklius.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

1. Pagrįsti nagrinėjamo objekto analizės aktualumą.
2. Atlikti mokslinės ir techninės literatūros analizę, nagrinėjančią analogiškus atvejus.
3. Atlikti nagrinėjamos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos energijos gamybos ir tiekimo analizę.
4. Įvertinti šiluminės energijos gamybos iš saulės ir jos integravimo į nagrinėjamą centralizuoto šilumos tiekimo tinklą potencialą.
5. Įvertinti šilumos siurblių panaudojimo galimybes energijos gamybai ir tiekimui į centralizuoto šilumos tiekimo tinklą.
6. Įvertinti akumuliacinės talpos integravimo į centralizuotą šilumos tiekimo tinklą galimybes.
7. Įvertinti vėjo energijos panaudojimo galimybes elektros energijos gamybai nagrinėjamos centralizuoto šilumos tinklo sistemos reikmėms.
8. Atlikti pasirinktų atsinaujinančių energijos šaltinių technologijų energetinę ir ekonominę analizę nagrinėjamoje sistemoje.

Literatūros analizės dalyje nagrinėjamos komunalinių atliekų, saulės energijos, šilumos akumuliavimo, vėjo energijos ir šilumos siurblių integravimo galimybės miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Atlikta Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemos analizė. Įvertintas saulės terminių kolektorių integravimo į Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklo potencialas dviem skirtingais scenarijais. Taip pat vertinamas šilumos siurblių, naudojančių nuotekų atliekinę šilumą kaip šilumos šaltinį, pritaikymas Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Įvertinta vėjo energijos tiesioginio panaudojimo vietiniams elektros poreikiams galimybė bei įvertintos perteklinės elektros energijos konversijos į šilumos energiją galimybės. Taip pat vertinamos saulės terminių kolektorių sistemos balansavimo akumuliacinių talpų įrengimo galimybės bei perteklinės vėjo energijos panaudojimas šilumos gamybai ir kaupimui. Analizuojamoms technologijoms atlikta energetinė, ekonominė ir aplinkosauginė analizės.

Dagys, Arnas. Integration of Renewable Energy Sources into District Heating Networks. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Egidijus Puida; Faculty of Mechanical engineering and design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Power Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: renewable energy sources, district heating, energy efficiency, reduction of $CO_2$ emissions.

Kaunas, 2026. 72 pages.

**Summary**

The aim of the final master's thesis is to assess the technical, energy and economic feasibility of integrating additional heat generation technologies based on renewable energy sources into the district heating system of a selected city.

Final project objectives:

1. To substantiate the relevance of the analysis of the selected object.
2. To conduct an analysis of scientific and technical literature addressing analogous cases.
3. To analyze the energy generation structure and heat supply operation of the investigated district heating system.
4. To assess the potential of solar heat generation and its integration into the investigated district heating system.
5. To evaluate the potential of integrating heat pumps for energy generation and supply into the district heating system.
6. To evaluate the potential for integrating thermal energy storage into the district heating system.
7. To evaluate the potential of wind energy for electricity generation to supply the operational needs of the investigated district heating system.
8. To conduct an energy and economic assessment of the selected renewable energy technologies within the investigated district heating system.

In the literature review section, the possibilities of integrating municipal waste, solar energy, heat storage, wind energy, and heat pumps into an urban district heating system are examined. An analysis of the Biržai city district heating system was carried out. The potential for integrating solar thermal collectors into the Biržai city district heating network was assessed under two different scenarios. The application of heat pumps using wastewater waste heat as a heat source in the Biržai city district heating system was also evaluated. The possibility of directly using wind energy for local electricity demand was assessed, as well as the potential for converting surplus electricity into thermal energy. The possibilities of balancing the solar thermal collector system using heat storage tanks and using surplus wind energy for heat production and storage were also evaluated. An energy, economic, and environmental analysis was carried out for the analysed technologies.

**Turinys**

**Lentelių sąrašas** ..... **8**
**Paveikslų sąrašas** ..... **9**
**Santrumpų ir terminų sąrašas** ..... **10**
**Įvadas** ..... **11**
**1. Literatūros apžvalga** ..... **12**
1.1. Atsinaujinančios energijos integracija į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus ..... 12
1.2. Komunalinių atliekų panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose ..... 13
1.3. Saulės energijos panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose ..... 15
1.4. Šilumos akumuliavimo panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose ..... 16
1.5. Vėjo energijos panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose ..... 21
1.6. Šilumos siurblių energijos panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose ..... 25
**2. Šilumos tinklų duomenų analizė** ..... **30**
**3. Atsinaujinančios energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus** ..... **38**
3.1. Saulės energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus ..... 38
3.2. Šilumos siurblių integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus ..... 44
3.3. Akumuliacinės talpos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus ..... 48
3.4. Vėjo energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus ..... 51
**4. Ekonominė analizė** ..... **57**
**5. Aplinkosauginė analizė** ..... **63**
**Išvados** ..... **66**
**Literatūros sąrašas** ..... **68**
**Priedai** ..... **73**
1 priedas. „Industrial Engineering 2026“ konferencija ..... 73

## Lentelių sąrašas

**1 lentelė.** Kaštonų katilinės biokuro katilo nuostoliai [26] ..... 33
**2 lentelė.** Šilumos gamybos katilais Biržuose santrauka 2020 – 2024 metais ..... 35
**3 lentelė.** Periodo šildymo dienų skaičius 2020 – 2024 metais ..... 36
**4 lentelė.** Centralizuotų šilumos tiekimo tinklų ilgiai ..... 36
**5 lentelė.** Energijos poreikis šildymui ir karšto vandens ruošimui Biržų miesto CŠT metų laikotarpyje ..... 38
**6 lentelė.** Saulės terminių kolektorių naudingo veiksmo koeficiento skaičiavimų suvestinė ..... 39
**7 lentelė.** Saulės kolektorių poreikis šilumos energijos padengimui šiltuoju laikotarpiu ..... 40
**8 lentelė.** Energijos poreikis šildymui ir karšto vandens ruošimui skirtingais temperatūrų pakėlimo variantais ..... 43
**9 lentelė.** Skirtingų šilumos šaltinių šilumos siurblių efektyvumo ir elektros sąnaudų lyginamoji analizė ..... 47
**10 lentelė.** Cirkuliacinių siurblių galia ..... 47
**11 lentelė.** Akumuliacinių talpų tūrio variantai ..... 50
**12 lentelė.** Vidutiniai vėjo greičiai Biržuose 2024 m. ..... 51
**13 lentelė.** 59 m aukščio vėjo jėgainės pagamintos elektros energijos panaudojimo rodikliai ..... 56
**14 lentelė.** Biržų šilumos tinklų metinės sąnaudos [46] ..... 58
**15 lentelė.** Saulės terminių kolektorių ekonominiai rodikliai [32] ..... 59
**16 lentelė.** Šilumos siurblio ekonominiai rodikliai [32] ..... 60
**17 lentelė.** Vėjo jėgainės ekonominiai rodikliai [32] ..... 62
**18 lentelė.** Saulės kolektorių $CO_2$ emisijų lyginamoji analizė ..... 64
**19 lentelė**. Šilumos siurblio $CO_2$ emisijų lyginamoji analizė ..... 64
**20 lentelė.** Vėjo jėgainės $CO_2$ emisijų lyginamoji analizė ..... 65

## Paveikslų sąrašas

**1 pav.** Technologiniai nuostoliai šilumos tinkluose Lietuvoje [4] ..... 13
**2 pav.** Bendros $CO_2$ emisijos Europoje ir Lietuvoje [8] ..... 13
**3 pav.** Komunalinių atliekų tvarkymas ES šalyse 2022 metais [10] ..... 14
**4 pav.** Komunalinių atliekų tvarkymas Lietuvoje 2022 metais [10] ..... 14
**5 pav.** Vidutinė metinė horizontalioji saulės spinduliuotė Lietuvoje [12] ..... 15
**6 pav.** Saulės terminių kolektorių sistema Vojens mieste Danijoje [14] ..... 16
**7 pav.** Požeminio šiluminės energijos kaupimo būdai [17] ..... 19
**8 pav.** Didelio masto karšto vandens talpyklų skirtingi konstrukcijų tipai: (a) virš žemės, (b) iš dalies užkasta, (c) visiškai užkasta [11] ..... 21
**9 pav.** Vėjo jėgainės gondolos skersinis pjūvis [20] ..... 23
**10 pav.** Šilumos siurblio principinė veikimo schema ..... 26
**11 pav.** Biokuro katilinių panaudota vidutinė galia 2020 – 2024 metais ..... 30
**12 pav.** Gamyba biokuro katilais ir KDE bei iškastiniu kuru 2020 – 2024 metais ..... 34
**13 pav.** $CO_2$ emisijos 2020 – 2024 metų laikotarpiu ..... 35
**14 pav.** Nuo 40 °C iki 70 °C scenarijaus energijos gamyba saulės kolektoriais (plotas – 11 077 $m^2$) ..... 41
**15 pav.** Nuo 45 °C iki 60 °C scenarijaus energijos gamyba saulės kolektoriais (plotas – 4 155 $m^2$) 41
**16 pav.** Nuo 45 °C iki 60 °C ir nuo 40 °C iki 70 °C scenarijų energijos gamyba saulės kolektoriais ..... 42
**17 pav.** Preliminari teritorija saulės kolektorių įrengimui 40 °C – 70 °C scenarijaus atveju [30] .... 44
**18 pav.** Preliminari teritorija saulės kolektorių įrengimui 45 °C – 60 °C scenarijaus atveju [30] .... 44
**19 pav.** Šilumos siurblių sistemos technologinė schema ..... 46
**20 pav.** Šilumos akumuliacinės talpos ir saulės kolektorių sistemos principinė schema [33] ..... 48
**21 pav.** Mėnesinis vidutinis vėjo greitis (10 m aukštyje) ..... 51
**22 pav.** Vėjo jėgainės elektrinės galios priklausomybė vėjo greičio [35] ..... 53
**23 pav.** Vėjo greičio skirtinguose aukščiuose pasiskirstymo palyginimas ..... 53
**24 pav.** Energijos gamybos pagal vėjo greitį skirtinguose aukščiuose palyginimas ..... 54
**25 pav.** Mėnesinės energijos gamybos skirtinguose aukščiuose palyginimas ..... 55
**26 pav.** Biržų CŠT elektros poreikio padengimas 59 m aukščio vėjo jėgaine ..... 55
**27 pav.** Gyvavimo ciklo etapų schema ..... 63

## Santrumpų ir terminų sąrašas

**Santrumpos:**

CŠT – centralizuoti šilumos tiekimo tinklai;

AEŠ – atsinaujinantys energijos šaltiniai;

FV – fotovoltinis elementas;

ŠS – šilumos siurblys;

SŠK – saulės šiluminis kolektorius;

ŠEK – šiluminės energijos kaupimas;

KSE – koncentruota saulės energija;

JŠK – jaučiamosios šilumos kaupimas;

LŠK – latentinės šilumos kaupimas;

FPM – fazinio pokyčio medžiagos;

TŠK – termocheminės šilumos kaupimas;

SŠEK – sezoninės šiluminės energijos kaupimas;

PŠEK – požeminis šiluminės energijos kaupimas;

AŠEK – akviferio (vandeningojo sluoksnio) šiluminės energijos kaupimas;

GŠEK – gręžinių šiluminės energijos kaupimas;

TŠEK – talpos šiluminės energijos kaupimas;

DŠEK – duobės šiluminės energijos kaupimas;

UŠEK – urvo šiluminės energijos kaupimas;

EK – elektrinis katilas;

BKV – buitinis karštas vanduo;

ATŠS – aukštos temperatūros šilumos siurblys;

LATŠS – labai aukštos temperatūros šilumos siurblys;

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos.

# Įvadas

Pasaulyje energijos poreikis neišvengiamai auga. Norint užtikrinti tvarų energijos išteklių naudojimą reikia išspręsti daug problemų, susijusių su poveikiu aplinkai bei ekonomikai. Mokslininkai bando atrasti alternatyvių atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo galimybių, kad galėtų sumažinti $CO_2$ emisijas. Vienas iš galimų sprendimo būdų – panaudoti saulės, vėjo ir atliekinės šilumos energiją mažo miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Šios energijos rūšys gali ne tik sumažinti $CO_2$ emisijas, bet ir sumažinti bendrą šilumos gamybos kainą taip sumažinant šilumos vartotojams kainą už suvartotą energiją.

Baigiamojo projekto esmė yra įvertinti atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo galimybę mažo miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Taip pat atlikti energetinę, ekonominę ir aplinkosauginę analizes palyginant projektuojamas sistemas su esama sistema.

Mokslinis naujumas yra užtikrinamas atsinaujinančių energijos šaltinių technologijose.

Šio baigiamojo magistro darbo tikslas – atlikti galimybių techninę, energetinę ir ekonominę analizę, integruojant į pasirinkto miesto centralizuoto šilumos tinklo sistemą papildomas šilumos generavimo sistemas, naudojančias atsinaujinančius energijos išteklius.

Problematika – naujų atsinaujinančių energijos šaltinių technologijų diegimas mažo miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklo sistemose dažnu atveju nėra pagrindžiamas ekonomiškai ir neatsiperka be papildomų paramos galimybių. Taip pat gali kilti problemų su sistemų valdymu ir suderinamumu bei technologiniu įrengimu. Tačiau kiekvienu atveju reikalinga įvertinti esamos sistemos pritaikomumą atsinaujinančių energijos šaltinių technologijos integravimui.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

1. Pagrįsti nagrinėjamo objekto analizės aktualumą.
2. Atlikti mokslinės ir techninės literatūros analizę, nagrinėjančią analogiškus atvejus.
3. Atlikti nagrinėjamos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos energijos gamybos ir tiekimo analizę.
4. Įvertinti šiluminės energijos gamybos iš saulės ir jos integravimo į nagrinėjamą centralizuoto šilumos tiekimo tinklą potencialą.
5. Įvertinti šilumos siurblių panaudojimo galimybes energijos gamybai ir tiekimui į centralizuoto šilumos tiekimo tinklą.
6. Įvertinti akumuliacinės talpos integravimo į centralizuotą šilumos tiekimo tinklą galimybes.
7. Įvertinti vėjo energijos panaudojimo galimybes elektros energijos gamybai nagrinėjamos centralizuoto šilumos tinklo sistemos reikmėms.
8. Atlikti pasirinktų atsinaujinančių energijos šaltinių technologijų energetinę ir ekonominę analizę nagrinėjamoje sistemoje.

# 1. Literatūros apžvalga

## 1.1. Atsinaujinančios energijos integracija į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus

Centralizuoto šildymo tinklų istorinė raida skirstoma į penkias pagrindines kartas. Pirmoji karta, naudota 1880 – 1930 m., buvo būdinga vietiniam šildymui garu, kurio darbinė temperatūra siekė 120 – 200 °C. Šiluma buvo gaminama iš anglies atliekų garo gamybos įrenginiuose ir perduodama vartotojams per energijos paskirstymo sistemas iš centrinės šilumos gamybos stoties. Antroji karta, naudojama 1930 – 1980 m., nuo pirmosios skyrėsi tuo, kad naudojo slėginio karšto vandens sistemas su darbinėmis temperatūromis tarp 120 – 160 °C, kurias tiekė anglimi kūrenamos garo jėgainės ir kombinuotos šilumos bei elektros gamybos sistemos. Tobulėjant technologijoms, trečiosios kartos centralizuoto šildymo sistemos buvo įdiegtos 1980 – 2020 m. laikotarpiu. Joms būdingi pramoniniu būdu gaminami kompaktiški šilumos tiekimo vamzdynai ir kiti elementai, pažangios matavimo ir stebėsenos sistemos, nauji statybos sprendimai su geresne šilumos izoliacija, leidžiantys pasiekti mažesnes darbines temperatūras (70 – 100 °C). Šios sistemos taip pat integravo šilumos kaupimo įrenginius, pramoninių procesų atliekinės šilumos panaudojimą, biomasės ir anglies kogeneracines sistemas bei didelio masto saulės šilumos įrenginius. Šiuo metu daugeliui centralizuoto šildymo sistemų būtina modernizacija, kad jos atitiktų ketvirtosios ir penktosios kartos tinklų standartus. Šios naujos kartos yra natūrali trečios kartos sistemų evoliucija ir laikomos būsimuoju miesto energijos tinklų standartu. Šilumos paskirstymas efektyviuose pastatuose, turinčiuose grindinį šildymą ar žemos temperatūros radiatorius, leidžia dar labiau sumažinti darbinę temperatūrą (iki 35 – 50 °C), taip sumažinant šilumos nuostolius ir sudarant sąlygas integruoti sistemas su moderniais energijos tiekimo šaltiniais. Tokie tinklai gali naudoti įvairius šilumos šaltinius, įskaitant žemo potencialo atliekinę šilumą, ir leidžia vartotojams tiekti šilumą į tinklą. Tai pasiekiama naudojant išmanųjį valdymą ir lanksčius energijos tiekimo sprendimus, pagrįstus tokiomis technologijomis, kaip mišraus kuro ar hibridinės kogeneracinės sistemos, AEŠ, ŠEK bei centralizuoti arba šilumos punktuose integruoti ŠS [1].

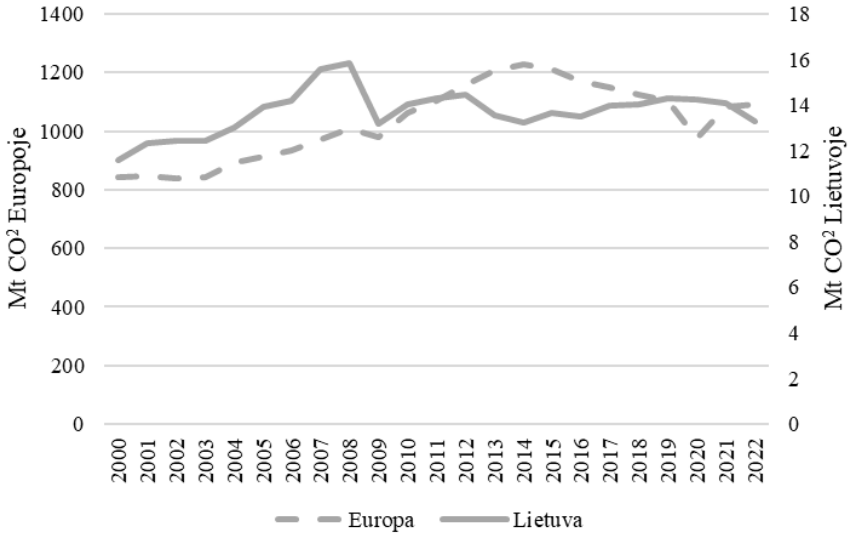
Dabartiniai Lietuvos pasiekimai centralizuoto šildymo srityje yra tokie pat geri, kaip ir Šiaurės Europos šalių. Tai buvo pasiekta įgyvendinus tokius veiksmus, kaip kogeneracinių jėgainių prijungimas prie šilumos tinklų, atliekų šilumos panaudojimas, mažinant šilumos tiekimo nuostolius, laipsniškas šilumos gamybos įrenginių pajėgumų optimizavimas ir vietinio kuro naudojimas, sumažinant importuojamo kuro kiekį. Natūraliai technologiniai nuostoliai tinkluose mažėja, tačiau santykiniai šilumos nuostoliai vis dar siekia apie 15 %, o dar mažesnius nuostolius pasiekti yra gana sunku dėl įvairių priežasčių. Visų pirma, sėkminga senų daugiabučių renovacija lemia sumažėjusį energijos suvartojimą. Deja, nors tikslas yra, kad pastatų modernizacija vyktų planingai ir kvartalais, šį tikslą pasiekti yra sunku dėl daugybės priežasčių. Todėl praktiškai neįmanoma optimizuoti šilumos tiekimo tinklų ilgalaikėje perspektyvoje, pakeičiant senus vamzdžius naujais su gera izoliacija. Antra, keičiant senus vamzdžius naujais, dažnai, siekiant sutaupyti lėšų, neatliekami hidrauliniai skaičiavimai, o naujų vamzdžių matmenys nėra optimizuojami [2]. Vienas svarbiausių centralizuoto šilumos tiekimo sistemų valdymo etapų buvo iš anksto pramoniniu būdu izoliuotų vamzdynų su elektriniais laidais, prijungtais prie gedimų kontrolės sistemų, įdiegimas, leidęs stebėti žalos būklę centralizuoto šildymo sistemoje. Iš tiesų, žala šilumos paskirstymo sistemoms, kuri dažniausiai susijusi su infrastruktūros senėjimu, kelia didžiausią socialinę ir ekonominę grėsmę, susijusią su sistemų eksploatavimu. Be to, sena infrastruktūra, pavyzdžiui, kanaliniai vamzdynai su pažeista izoliacija, sukelia šilumos nuostolius, turinčius įtakos ekonomikai ir šilumos paskirstymo efektyvumui. Todėl tolesnė modernių ir patikimų valdymo sistemų plėtra, leidžianti prognozuoti

galimus gedimus, bei naujoviškų patvarių medžiagų ir sprendimų naudojimas įrengiant naujus tinklus, yra esminiai veiksniai, lemiantys jų saugią, patikimą ir ilgalaikę eksploataciją [3].

**1 pav.** Technologiniai nuostoliai šilumos tinkluose Lietuvoje [4]

Lietuvos nacionalinė energetikos strategija siekia sumažinti priklausomybę nuo importuojamo iškastinio kuro, sumažinti į atmosferą išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį ir padidinti energijos tiekimo saugumą. Todėl vienas pagrindinių strategijos tikslų yra tvarių atsinaujinančių energijos šaltinių įtraukimas į centralizuoto šildymo sistemą [2].

Prognozuojama, kad energijos poreikis 2040 m. bus beveik 50 % didesnis nei dabartinis [5, 6]. Atsižvelgiant į visas neigiamas ir katastrofiškas iškastinio kuro poveikio pasekmes bei prieštaringas nuomones, su kuriomis pastaraisiais metais susidūrė pasaulio vyriausybės, šiandien tvarus vystymasis yra dėmesio centre. Šioje srityje yra reikšmingų finansavimo galimybių ir investicijų į atsinaujinančią energiją [7].

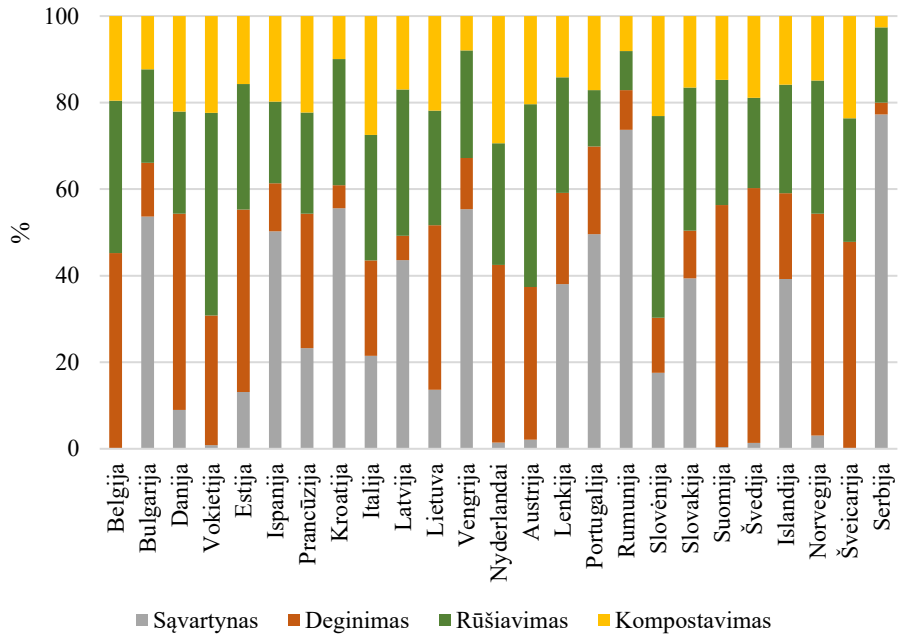



**2 pav.** Bendros $CO_2$ emisijos Europoje ir Lietuvoje [8]

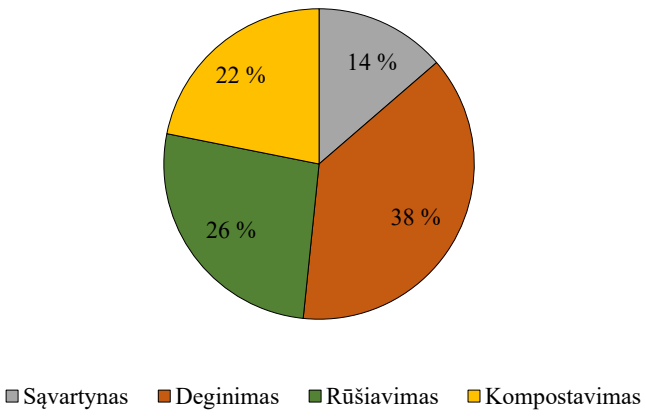
## 1.2. Komunalinių atliekų panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose

Europos Sąjungos tikslas – kovoti su klimato kaita ir pasauliniu energijos poreikiu sukuriant klimato požiūriu neutralias energijos sistemas iki 2050 metų, reikalauja pereiti nuo iškastinio kuro naudojimo prie atsinaujinančių energijos šaltinių taikymo. Viena iš idėjų yra atliekų naudojimas kaip žaliavos

energijai gaminti šilumos ir elektros pavidalu. Komunalinių kietųjų atliekų terminis apdorojimas yra ne tik būdas sumažinti sąvartynų kiekį ir plotą, bet ir galimybė sukurti technologiją, kuri leidžia energiją, sukauptą atliekose, paversti naudinga šiluma sistemoms. Kitas šio požiūrio privalumas yra iškastinio kuro suvartojimo ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimas [3]. Pagrindinis komunalinių atliekų panaudojimo iššūkis yra degalų sudėtis, kuri nuolat keičiasi, o emisijos turi visada išlikti priimtinų aplinkosaugos ir sveikatos koncentracijų ribose. Atliekų deginimas yra brangus energijos gamybos būdas, tačiau jis vis tiek išlieka pigesnis už atliekų perdirbimą ir tvaresnis už atliekų šalinimą sąvartynuose. Atliekų paruošimas deginimui apima kelis paruošimo etapus, įskaitant džiovinimą, degazavimą, pirolizę ir dujinimą. Pavyzdžiui, nuotekų atliekos paprastai pasižymi dideliu vandens kiekiu ir reikalauja daug džiovinimo, o kartais – antrojo kuro pridėjimo, kad būtų užtikrintas tinkamas degimas. Reikia atlikti daugiau mokslinių tyrimų, kad komunalinės atliekos taptų ekonomiškesniu konkurentu iškastiniam kurui. Komunalinių atliekų deginimas, kaip tvari energijos gamybos technologija, vis dar skeptiškai vertinamas daugelio Europos Sąjungos valstybių narių. Taip yra dėl ankstyvųjų atliekų deginimo įrenginių, kurie išskirdavo nemažai toksiškų dujų ir sunkiųjų metalų. Tačiau dėl naujausios technologinės pažangos sumažintas poveikis aplinkai ir rizika sveikatai [9].



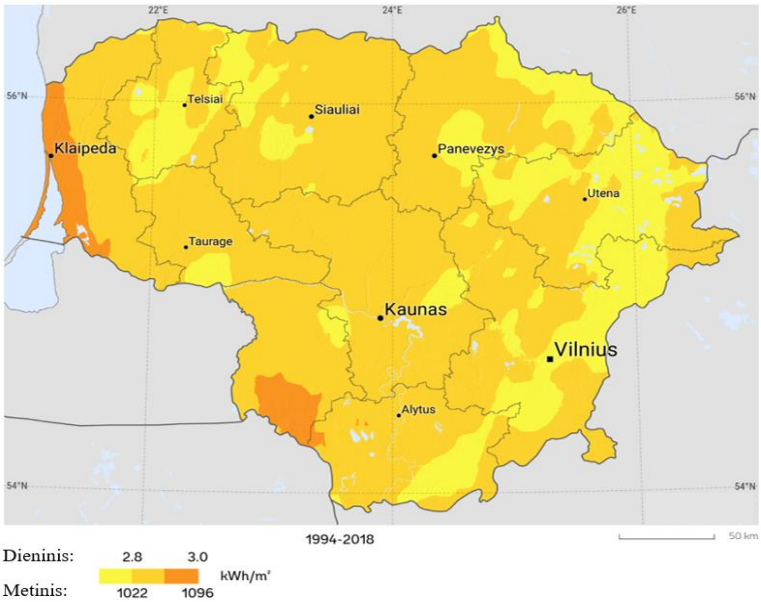

**3 pav.** Komunalinių atliekų tvarkymas ES šalyse 2022 metais [10]




**4 pav.** Komunalinių atliekų tvarkymas Lietuvoje 2022 metais [10]

### 1.3. Saulės energijos panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose

Saulės energijos naudojimas paprastai apima du įprastus sprendimus: saulės FV ir saulės šiluminius kolektorius (SŠK). Saulės FV naudojami elektros gamybai, o SŠK – šildymui. Lyginant šiuos du metodus energijos efektyvumo požiūriu, saulės FV elementai pasižymi maždaug 15 – 21 % efektyvumu, tuo tarpu SŠK efektyvumas siekia 40 – 60 %. Remiantis šiais efektyvumo rodikliais, galima daryti išvadą, kad SŠK yra efektyvesni erdvės panaudojimo atžvilgiu nei saulės FV elementai. Be to, SŠK technologija yra mažiau sudėtinga nei saulės FV. Tačiau būtina atkreipti dėmesį į tam tikrus su SŠK susijusius trūkumus. Jie yra mažiau veiksmingi žiemos mėnesiais, kai saulės spinduliuotės intensyvumas sumažėja, o saulės FV sistemos yra labiau pritaikomos įvairiomis sąlygomis. Saulės energija gali būti derinama su šilumos siurbliais, siekiant maksimaliai padidinti jų panaudojimą ir efektyvumą. Saulės energija gali būti naudojama garinimo procesui palengvinti, panaudojant SŠK, kad būtų tiekiama reikalinga šiluma šilumos siurbliams. Kaip minėta, pagrindinis energijos vartojimo valdymo pastatuose tikslas yra padidinti šilumos kaupimo galimybes ir sumažinti šilumos nuostolius. Siekiant spręsti pasiūlos ir paklausos skirtumus, ypač naudojant saulės energiją su SŠK, reikalinga naudoti šiluminės energijos kaupimo medžiagas. Saulės šiluminės energijos gamybos technologijos tapo ekonomiškos, efektyvios, lanksčios ir atlieka svarbų vaidmenį kuriant mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančias energijos sistemas. KSE yra pagrindinė saulės energijos technologija didelio masto elektros gamybai ir gali pasiūlyti šiluminės energijos kaupimo galimybę, užtikrinant patikimą energijos tiekimą į tinklą, didelį pajėgumo koeficientą ir mažą kainą [11].




**5 pav.** Vidutinė metinė horizontalioji saulės spinduliuotė Lietuvoje [12]

Šiandien, pagal Europos Sąjungos reglamentus, centralizuoto šilumos tiekimo sektorius Baltijos jūros regiono šalyse nuolat keičiasi, didinant atsinaujinančių energijos šaltinių dalį ir mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Ekonominiu požiūriu CŠT įmonės siekia padidinti šilumos tiekimo efektyvumą, tapti nepralenkiamomis ir pritraukti daugiau vartotojų [3]. Reguliavimas užtikrina sąžiningą ir racionalią savivaldybių šilumos tiekimo įmonių veiklą, gaminančių ir tiekiančių šilumą vartotojams. Tačiau pernelyg griežtas reguliavimas gali stabdyti šilumos gamintojų inovacijas, nes inovatyvių sprendimų įgyvendinimas neišvengiamai reiškia mažiau sėkmingas investicijas. Todėl niekas nenori pradėti pilotinių projektų, kurie yra pagrindinis sėkmingos centralizuoto šildymo sistemos sektoriaus plėtros elementas [2]. Vokietijoje progresyviai yra plėtojama saulės energetika, integruota į CŠT. Tačiau žemės prieinamumas išlieka viena pagrindinių problemų, diegiant saulės

šilumos tinklų sistemas. Įrengiant tokias sistemas, laikoma, jog žemės plotas yra maždaug 3 kartus didesnis nei kolektorių plotas, siekiant išvengti šešėliavimo efekto. Dauguma didelio masto saulės šilumos sistemų Vokietijoje ir kitose šalyse, tokiose kaip Danija, yra įrengtos būtent žemės ūkio paskirties žemėje. E. Popovski ir kt. [13] moksliniame straipsnyje skaičiavimais gauti palankiausi kolektorių ploto ir saugyklos tūrio santykiai, kurie svyruoja tarp 4 ir 6,7 $m^2/m^3$. Kolektorių ploto ir energijos poreikio santykis yra tarp 0,2 ir 0,33 $m^2$/MWh. Šiems projektams šilumos gamybos savikaina varijuoja nuo 45 iki 64 €/MWh. Pagrindinis iššūkis naudojant saulės energiją centralizuotose šilumos tiekimo sistemose yra laiko tarpas tarp saulės spinduliuotės ir šilumos poreikio piko šiluminės energijos kaupimo sistemoje [9].

**6 pav.** Saulės terminių kolektorių sistema Vojens mieste Danijoje [14]

### 1.4. Šilumos akumuliavimo panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose

Šiluminės energijos kaupimas (ŠEK) yra pažangi technologija, skirta surinkti ir išsaugoti perteklinę šilumą ar šaltį, išsaugant jį vėlesniam naudojimui. Medžiagų ir metodų pasirinkimas šiam procesui priklauso nuo specifinės taikymo srities. ŠEK atlieka svarbų vaidmenį įvairiuose sektoriuose, įskaitant pastatus, pramoninius procesus ir energijos gamybą. Šioje srityje ŠEK skirstoma į tris pagrindines kategorijas: jaučiamosios šilumos kaupimą, latentinės šilumos kaupimą ir termocheminės šilumos kaupimą. ŠEK medžiagų integravimas su šilumos siurbliais padeda reikšmingai optimizuoti sistemos efektyvumą ir veiksmingumą. ŠEK medžiagos leidžia sukaupti perteklinę šiluminę energiją, kurią generuoja saulės kolektoriai, esant padidėjusiai saulės spinduliuotei. Ši sukaupta energija tampa ypač vertinga, kai saulės energijos nepakanka, užtikrindama nuolatinį ir patikimą šilumos tiekimą šilumos siurbliui. ŠEK diegimas ne tik leidžia šilumos siurbliui tęsti šildymo ar vėsinimo funkcijas net ir be saulės įnašo, bet ir pailgina jo veikimo valandas, padidindamas bendrą sistemos patikimumą [15].

Kalbant apie jaučiamosios šilumos kaupimą, tai yra tiesioginė dviejų talpyklų kaupimo sistema, naudojanti lydytas druskas ir yra plačiai naudojama ŠEK sistema komerciniuose saulės šiluminiuose koncentruotos saulės energijos (KSE) įrenginiuose. Jos techninis ir ekonominis pagrįstumas buvo įvertintas naudojant skystą natrį ir chlorido lydytas druskas trečiosios kartos KSE įrenginiams. A. Dahash ir kt. [11] moksliniame straipsnyje dėl didelio korozijos laipsnio ir šilumnešio, pavyzdžiui, skysto metalo, nutekėjimo rizikos, buvo pasiūlyta netiesioginė dviejų talpų ŠEK sistema, naudojanti lydytas druskas saugojimo kilpoje. Jaučiamosios šilumos kaupimas (JŠK) yra ŠEK kategorija, kuri šilumą kaupia didindama medžiagos temperatūrą be fazės virsmo. Ši ŠEK forma, pasižyminti plačiu naudojimu ir paprastumu, taikoma įvairiose srityse, tokiose kaip buitinio karšto vandens (BKV)

kaupimas, patalpų šildymas ir vėsinimas bei pramoninių procesų šilumos tiekimas. JŠK srityje šiluma sukaupiama, pakeliant tokių medžiagų kaip vanduo, lydytos druskos, akmenys, betonas ar metalai temperatūrą. Sukaupta šiluma tiesiogiai priklauso nuo medžiagos masės ir temperatūros pokyčio. JŠK sistemos yra žinomos dėl savo ekonomiškumo, todėl jos yra plačiai naudojamos. Be to, jos pasižymi dideliu efektyvumu, o apytikslis efektyvumas svyruoja nuo 70 % iki 90 %. Kalbant apie skystosios JŠK sistemas, šilumos kaupime svarbų vaidmenį atlieka tokie skysčiai kaip vanduo, lydytos druskos ar organiniai skysčiai. Vanduo, dėl savo gausumo, prieinamumo ir aukšto šiluminio laidumo, yra plačiai naudojamas. Lydytos druskos gerai tinka aukštesnės temperatūros procesams, o organiniai skysčiai suteikia lankstumo ir turi didelį energijos tankį. Alternatyvioje klasifikacijos kaupimo sistemoje naudojamos lydytos druskos, tokios kaip natrio nitratas ar kalcio chloridas, kurios leidžia saugoti šilumą aukštose temperatūrose, todėl jos yra idealus pasirinkimas pramoniniams procesams ir saulės šiluminėms energijos sistemoms. Be to, kai kurios sistemos turi organinius skysčius, tokius kaip parafino vaškai ar riebalų rūgštys, kartu su vandeniu, tai užtikrina didesnį temperatūros diapazoną ir didesnį energijos tankį. Šis lankstumas leidžia šias sistemas pritaikyti, kai būdingi reikšmingi temperatūros svyravimai. Kietosios JŠK kategorija naudoja tokias medžiagas kaip akmenys, betonas ar metalai kaip šilumos kaupimo pagrindą. Šis metodas turi unikalių privalumų, palyginti su skystomis JŠK sistemomis: prieinamumas ir gausa – uolienos, natūraliai gausios ir ekonomiškos, išsiskiria kaip finansiškai patikima kaupimo terpė. Betono populiarumas kyla dėl jo galimybės lengvai įsilieti į pastatų konstrukcijas. Kietosios kaupimo medžiagos turi minimalią nuotėkio riziką esant aukštoms temperatūroms ir slėgiui. Kietosios medžiagos pasižymi ilgaamžiškumu, gali atlaikyti platų temperatūrų diapazoną, todėl puikiai tinka naudoti ekstremaliomis aplinkos sąlygomis. Vis dėlto, pasirinkimas naudoti kietas medžiagas vietoje skysčių turi tam tikrų trūkumų: ribota šiluminė talpa ir energijos kaupimo tankis, palyginti su skystomis JŠK sistemomis. Kietosios medžiagos gali patirti terminį sluoksniavimąsi – stratifikaciją, todėl tampa sunkiau pasiekti ir palaikyti vienodą temperatūros pasiskirstymą. Ilgalaikio kaupimo sistemos, naudojančios kietąsias medžiagas, gali patirti savaiminį išsikrovimą, dėl kurio šiluma palaipsniui prarandama. Sąlyginai didelės viso gyvavimo ciklo išlaidos, nors pradinė kaina yra mažesnė, kietosios sistemos dažnai turi didesnes priežiūros ir eksploatacines išlaidas.

Latentinės šilumos kaupimas (LŠK) kaupia šilumą naudodamas fazinio pokyčio medžiagas (FPM). Šis procesas apima didelio šilumos kiekio sugėrimą ar išlaisvinimą, vadinamąją lydimosi arba garavimo latentinę šilumą. LŠK turi daug privalumų, palyginti su JŠK medžiagomis: didesnis energijos tankis – LŠK turi geresnį gebėjimą kaupti šilumą per tūrio vienetą, palyginti su JŠK, dėl ženkliai didesnės latentinės lydimosi arba garavimo šilumos. LŠK sistemas galima efektyviau suprojektuoti pagal erdvės poreikius, nes jos reikalauja mažesnio kaupimo tūrio, palyginti su JŠK sistemomis. LŠK sistemos, ypač kartu su šiluminėmis briaunomis, pasižymi spartesniu įkrovimo ir iškrovimo greičiu nei JŠK sistemos. LŠK sistemos mažiau jautriai reaguoja į temperatūros svyravimus, nes sukaupta šiluma, esanti latentinėje formoje, išlieka stabili net esant nedideliems temperatūros pokyčiams. LŠK metodas apima šilumos kaupimą per įvairių medžiagų, įskaitant organines, neorganines ir eutektines FPM, fazės pokytį. Kalbant apie organines FPM, jos patiria unikalų temperatūros sukeltą fazės pokytį, pereinant iš kietos būsenos į skystą ir atvirkščiai, kartu su latentinės šilumos sugėrimu arba išlaisvinimu. ŠEK srityje organinės FPM tapo populiarios pastatų taikymuose, pirmiausia dėl jų fazės perėjimo temperatūros, atitinkančios žmogaus komforto zoną. Svarbu paminėti, kad šios FPM užtikrina platų temperatūrų diapazoną fazės pokyčiui, padidindamos jų lankstumą įvairiose srityse. Dėl savo nekorozinės ir netoksiškos prigimties organinės FPM yra saugios naudoti įvairiose srityse, o jas galima veiksmingai įterpti metalinėse, polimerinėse ar

keramikinėse talpyklose, taip užtikrinant saugumą ir lengvą valdymą. Be to, organinių FPM lankstumą rodo jų galimybė būti įvairios formos: skysčiu, pasta ar milteliais. Neorganines FPM, skiriasi nuo jų organinių atitikmenų, dažnai sudarytos iš druskų, druskų hidratų ar metalų, pasižymi unikaliomis savybėmis, dėl kurių jos tampa tinkamos įvairiems ŠEK taikymams. Neorganinės FPM turi reikšmingų privalumų, palyginti su analogiškomis organinėmis FPM, paprastai pagamintos iš druskų, pranoksta organines FPM šilumos laidumo požiūriu, todėl leidžia efektyviau perduoti šilumą. Tai ypač naudinga atvejuose, kuriuose yra prastas šilumos perdavimas, pavyzdžiui, pastatų sienose ar lubose. Neorganinės FPM turi didesnę šilumos kaupimo talpą vienam tūrio vienetui, palyginti su organinėmis FPM, todėl galima kaupti daugiau šilumos mažesnėse erdvėse. Tai ypač naudinga pastatuose. Neorganinės FPM yra nedegios, todėl yra saugesnės už organinius atitikmenis. Tai ypač svarbu tais atvejais, kai dėl gaisrinės saugos keliamas didelis susirūpinimas, pavyzdžiui, pastatuose. Vis dėlto svarbu paminėti, kad neorganinės FPM pasižymi santykinai mažesniu cheminiu stabilumu nei organinės, todėl jos laikui bėgant gali pablogėti, dėl to ribojamas jų naudojimas ilgalaikiam saugojimui [16].

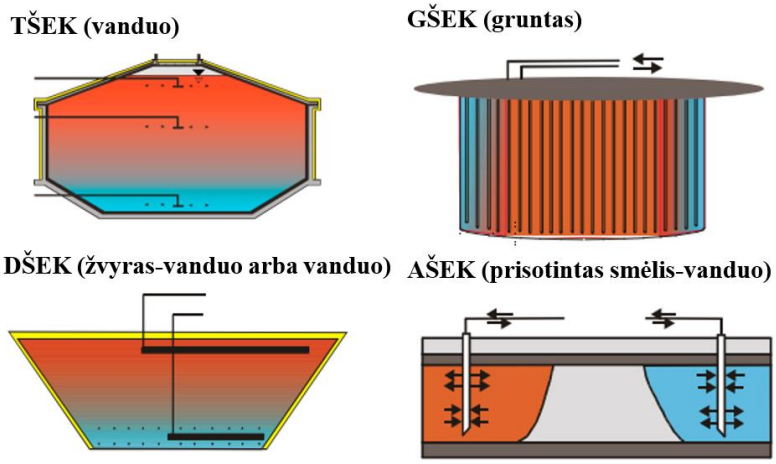
Eutektiškos FPM sudaro specializuotą kategoriją, pasižyminčią unikalia savybe, vadinama eutektiniu tašku. Šis taškas žymi temperatūrą, kurioje FPM patiria fazės pokytį žemiausioje įmanomoje temperatūroje ir tuo pačiu metu išskiria arba sugeria didžiausią šilumos kiekį. Eutektiškų FPM srityje skirtingų komponentų mišinys FPM sudaro specifinę kompoziciją, kuri tiksliai pereina tarp kietos ir skystos būsenos. Svarbu paminėti, kad ši temperatūra yra žemesnė nei atskirų grynųjų komponentų lydymosi taškai. Eutektiškos FPM žinomos dėl tikslaus ir gerai apibrėžto lydymosi taško, kuris užtikrina aiškų temperatūros intervalą faziniam perėjimui. Be to, eutektiška kompozicija dažnai lemia FPM su didesne lydimosi šiluma, palyginti su atskirais komponentais, taip padidindama jos efektyvumą kaupiant ir išlaisvinant šiluminę energiją. Eutektiški mišiniai išlaiko pastovią kompoziciją per visą fazės perėjimą, užtikrindami jų terminių savybių nuoseklumą [16].

Kalbant apie termochemines šilumos kaupimo sistemas (TŠK), TŠK koncepcija yra pagrįsta grįžtamosiomis cheminėmis reakcijomis tarp dviejų skirtingų medžiagų. Įkrovimo procese šilumnešio šiluminė energija naudojama endoterminei reakcijai sukelti, kaupiant šilumą cheminės reakcijos potenciale. Priešingai, iškrovimo procese šiluminė energija išsiskiria ir perduodama šilumnešiui per egzoterminę reakciją. Atsižvelgiant į reakcijos entalpiją, TŠK koncepcija turi 15 – 20 kartų didesnį energijos kaupimo tankį nei JŠK sistema. Termocheminis šilumos kaupimas yra pažangus metodas, skirtas sistemingam šiluminės energijos kaupimui ir kontroliuojamam išlaisvinimui per grįžtamas chemines reakcijas. Šis sudėtingas procesas apima šilumos sugėrimą ar išlaisvinimą cheminės transformacijos metu, leidžiant grąžinti sukauptą energiją, kai jos reikia. Adsorbcijos įkrovimo/iškrovimo ciklo analizė reikalauja atidžiai ištirti pusiausvyros temperatūrą, kontroliuojančią sorbcijos/desorbcijos dinamiką. Iš esmės, kai sistemos temperatūra viršija pusiausvyros temperatūrą, sorbatas atskiriamas nuo sorbento. Priešingai, jei temperatūra nukrenta žemiau pusiausvyros taško, sorbentas sukimba su sorbatu [15].

Svarbu pabrėžti, kad gręžinių šiluminės energijos kaupimo sistemos yra perspektyvios technologijos būsimoje energetikos sistemoje, nes jos gali atlikti svarbų vaidmenį pereinant prie ketvirtosios kartos centralizuoto šildymo sistemų, kurių tikslas yra pasiekti žemos temperatūros centralizuoto šildymo sistemas. Yra keletas sėkmingų gręžinių ŠEK sistemos pritaikymo pavyzdžių centralizuoto šildymo sistemose, pavyzdžiui, Neckarsulm ir Crailsheim Vokietijoje bei „Drake Landing Solar Community“ Kanadoje, kurios yra pripažintos kaip vienos iš palankiausių ilgalaikio šiluminės energijos kaupimo sprendimų. Visuotinai pripažįstama, kad Vokietijos patirtis yra labiausiai prisidėjusi prie po žeme

užkastų karšto vandens talpyklų srities. Taip pat yra kitų realizuotų projektų visame pasaulyje, tačiau manoma, kad Danijos patirtis didelio masto duobių srityje yra pirmaujanti tarp kitų. Iš esmės ŠEK reiškia laikino šiluminės energijos kaupimo būdą, kad ji būtų naudojama vėliau. Dėl to ŠEK dažnai laikoma pažangia energijos technologija, nes ji padidina tam tikros energijos sistemos efektyvumą ir palengvina iškastinio kuro taupymą, užtikrindama atsinaujinančios energijos naudojimą.

Sezoninės ŠEK sistemos yra ypač svarbios saulės energijos šildymo sistemose, nes jos pašalina sezoniškumo neatitikimą tarp vasarą gaunamos perteklinės saulės šilumos ir žiemos šildymo poreikio. Nepaisant to, sezoninės šiluminės energijos kaupimo sistemos dažnai laikomos sudėtingomis iš techninės perspektyvos. Tai kyla dėl didelio tūrio, reikalingo sezoniniam kaupimui. Todėl SŠEK sistemos dažniausiai yra arba visiškai, arba iš dalies įrengiamos po žeme arba pastatomos arti paviršiaus, ir dėl šios priežasties tokios sistemos dažnai vadinamos požeminio šiluminės energijos kaupimo (PŠEK) sistemomis. Tarp įvairių PŠEK sistemų tipų, nagrinėtų literatūroje, dažniausiai pagal jų konstrukciją išskiriamos šios: akvifero (vandeningojo sluoksnio) šiluminės energijos kaupimo (AŠEK) sistema, gręžinių šiluminės energijos kaupimo (GŠEK) sistema, talpos, dar vadinamos rezervuarų, šiluminės energijos kaupimo (TŠEK) sistema, duobės šiluminės energijos kaupimo (DŠEK) sistema ir urvo šiluminės energijos kaupimo (UŠEK) sistema. Tačiau sprendimas pasirinkti konkrečią PŠEK koncepciją labai priklauso nuo hidrogeologinių sąlygų vietovėje.




**7 pav.** Požeminio šiluminės energijos kaupimo būdai [17]

A. Dahash ir kt. [11] tyrime nustatyta, kad karšto vandens talpyklų energijos tankis yra 50 % didesnis nei žvyro-vandens ŠEK ir 100 % didesnis nei AŠEK. Tuo tarpu, GŠEK demonstruoja žemiausią energijos tankį, priklausomai nuo grunto savybių. Be to, GŠEK ir AŠEK sistemos reikalauja specialių geologinių sąlygų, tuo tarpu TŠEK ir DŠEK gali būti įrengtos beveik bet kurioje vietoje. Taip pat plačiai pripažįstama, kad TŠEK temperatūros diapazonas yra didesnis nei kitų koncepcijų. Tokie privalumai, kaip didesnis temperatūros diapazonas, palyginti su žvyro – vandens ar smėlio – vandens sistemomis, lemia geresnį temperatūros sluoksniavimąsi talpoje. Taigi, kaupimo sistema užtikrina geresnę įkrovimo/iškrovimo galią.

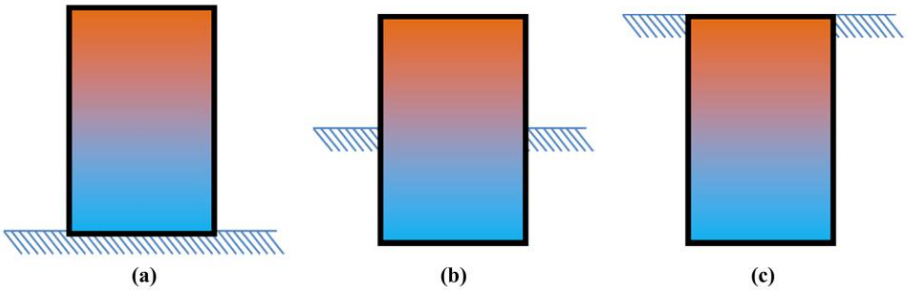
Kalbant apie AŠEK, akviferis yra požeminis vandens rezervuaras. Todėl AŠEK sistema naudoja natūralaus vandens ir grunto mišinį, pavyzdžiui, uolieną, saulės šilumai kaupti požeminėje struktūroje, kur į akviferį gręžiami du gręžiniai – vienas šiltas, o kitas šaltas – požeminio vandens išgavimui ir įleidimui. Šios PŠEK sistemos ypatumas yra tas, kad jose nenaudojami dirbtiniai rezervuarai, o tai sumažina investicines išlaidas. Vis dėlto, norint pasiekti tinkamą AŠEK veikimą,

reikia atsižvelgti į tam tikrus veiksnius. Vienas iš tokių veiksnių yra tai, kad AŠEK vandeningieji sluoksniai yra pralaidūs, todėl svarbu pasirinkti tinkamą kaupimo terpę, kad būtų išvengta užteršimo pavojingomis cheminėmis medžiagomis. Todėl vanduo dažnai naudojamas kaip kaupimo terpė šiose sistemose. Kitas privalumas yra didelė vandens savitoji šiluma. Be kaupimo terpės apribojimų, AŠEK turi trūkumą – šių sistemų negalima izoliuoti, todėl jos patiria didesnius šilumos nuostolius į gruntą. Dėl to tinkami tik tie akviferiai, kuriuose yra mažas natūralus srauto greitis per kaupimo sistemą arba jie veikia mažesnėje temperatūrų skalėje su didesniu srauto greičiu, kad šilumos nuostoliai būtų priimtini. Didesniems kaupimo tūriams šilumos nuostoliai santykinai mažėja, nes šilumos praradimo plotas mažėja tūrio atžvilgiu. Vis dėlto AŠEK sistemos turi žemesnes tiekimo temperatūras, palyginti su TŠEK ir DŠEK.

Kalbant apie GŠEK, ši koncepcija yra panaši į ankstesnį metodą. Šios sistemos kaupia perteklinę šilumą, naudodamos gruntą ir/arba uolienas, todėl pats grunto sluoksnis tampa kaupimo terpe. Paprastai šilumai kaupti naudojami keli vertikalūs gręžiniai, o kaip šilumos nešėjas tuose gręžinio šilumokaičiuose, kurie perduoda šilumą tarp vandens ir grunto, dažniausiai naudojamas vanduo. Skirtingai nuo AŠEK, šioms sistemoms nereikia specifinių sąlygų dėl užteršimo rizikos, todėl GŠEK dažnai laikoma patrauklesne alternatyva nei AŠEK. Vis dėlto GŠEK sistemos veikimas labai priklauso nuo klimato svyravimų, todėl gali kilti dideli šilumos nuostoliai, panašūs į AŠEK nuostolius. Be to, palyginti su AŠEK, šių sistemų įrengimo etape gręžimo išlaidos yra žymiai didesnės, todėl pradinės sąnaudos taip pat yra aukštesnės. GŠEK sistema įrengiama taip, kad gręžiniai pirmiausia būtų išgręžti iki tam tikro gylio, į juos įdedami vertikaliai orientuoti U formos vamzdžiai, sudarantys vadinamuosius gręžinio šilumokaičius, per kuriuos cirkuliuoja šilumos nešėjas – vanduo. Optimalus gręžinių gylis priklauso nuo daugelio veiksnių, tokių kaip grunto šilumos laidumas, natūrali grunto temperatūra, požeminio vandens lygis, šilumos apkrovos profilis ir atstumas iki kitų panašių kaupimo sistemų. Alternatyviai, tam tikrose GŠEK sistemose gręžinio šilumokaičiai gali būti įrengti horizontaliai, o tai sumažina gręžimo sąnaudas, nes horizontalūs gręžiniai yra mažesnio gylio nei vertikalūs. Nepaisant mažesnių horizontaliai orientuotų gręžinių įrengimo sąnaudų, A. Dahash ir kt. [11] straipsnyje pastebėta, kad dėl didelio horizontaliai orientuotų vamzdžių ir grunto sąlyčio ploto gali padidėti šilumos nuostoliai. Dėl to paviršiaus ploto ir tūrio santykis turėtų būti kuo mažesnis, kad būtų sumažinti nuostoliai į aplinkinį gruntą. GŠEK turi žemesnes tiekimo temperatūras, palyginti su TŠEK ir DŠEK.

Kalbant apie TŠEK, šiluminė energija kaupiama talpyklose, kurios yra dirbtinai pagamintos iš armuoto iš anksto įtempto gelžbetonio arba nerūdijančio plieno, ir dažniausiai vanduo yra laikomas palankia kaupimo terpe. Dėl didelio sezoniškai naudojamos talpos paviršiaus ploto šios vandens talpyklos dažnai izoliuojamos storu izoliacijos sluoksniu. Dėl didelio reikalingo tūrio ir vietos prieinamumo šios sistemos dažniausiai būna visiškai arba iš dalies užkastos po žeme. Tačiau, kai kurios didelės kaupimo talpyklos pastatomos laisvai stovinčios ant žemės. Šios talpyklos veikia naudojant stratifikacijos principą, kai kaupimo terpė talpykloje yra karštesnė viršuje nei apačioje dėl terminio plūdrumo. Šaltas vanduo yra didesnio tankio nei karštas, todėl jis kaupiasi talpyklos apačioje. Tarp šių dviejų regionų susidaro termoklino sritis. Termoklinas veikia kaip dinaminis natūralus barjeras, kuris neleidžia karštam vandeniui susimaišyti su šaltu. Todėl labai svarbu išlaikyti termoklino sritį kuo mažesnę, nes tai mažina maišymosi poveikį ir dėl to sumažina šilumos nuostolius iš talpyklos, kas teigiamai veikia sistemos efektyvumą. Pagrindinis veiksnys, užtikrinantis gerą šiluminę stratifikaciją ŠEK, yra vandens įleidimo ir išleidimo angos, pavyzdžiui, jų projektinė vieta. Įtekėjimo ir ištekėjimo angų dizainas, jų geometrija, daro įtaką stratifikacijai ir tuo pačiu ŠEK

energetiniam efektyvumui. Netinkamas įtekėjimo įtaisas gali sukelti vietinę turbulenciją, sukeldamas maišymąsi.




**8 pav.** Didelio masto karšto vandens talpyklų skirtingi konstrukcijų tipai: (a) virš žemės, (b) iš dalies užkasta, (c) visiškai užkasta [11]

Kalbant apie DŠEK, ši sezoniškai naudojama ŠEK sistema operacinės veiklos požiūriu dažnai laikoma panašia į ankstesnę TŠEK, nes abiem atvejais energijos kaupimui naudojamas stratifikacijos principas. Skirtingai nuo TŠEK sistemų, šiluminė energija saugoma iškastame grunte, kuris uždengiamas nepralaidžiais sluoksniais. Ji taip pat gali būti kaupiama dirbtiniame rezervuare, pagamintame iš armuoto betono ar nerūdijančio plieno, kuris įrengiamas žemės paviršiuje arba šalia jo. Tačiau pastaroji koncepcija turi didesnes statybos sąnaudas nei pirmoji. Be to, kaupimo rezervuaras dažnai turi geometrinę formą su nuolydžiu, pavyzdžiui, apverstos piramidės formą su stačiakampiu skerspjūviu arba nupjauto kūgio formą su apskritu skerspjūviu. Remiantis A. Dahash ir kt. [11] tyrimu duobės kaupimo tūris turi būti maždaug 50 % didesnis nei TŠEK, kad būtų kompensuotas šilumos kaupimo energijos tankio skirtumas. Be to, bendri šilumos nuostoliai gali būti efektyviai sumažinti, jei aukštis ir spindulys yra vienodi. Todėl sezoninėms ŠEK sistemoms tinkamiausias laikomas aspektinis santykis – 1. Didelio masto talpyklos paprastai būna apgaubtos storais izoliacijos sluoksniais, sudarančiais kompozitinę sieną. Tipiniai termoizoliaciniai sluoksniai yra poliuretanas (PUR), stiklo vata, polistireninis putplastis (EPS), putų stiklas ir ekstruzinis polistirenas (XPS). Kompozitinėje sienoje izoliacijos sluoksniai gali būti dengiami vidinėje ir/ar išorinėje pagrindinės konstrukcijos (betono ar plieno) pusėje.

Atliekant ekonominį vertinimą, svarbu pabrėžti, kad sezoninės šiluminės energijos kaupimo sistemos kaina mažėja, kai kaupimo tūris didėja. Pagal A. Dahash ir kt. [11] tyrimą investicijos kaina svyruoja nuo 40 iki 250 €/m³, priklausomai nuo SŠEK tipo. Palyginti su kitais SŠEK tipais, TŠEK sistema turi didesnes investicines išlaidas dėl reikalingų statybos darbų. Tačiau TŠEK laikomos geriausiais kandidatais efektyviam energijos kaupimui iš termodinaminio požiūrio, ir jas galima pastatyti bet kurioje vietoje, nepriklausomai nuo grunto sąlygų. Todėl svarbu pabrėžti, kad konkretaus SŠEK tipo ekonominis vertinimas priklauso ne tik nuo investicinių išlaidų, bet ir nuo SŠEK veikimo bei sistemos, į kurią kaupimo talpykla yra integruojama. AŠEK ir GŠEK sistemos yra ekonomiškai efektyvesnės, palyginti su TŠEK ir DŠEK. Vis dėlto šios sistemos dažnai nėra plačiai naudojamos dėl žemų veikimo režimų ir hidrogeologinių sąlygų apribojimų. Po žeme įrengiamos TŠEK ir DŠEK gali būti pastatytos bet kurioje vietoje, todėl dažnai jos laikomos pažangesnėmis už AŠEK ir GŠEK didelio masto centralizuoto šildymo reikmėms [11].

## 1.5. Vėjo energijos panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose

Vėjo energijos integravimas į kogeneracines sistemas pagerina veikimo lankstumą ir padeda spręsti vėjo energijos gamybos neapibrėžtumo problemas. Panašiai kaip saulės energija, vėjo energija išlieka viena plačiausiai naudojamų atsinaujinančių išteklių rūšių planetoje. Pagrindinis ir svarbiausias

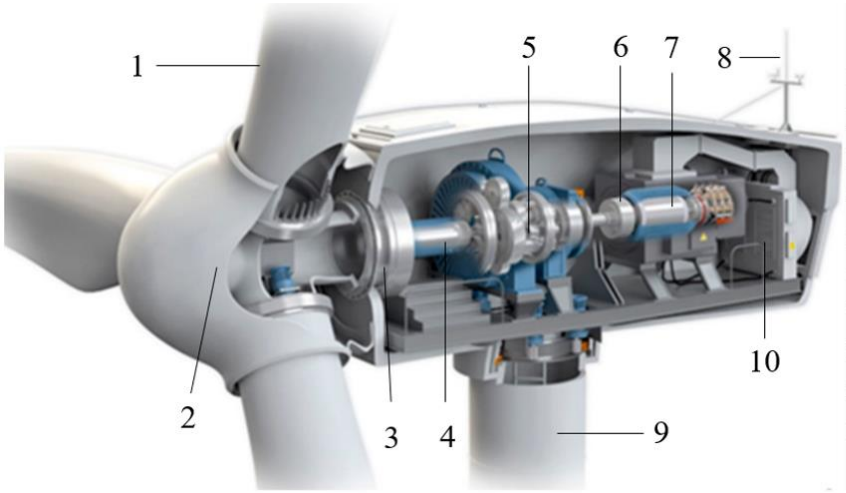
iššūkis plėtojant vėjo energiją yra energijos apribojimas. Elektros energijos ribojimas yra sąmoningas produkcijos sumažinimas, siekiant subalansuoti energijos pasiūlą ir paklausą arba dėl perdavimo apribojimų. Ši didelė problema sukėlė susirūpinimą visame pasaulyje, sukeldama abejonių dėl tolesnės plėtros. Įžvelgiama bendra tendencija integruojant atsinaujinančius energijos šaltinius, – naudojant visas komerciškai prieinamas atsinaujinančios energijos technologijas, tokias kaip KSE, bioenergija ir sausumos vėjo jėgainės, vidutinė elektros gamybos kaina pastaraisiais metais sumažėjo ir ateityje toliau mažės [7].

Svarbu įvertinti, kaip skirtingi centralizuoto šildymo sistemos veikimo reguliavimo režimai (nuolatinės srovės, kintamos temperatūros ir kintamos temperatūros bei srovės valdymas) veikia integruotą šilumos ir elektros paskirstymo sistemą, siekiant padidinti vėjo energijos integraciją ir sumažinti eksploatacijos sąnaudas. J. Zheng ir kt. [18] publikacijoje sukurtas naujas hidraulinis ir dinaminis netiesioginio prijungimo CŠT modelis, kuris įvertina šilumos tinklo ir pastatų šiluminę inerciją. Modelis integruotas į sistemą, siekiant realiai įvertinti, kaip šiluminės inercijos panaudojimas gali pagerinti vėjo energijos įtraukimą į elektros sistemą. J. Zheng ir kt. [18] tyrime nagrinėjamas šiluminės inercijos ir centralizuoto šildymo sistemos veikimo reguliavimo režimų poveikis integruotai šilumos ir elektros paskirstymo sistemai, siekiant geresnės vėjo energijos integracijos. Įtraukus elektrinio šildymo įrangos modelį į siūlomą modelį, būtų galima įvertinti ir šių įrenginių poveikį sistemai. Šilumos tinklo dinaminė temperatūra daro reikšmingą įtaką centralizuoto šildymo sistemos veikimui, nes atitinkami laiko vėlavimai paprastai trunka nuo kelių minučių iki kelių valandų. Kai dienos metu vėjo energijos kiekis – mažas, kombinuotos šilumos ir elektros gamybos įrenginys padidina šilumos gamybą, o perteklinė šiluma kaupiama tinkle, siekiant sumažinti kogeneracinio įrenginio šilumos gamybą nakties metu. Dėl to padidėja kogeneracinio įrenginio lankstumas ir integruojama daugiau vėjo energijos. Modelio pranašumas prieš tradicinį modelį yra tas, kad netiesioginio sujungimo CŠT šiluminė inercija leidžia atsieti stiprią tarpusavio priklausomybę tarp elektros ir šilumos gamybos kogeneraciniame įrenginyje, taip suteikiant didesnį lankstumą ir leidžiant integruoti daugiau vėjo energijos [18].

Palyginti su tradiciniu modeliu (be šiluminės inercijos), naujas modelis leido ženkliai padidinti vėjo energijos integraciją, nes šiluminė inercija atsieja glaudų elektros ir šilumos gamybos ryšį. Kai vėjo galia maža dienos metu, kogeneracinis įrenginys gamina daugiau šilumos, o perteklius kaupiamas CŠT tinkle, kad naktį būtų galima sumažinti šilumos gamybą. Tai padidina kogeneracinio įrenginio lankstumą ir leidžia integruoti daugiau vėjo energijos. J. Zheng ir kt. [18] tyrime nustatyta, kad kintamos temperatūros – kintamos srovės valdymo režimas yra efektyviausias, jis sumažina siurblių elektros energijos sąnaudas 0,9 % lyginant su kintamos temperatūros režimu ir 2,9 % lyginant su centralizuoto valdymo su žingsninio srauto keitimo režimu. Kintamos temperatūros režimas kai kuriais atvejais viršijo leistinas projektines ribas (tiekimo temperatūrą ir temperatūrų skirtumą), kas realiomis sąlygomis galėtų sukelti šiluminio įtempio pažeidimus ar sisteminius trikdžius. Pastatų vidaus temperatūros analizė atskleidė, kad visais režimais užtikrinamas komforto lygis (apie 19,4 – 20,4 °C), tačiau tolimiausi nuo šilumos šaltinio pastatai patiria didesnius šilumos nuostolius [18].

J. Zheng ir kt. [18] straipsnyje pateiktos apskaičiuotos paros eksploatacijos sąnaudos patvirtino, kad modelio veikimas kintamos temperatūros ir kintamos srovės valdymo režimu buvo ekonomiškiausias – 7,2 % mažesnės sąnaudos nei tradicinio modelio. Kuo daugiau buvo integruota vėjo energijos, tuo mažesnės buvo bendros sistemos veikimo išlaidos [18]. Taip pat svarbu sukurti ir įvertinti integruotą šilumos ir elektros paskirstymo modelį, kuris visiškai išnaudoja CŠT šiluminę inerciją vėjo energijos integracijai. Skirtingai nei ankstesniuose modeliuose, pasiūlytas integracijos modelis, galintis

dinamiškai modeliuoti tiekiamo ir/ar grįžtamojo srauto temperatūros kitimą realiame CŠT, o tai leidžia kiekybiškai įvertinti sukauptos šiluminės energijos kiekį bei jos pokyčius laike. Kai elektros apkrova yra palyginti maža, kombinuotos šilumos ir elektros gamybos įrenginys gali reguliuoti elektros gamybą taip, kad nereikėtų pirkti brangios elektros energijos iš prijungto elektros tinklo, todėl abiejuose modeliuose iš tinklo perkamos elektros kiekis yra nulis. Taigi, bendra kogeneracinio įrenginio pagamintos elektros energijos ir integruotos vėjo energijos suma yra lygi elektros apkrovai. Dėl to, kuo daugiau vėjo energijos integruojama, tuo mažesnės yra kogeneracinio įrenginio eksploatavimo sąnaudos [19].




**9 pav.** Vėjo jėgainės gondolos skersinis pjūvis [20]

Modelis taip pat pateikia optimizuotas tiekiamo ir grįžtamojo srauto temperatūras šilumos šaltinyje, kurios buvo tiesiogiai susietos su kogeneracinio įrenginio šilumos gamyba. Temperatūrų skirtumas proporcingai atitiko gaminamos šilumos kiekį, o gautos temperatūros kreivės sutampa su šilumos gamybos dinamika. Šis sprendimas leidžia ne tik nustatyti optimalų šilumos paskirstymą, bet ir tiesiogiai reguliuoti CŠT eksploataciją realiomis inžinerinėmis sąlygomis. Naudojant automatinę duomenų surinkimo sistemą, galima įvesti į modelį prognozuojamus apkrovos, vėjo energijos ir šilumos poreikio duomenis, kad būtų gauti optimizuoti valdymo parametrai – šilumos gamyba, tiekimo temperatūra. ŠS, elektriniai katilai (EK) ir ŠEK – gali pagerinti vėjo energijos integraciją į centralizuotą energijos sistemą, sumažinti kuro sąnaudas bei oro taršą. J. Wang ir kt. [21] atliktame tyrime geriausi ekonominiai rezultatai gaunami ŠS + EK + ŠEK scenarijuje, kurio vėjo energijos apribojimo rodiklis sumažėjo iki 1,96 % nuo 14,77 % lyginant su pradiniu scenarijumi. Sistemos šiluminės energijos kaupimo galimybė dar labiau pagerino ekonominį rezultatą net ir tais atvejais, kai jau buvo įtraukti elektriniai šildymo įrenginiai. ŠEK sumažino šiluminės apkrovos svyravimus ir padidino kogeneracinių įrenginių reguliavimo lankstumą [21]. Po modernizacijos kogeneraciniai įrenginiai gali veikti mažesnėmis apkrovomis nakties metu, kai vėjo energijos pasiūla didelė, o trūkstama šiluma kompensuojama ŠS, EK ir ŠEK sistemų veikimu. Dienos metu ŠEK sistema kaupia šilumą, o naktį ją atiduoda, taip mažindama kuro sąnaudas ir vėjo energijos ribojimus. Vėjo energijos integracija padidėja reikšmingai – po optimizacijos, laikotarpių, kai vėjo energija visiškai integruojama, skaičius išauga nuo 14 iki 72 dienų per šildymo sezoną. Nors vėjo energijos svyravimai dideli, vėjo jėgainės paprastai generuoja didesnę galią nakties metu [21]. J. Wang ir kt. [21] moksliniame straipsnyje norint įvertinti modelio patikimumą, atliekama penkių nepriklausomų optimizacijų serija. Sprendinių konvergencija buvo labai stabili, o sprendinių nuokrypis neviršijo 3 %. Jautrumo analizė parodė, kad ekonominiai rezultatai labiausiai priklauso nuo šilumos siurblio

įrengimo sąnaudų. Visiškai integruoti visą vėjo energijos kiekį ekonomiškai nenaudinga – egzistuoja mažėjančios ribinės naudos efektas, todėl tam tikras ribojimas išlieka optimalus. Be to, sistemos, integruojančios ŠS ir ŠEK, leidžia ne tik sumažinti kuro sąnaudas, bet ir reikšmingai mažinti anglies dioksido emisijas bei oro taršą žiemos metu [21].

Vėjo energijos perteklius gali būti panaudojamas centralizuoto šildymo sistemose elektros energiją paverčiant šiluma, kai elektros tinklas yra perkrautas arba ribojamas vėjo energijos generavimas. G. Xydis [22] straipsnyje tyrimo pagrindu tapo Graikijos miesto atvejis, kuriame veikia išvystyta CŠT infrastruktūra ir planuojamas 18,15 MW galios sausumos vėjo parkas. Naudojant WAsP, WindRose ir GIS įrankius, buvo atlikta vėjo išteklių analizė 80 m aukštyje virš žemės. Duomenys rinkti per vienerius metus 10 m meteorologiniu bokštu. Vidutinis vėjo greitis siekė 5,4 m/s, didžiausias – 24,9 m/s, o gūsiai iki 33,9 m/s. Analizuojant Weibull pasiskirstymą, nustatyta, kad formos parametras (k) svyruoja nuo 1,2 iki 2,0, o skalės parametras (c) – nuo 2,5 iki 9,2. Pagrindinės vėjo kryptys – ŠV ir ŠŠV, kas atitinka vietovės orografines sąlygas. Iš vėjo išteklių analizės sudarytas vėjo žemėlapis, leidžiantis nustatyti optimalias vietas vėjo jėgainių įrengimui bei apskaičiuoti metinę energijos gamybą, kuri siekia 35070 MWh per metus [22].

G. Xydis [22] tyrime nustatyta, kad Helsinkio mieste vėjo energijos gamybą būtų galima padidinti 40 – 200 %, jei perteklinė vėjo energija būtų panaudojama šildymo tinkle, pritaikius elektros energijos pavertimo šiluma technologiją. Kiekvienos vėjo jėgainės vidinio žemos/vidutinės įtampos transformatoriaus nuostoliai sudaro vidutiniškai 0,6 %, o vėjo jėgainių parko vidutinės/aukštos įtampos pastotės nuostoliai – 0,45 %, bendri elektros energijos nuostoliai siūlomame vėjo jėgainių parke siekia 3,1 % [22]. Apytikriai 90 % metinės šilumos gamybos gaunama iš centrinės sistemos (bazinių apkrovų įrenginio), o likę 10 % – iš pikinio katilo. Visa centralizuoto šildymo sistema suprojektuota taip, kad galėtų patenkinti reikiamą šilumos poreikį tiekiant perkaitinto vandens srautą, kurio temperatūra sezoniškai kinta nuo 90 °C iki 120 °C. Pastatų sistemos leidžia grįžtamojo vandens temperatūrą palaikyti intervale nuo 55 °C iki 70 °C, priklausomai nuo sezono – mažiausia ji būna vasarą, kai reikalingas tik karštas buitinės paskirties vanduo. Modeliavimas parodė, kad vėjo energijos pertekliaus dydis Graikijos sąlygomis gali siekti 0,8 – 4,3 % metinės gamybos. Šis energijos kiekis gali būti nukreiptas į CŠT, pakeičiant dalį naftinio katilo pagaminamos šilumos. $CO_2$ emisijų mažinimas siektų 55 – 252 tonas per metus, priklausomai nuo integruoto energijos kiekio [22].

Taip pat galimas variantas sukurti trumpalaikio centralizuoto šildymo sistemos veikimo modelį, leidžiantį optimizuoti elektros ir šilumos gamybą bei vartojimą sistemose su aukšta vėjo energijos integracijos dalimi. I. Dimoulkas ir kt. [23] tyrimas atliktas naudojant deterministinį mišraus sveikųjų skaičių tiesinį programavimą, siekiant minimizuoti bendras eksploatacines sąnaudas ir įvertinti CŠT komponentų (katilų, elektrinių katilų, šilumos siurblių ir kaupiklių) įtaką lankstumui. Modeliavimas atliekamas realių įrenginių CŠT pavyzdžiu, kuriame pagrindinius šilumos ir elektros gamybos vienetus sudarė atbulinės eigos ir ekstrakcinės kondensacijos turbinos, papildomai įtraukti šilumos katilai, EK, ŠS ir ŠEK. Naudojami valandiniai apkrovos ir vėjo gamybos duomenys, taip pat vėlesniuose tyrimuose – 15 min tikslumu. Modeliuota skirtinga vėjo galios dalis nuo 0 % iki 100 % metinės elektros apkrovos. Metinė vėjo energijos generacija prilygsta metinei apkrovai, kai įrengtoji vėjo energijos galia yra 4 – 5 kartus didesnė už maksimalią apkrovą. Esant 50 % atvejui, ši reikšmė turėtų būti maždaug 2 kartus didesnė už maksimalią apkrovą. Centralizuoto šildymo sistemos vidinis elektros energijos suvartojimas daugiausia priklauso nuo vandens siurbimo poreikio ir yra nustatytas kaip 0,5 % nuo pagaminamos šilumos kiekio [23].

I. Dimoulkas ir kt. [23] straipsnyje pastebėta, kad sistemos eksploatacinės sąnaudos mažėja didėjant vėjo galios daliai iki tam tikro lygio apie 30 – 40 %, po kurio prasideda išaugusios vėjo energijos apribojimo sąnaudos. Riba, nuo kurios sąnaudos ima augti, priklauso nuo pasirinktos vėjo energijos apribojimo kainos, mažesnė šio apribojimo kaina leidžia pasiekti aukštesnį lygį, tačiau kartu padidina ir vėjo energijos apribojimo mastą. Be vėjo (0 %) metinės sąnaudos siekė 49,7 mln. €, esant 25 % vėjo daliai – 35,9 mln. €, tačiau esant 100 % vėjo daliai, sąnaudos padidėjo iki 92,6 mln. € dėl didelio nepanaudotos vėjo energijos kiekio. Kogeneracinio įrenginio ir dujinės turbinos gamyba mažėjo didėjant vėjo daliai, tuo tarpu ŠS ir EK veikė vis intensyviau. Bendras šilumos kiekis sistemoje išliko pastovus, o elektros apkrovos nepatenkinimas – nereikšmingas visais atvejais [23].

I. Dimoulkas ir kt. [23] tyrime pradiniame centralizuoto šildymo sistemos variante EK ir ŠS buvo pakeisti tik šilumą gaminančiu katilu, kurio galia lygi bendrai šilumos siurblių ir elektrinių katilų galiai. Buvo atlikta metinė simuliacija, kaip ir anksčiau, siekiant palyginti eksploatacijos sąnaudas, vėjo energijos gamybą ir vėjo energijos apribojimą abiem sistemoms, esant skirtingiems vėjo energijos gamybos lygiams. Iki 25 % lygio rezultatai buvo panašūs, tačiau didėjant vėjo energijos daliai, centralizuoto šildymo sistema, kurioje naudojami EK ir ŠS, pasižymėjo daug didesniu lankstumu, mažesnėmis eksploatacijos sąnaudomis ir sudarė sąlygas didesnei vėjo energijos integracijai [23].

### 1.6. Šilumos siurblių energijos panaudojimas centralizuotuose šilumos tiekimo tinkluose

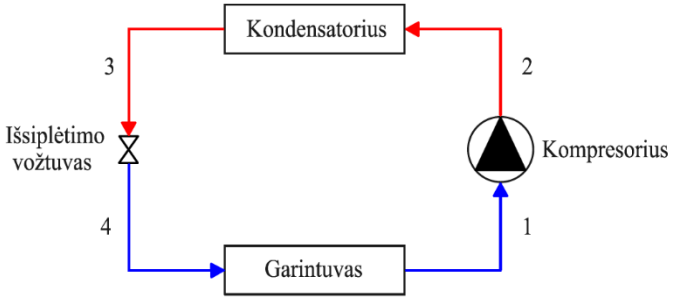
ŠS integravimas į CŠT tinklus suteikia reikšmingų aplinkosauginių ir efektyvumo privalumų – tai novatoriškas ir ekonomiškai naudingas sprendimas įvairiems dekarbonizacijos sektoriams. Nors kai kurios šalys jau naudoja atsinaujinančius energijos šaltinius ir atliekų energiją pramoniniams šildymo procesams, taip pat saulės ir geotermines sistemas patalpų šildymui bei vėsinimui, didžioji dalis šildymo poreikių (apie 50 % viso pirminės energijos suvartojimo Europoje) vis dar tenkinama iškastiniu kuru [24]. Dėl to egzistuoja didelis dekarbonizacijos ir oro kokybės gerinimo potencialas, kurį gali suteikti dar nevisiškai panaudotos alternatyvos, tokios kaip elektros energijos pavertimo į šilumą technologijos, CŠT ir ŠS. Elektros energijos konversijos į šiluminę energiją technologija padidina centralizuoto šildymo sektoriaus lankstumą, sujungdama elektros ir šilumos sektorius naudojant ŠS, EK ar ŠEK. Be padidinto lankstumo, kiti privalumai, kai saulės ar vėjo energija paverčiama šiluma, yra elektros energijos sektoriaus transformacija, kintamos atsinaujinančios energijos gamybos svyravimų mažinimas, apkrovų balansavimo galimybių didinimas.

Keturios pagrindinės rinkos (Kanada, Kinija, Jungtinės Valstijos ir Europa) yra įsipareigojusios iki 2030 m. įgyvendinti elektros energijos pavertimo šiluma koncepciją. Šilumos siurbliai, naudojantys vandenį, orą ir gruntą kaip šilumos šaltinius, taikomi patalpų ir BKV šildymui gyvenamuosiuose bei komerciniuose pastatuose. Santykinai žemos temperatūros (iki 100 °C) šilumos siurbliai naudojami atliekinės šilumos surinkimui celiuliozės ir popieriaus, maisto ir gėrimų, tekstilės, automobilių bei chemijos pramonėje. 2017 – 2019 m. pasaulinė šilumos siurblių rinka išaugo 12 %, o 80 % visų buitinio naudojimo šilumos siurblių įrengimų buvo įgyvendinta Kinijoje, Japonijoje ir Jungtinėse Valstijose. Technologijos plėtra sparčiai vystosi Europoje ir Kinijoje [1].

J. Tihana ir kt. [25] 2018 m. vykdytame tyrime buvo analizuotas šilumos siurblių potencialas Baltijos šalyse ir įvertinta galimybė juos integruoti į esamus CŠT. Ataskaitoje „Baltic Energy Technology Scenarios“ buvo parodyta, kad ŠS ir EK yra labai perspektyvus sprendimas pastatų šildymui ir centralizuotos šilumos gamybai būsimoje energetikos sistemoje. Lietuvoje tyrimas nagrinėjo

kombinuoto ŠS ir hidroelektrinės su ŠEK Kauno mariose galimybes. Esant 3,65 šilumos siurblio naudingumo koeficientui ir naudojant pigią elektros energiją ne piko metu, 270 MW galingumo ŠS sistema galėtų patenkinti visus Kauno miesto šildymo poreikius. Latvijos tyrimas lygino SŠK ir ŠS scenarijus, galiausiai pasirinkdamas saulės kolektorius dėl jų mažesnės kainos. Baltijos šalių centralizuoto šildymo sistemose ŠS integracija gali padidinti atsinaujinančios elektros energijos paklausą ir padengti 70 – 90 % metinio šilumos poreikio. Estijos tyrime buvo analizuota didelio masto šilumos siurblių integracija į Talino centralizuoto šildymo sistemą. Buvo įvertintos optimalios vietos ir šilumos šaltiniai, leidę sumažinti gamtinių dujų priklausomybę iki 34 % ir pasiekti 16 % šilumos gamybą naudojant ŠS [25].

Elektros energijos pavertimo į šilumą technologijos gali ekonomiškai efektyviai prisidėti prie iškastinio kuro pakeitimo, AEŠ integravimo ir dekarbonizacijos. Integruotos kogeneracinės sistemos, ŠS ir pasyviosios ŠEK technologijos išsiskiria kaip ypač palankūs sprendimai. Centralizuotos energijos sistemos atlieka svarbų vaidmenį pereinant prie mažo anglies dioksido kiekio ekonomikos, veikdamos kaip pagrindas efektyvioms vietinėms energijos sistemoms. Centralizuoto šildymo ir vėsinimo sistemos tapo gerosios praktikos pavyzdžiu, užtikrinančiu vietinį, prieinamą ir mažo anglies dioksido kiekio energijos tiekimą. Jos sukuria sinergiją tarp šilumos, vėsos, BKV ir elektros gamybos bei tiekimo, naudojant AEŠ, tokius kaip kontroversiška biomasė, vėjas ir saulė, elektros energijos sistemoje, kartu taikant didelio masto ŠS, kogeneraciją, katilus ir ŠEK technologijas. Yra keletas pagrindinių sėkmės veiksnių, lemiančių aukštos kokybės, efektyvias ir tvarias CŠT paslaugas. Jie gali būti suskirstyti į keturis išorinius ir penkis vidinius veiksnius. Išoriniai veiksniai apima tinkamą nacionalinę politiką ir reguliavimo sistemą, tiesioginę ar netiesioginę finansinę paramą, vietinę politiką, suderintą su urbanistiniu planavimu bei interesų suderinimą ir bendradarbiavimo brandą. Vidiniai veiksniai apima vietinių išteklių prieinamumą ir aktualumą, išsamų projektų vystymą, kainų konkurencingumą, lyginant su alternatyviais energijos sprendimais, lanksčią šilumos ir vėsos gamybą bei techninių ir netechninių inovacijų derinimą. ŠS daro didelį indėlį į tvarią ir mažo anglies dioksido kiekio energijos ateitį, paversdami elektros energiją efektyviu šildymu ar vėsinimu. ŠS integravimas į centralizuoto šildymo ir vėsinimo sistemas suteikia reikšmingų aplinkosauginių ir veikimo privalumų, būdamas novatoriškas ir ekonomiškai naudingas sprendimas įvairiems dekarbonizacijos sektoriams. Tačiau, šiuo metu, ŠS vis dar nėra plačiai standartizuota technologija Europos centralizuoto šildymo sistemose. Šio sektoriaus įmonės siekia sumažinti anglies emisijas šilumos gamybos procese, o aukštatemperatūriniai ŠS pasižymi savybėmis, kurios suteikia jiems galimybę būti integruotiems į CŠT sistemas, naudojant įvairius šilumos šaltinius. Mažos apimties CŠT sistemos turi didžiausią potencialą ŠS diegimui, leidžiančiam ženkliai sumažinti iškastinio kuro naudojimą, tuo tarpu vidutinėse ir didelėse sistemose, kuriose veikia efektyvi kogeneracija, ŠS taikymo potencialas yra mažesnis.




**10 pav.** Šilumos siurblio principinė veikimo schema

Elektros energijos pavertimas šiluma padeda palaikyti balansą tarp elektros pasiūlos ir paklausos. Tačiau optimalus ŠS dydis CŠT labai priklauso nuo pačios sistemos ypatybių bei išorinių veiksnių, tokių kaip elektros ir kuro kainos ar kiti ekonominiai rodikliai. J. Barco-Burgos ir kt. [1] tyrime eksperimentinė termodinaminė analizė atlikta naudojant temperatūros – entropijos ciklus dviejose komercinėse ŠS sistemose (kintamo greičio ir pastovaus greičio kompresijos), kurios visiškai maitinamos FV energija, parodė, kad kintamo greičio kompresijos sistema pasižymi iki 400 % didesniu efektyvumu esant dalinėms apkrovoms. Ekonominiu požiūriu kintamo greičio kompresijos sistema užtikrina 50 % didesnį vėsinimo ir 16 % didesnį šildymo efektyvumą nei pastovaus greičio analogas. Taip pat prieinamų atliekinės šilumos šaltinių, šilumos poreikių bei šilumos siurblių technologijos skirtumai lemia didelę ŠS potencialo įvairovę, todėl šiuo metu nėra vieningų kriterijų, pagal kuriuos būtų vertinamas ŠS integravimo į CŠT sistemas potencialas. Integruojant kogeneracines sistemas ir ŠS galima taikyti įvairias konfigūracijas. Sujungus šias dvi technologijas, bendros sistemos veikimo efektyvumas pagerėja, palyginti su jų atskiru veikimu. Šis veikimo pagerėjimas pasiekiamas dėl didesnių eksploatacinių apribojimų, taikomų ŠS moduliui. Taip yra todėl, kad integruotos sistemos, kogeneracinis įrenginys + ŠS, pasižymi geresniu našumu nei vien kogeneracinės sistemos, veikiančios tokiu pačiu temperatūros lygiu, bet be šilumos siurblio [1].

Svarbus pažangių centralizuoto šildymo sistemų modernizavimo aspektas yra naujų komponentų integravimas, siekiant patenkinti pastatų ir pramonės šildymo, BKV bei procesų šilumos poreikius, kartu sprendžiant šiuolaikinius aplinkosaugos, klimato ir energetinius iššūkius bei naujus energinio efektyvumo reikalavimus. Todėl naujos kartos CŠT sistemos gali apjungti tiek iškastinio kuro centrinius šilumos šaltinius, tiek AEŠ, ŠS bei ŠEK sistemas. Vartotojų sistemose taip pat gali būti įrengti individualūs iškastinio kuro šilumos šaltiniai arba atsinaujinančios energijos sprendimai, tokie kaip ŠS ir ŠEK. Šilumos siurblių rinkos potencialas yra didelis, o jų plėtra gali suteikti reikšmingos socialinės ir ekonominės naudos. Vis dėlto, plačiai paplitusiam šios technologijos diegimui trukdo keli iššūkiai: technologiniai (elektros tinklo apkrovos ribotumas dėl intensyvios šildymo sektoriaus elektrifikacijos), ekonominiai (didelės investicijų ir įrengimo sąnaudos), reguliaciniai (standartų ir privalomų reikalavimų stoka), politiniai (neapibrėžtumas šilumos dekarbonizacijos politikoje ir aiškių technologinių gairių trūkumas) bei visuomenės priėmimo klausimai (nepagrįstos baimės, klaidingi įsitikinimai, netiksli informacija ir ankstesnė neigiama patirtis, susijusi su ŠS patikimumu).

Kompresoriniai komerciniai ŠS yra plačiausiai naudojami ir turi daugybę pramoninių taikymų. ŠS klasifikuoja pagal temperatūros lygį, kuriame jie tiekia šilumą. Pagal tai jie skirstomi taip: tradiciniai ŠS, kurių šilumos surinkimo temperatūra (0 °C ≤ ŠS < 40 °C) ir šilumos tiekimo temperatūra (0 °C ≤ ŠS < 80 °C), suderinami su ketvirtosios ir penktosios kartos centralizuoto šildymo sistemų darbinėmis temperatūromis, aukštos temperatūros šilumos siurbliai (ATŠS), kurių šilumos surinkimo temperatūra (40 °C ≤ ATŠS < 60 °C) ir šilumos tiekimo temperatūra (80 °C ≤ ATŠS < 100 °C), suderinami su trečiosios kartos centralizuoto šildymo sistemų darbinėmis temperatūromis ir labai aukštos temperatūros šilumos siurbliai (LATŠS), kurių šilumos surinkimo temperatūra (60 °C ≤ LATŠS < 120 °C) ir šilumos tiekimo temperatūra (100 °C ≤ LATŠS < 160 °C), suderinami su antrosios kartos centralizuoto šildymo sistemų darbinėmis temperatūromis. Šiuo metu ATŠS gamintojai gali tiekti šilumą mažiausiai 90 °C temperatūros lygiu. Iš jų tik keli gali užtikrinti iki 120 °C temperatūrą. Komercinių ATŠS šildymo galia svyruoja maždaug nuo 100 kW iki 20 MW, o našumo koeficiento reikšmės – nuo 2,4 iki 5,8, priklausomai nuo temperatūros skirtumo (nuo 100 iki 40 K). Pagrindiniai šiuose komerciniuose ATŠS naudojami šaltnešiai yra R245fa, R717, R718, R744, R134a ir R1234ze, o jų darbo efektyvumas pagal antrojo termodinamikos dėsnio Lorenco efektyvumą

siekia apie 40 – 60 % maksimalios teorinės ribos. Tačiau reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad R245fa ir R134a yra neekologiški, žalingi aplinkai ir ateityje neperspektyvūs. Paprastai šiose sistemose taikomi vienpakopiai šilumos siurblio ciklo principai. Esant mažiems temperatūros skirtumams, kaip džiovinimo ar garo gamybos procesuose, didžiausią teorinį našumą tarp pastovios temperatūros šilumos šaltinių galima apibūdinti idealiu Karno šilumos siurblio ciklu. Tačiau aukštos temperatūros tinkluose, kaip nagrinėjamuose šiame kontekste, temperatūros skirtumai yra didesni. Todėl Lorenco ciklas, kuris nustato teorinę ribą tarp šilumos šaltinio temperatūros gradientų, taikant logaritminį vidurkį, yra tinkamesnis tokių sistemų veikimo vertinimui.

Optimalus ŠS integravimas į CŠT daugiausia priklauso nuo jų vietos, prijungimo tipo ir veikimo režimų. Pirmiausia ŠS blokai gali būti įrengiami individualiuose būstuose arba kaip centralizuoti šilumos gamybos įrenginiai CŠT tinkluose. Jie gali būti išdėstyti kaip centriniai, vietiniai arba individualūs šilumos šaltiniai. ŠS gali būti prijungiami prie CŠT tinklo keliais būdais: viengubu prijungimo režimu, kai vienas šilumos siurblys tiekia visą tinklo šildymo poreikį, lygiagrečiu režimu, kai du ar daugiau šilumos siurblių veikia kartu – jie gauna šilumnešį iš bendros įsiurbimo kolektoriaus linijos ir tiekia šilumą į bendrą išleidimo kolektorių, kuris aprūpina centralizuoto šildymo tinklą bei nuosekliu prijungimo režimu, kai keli šilumos siurbliai veikia vienas po kito, taip didindami šilumnešio energiją ir pakeldami tinklo tiekimo temperatūrą. Be to, kiekvienas prijungimo režimas gali veikti su vienu šilumos šaltiniu, kai ŠS vienas tiekia šilumą į CŠT tinklą, arba daugiapakopėje sistemoje, kai ŠS yra pagrindinis šilumos šaltinis, o kiti, pavyzdžiui, iškastinis kuras ar AEŠ, naudojami šilumos poreikių pikui padengti. Daugiapakopiuose veikimo režimuose kiekviena ŠS pakopa prisideda prie šilumos tiekimo į CŠT tinklą ir priklauso nuo kitų pakopų. Veikimo režimai taip pat apima tiesioginį energijos panaudojimą iš CŠT tiekimo linijos, kai aukštos temperatūros srautas naudojamas šaltnešio garinimui bei iš CŠT grįžtamosios linijos žemos temperatūros srauto energija panaudojama šaltnešio garinimui.

Centriniai ŠS projektuojami su dideliu šilumos pajėgumu (2000 kW < $Q_t$ < 20 000 kW) ir reikalauja aukšto šiluminio įėjimo (-5 °C – 25 °C), kad galėtų patenkinti šildymo poreikius, veikdami kaip kogeneracinių sistemų pakaitalai. Jie gali veikti viengubų ar kelių šilumos šaltinių prijungimo režimuose bei nuosekliai, lygiagrečiai ar daugiapakopiu veikimo režimu. LATŠS, veikiantys vieno šilumos šaltinio režimu, gali tiekti šilumą į CŠT, tačiau kelių šaltinių sistemose gali būti integruojami papildomi šilumos šaltiniai, tokie kaip iškastinis kuras ar AEŠ, kad būtų patenkinti maksimalūs šildymo poreikiai. Vietiniai ŠS projektuojami vidutinio šiluminio pajėgumo diapazone (100 kW < $Q_t$ < 2000 kW). Vienas ar keli vietiniai ATŠS gali būti integruojami į CŠT tinklą, tiekdami pastovią arba kintamą šiluminę galią, priklausomai nuo prieinamų šilumos šaltinių. Integruojant ŠS blokus į CŠT tinklą, padidinamas sistemos lankstumas ir šiluminis pajėgumas, naudojant įvairias technologijas bei vietinius šilumos šaltinius šildymo poreikiams patenkinti. Pažangiose CŠT sistemose ŠS išdėstymas leidžia naudoti vienvamzdžius arba dvivamzdžius tinklus, kurie gali tiekti šildymą ir vėsinimą, naudojant ŠS galutiniuose vartotojuose – tai pasiekimas, kuris iki šiol buvo įmanomas tik naudojant keturvamzdes sistemas. Individualūs ŠS gali būti tiesiogiai prijungti prie vamzdynų tinklo, jungiančio pastatus kvartale ar miesto centre, ir gali būti maitinami kogeneracinių jėgainių gaminama elektra iš centralizuotų elektrinių, veikdami vieno arba kelių šilumos šaltinių režimu. Ši alternatyva suteikia galimybę naudoti šiltą ir šaltą vamzdį, kurių temperatūrų skirtumas yra apie 5 – 10 K. Abu vamzdžiai veikia temperatūrose, artimose aplinkos sąlygoms (10 – 35 °C). Dėl žemų temperatūrų pastatų šildymo poreikiai negali būti tenkinami tiesiogiai, todėl kiekviename pastate įrengiami ŠS, kurie pakelia temperatūrą iki reikalingo lygio pastato šildymo sistemai. ŠS ima vandenį iš šilto vamzdžio

ir naudoja jį kaip šilumos šaltinį šildymo režime. Atvėsintas vanduo iš ŠS garintuvo vėliau išleidžiamas į šaltą vamzdį. Jei pastatui reikalingas vėsinimas, jis gali būti užtikrinamas naudojant kompresorinį šaldytuvą arba šilumokaitį tiesioginiam vėsinimui su šaltu vamzdžiu pažangiuose CŠT, kuriuose skystis iš šalto vamzdžio pašildomas pastate ir išleidžiamas į šiltą vamzdį. Pavyzdžiui, mažo galingumo šilumos siurbliai ($10\ kW < Q_t < 100\ kW$) gali naudoti vietinius AEŠ arba CŠT tiekimo ir grįžtamąsias vandens linijas kaip šilumos šaltinius. Panašiai individualūs ŠS, netiesiogiai prijungti prie CŠT, gali naudoti vietinius šilumos šaltinius pastatų šildymui, varomi kogeneracinio įrenginio gaminama elektra. Toks išdėstymas skatina šilumos gamybą augantiems šildymo poreikiams CŠT tinkle tenkinti, todėl elektros energija, suvartojama ŠS blokų, padidina kogeneracinių įrenginių efektyvumą, leidžiant panaudoti perteklinę atsinaujinančią elektros energiją, pavyzdžiui, gaminamą vėjo jėgainių, ir ją kaupti šilumos pavidalu BKV talpose bei pastatų šildymo sistemose.

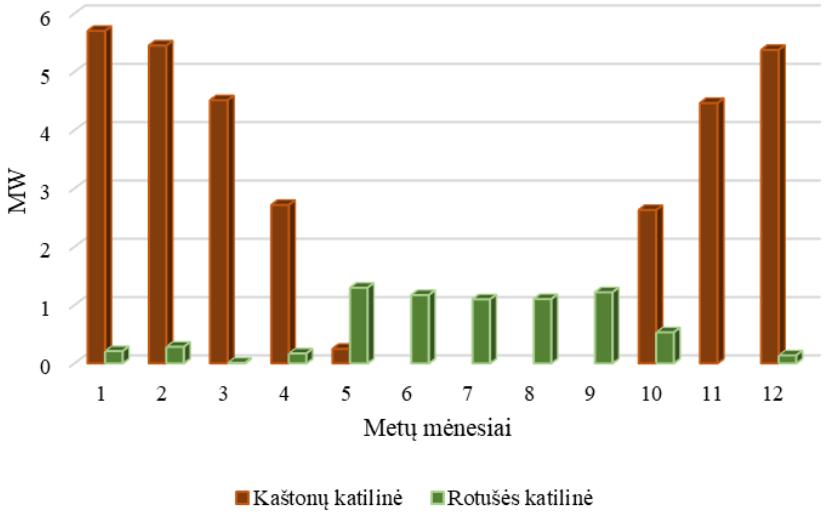
Iš literatūros apžvalgos ir komercinių šilumos siurblių tiekėjų nustatytos galimybės bei iššūkiai gali būti suskirstyti į pagrindines kategorijas. Iššūkiai apibendrinami trijose srityse – socialinėje, ekonominėje ir techninėje. Socialiniai aspektai apima būtinybę keisti politiką ir ilgalaikes strategijas, siekiant pereiti prie naujų sistemų (technologijų ir paskirstymo tinklų), taip pat pasitikėjimo stoką bei specialaus finansavimo trūkumą ŠS plėtrai. Ekonominiai aspektai apima dujų ir naftos kainų svyravimus, investicijų į ŠS kartu su CŠT sistemas sąnaudas bei ribotą komerciškai prieinamų ŠS produktų pasiūlą. Techniniai iššūkiai apima žinių trūkumą, susijusį su ŠS integracija ir eksploatavimu CŠT sistemose, techninių reikalavimų bei šilumos šaltinių (jų vietos ir temperatūros) prieinamumo stoką. Galimybės naudoti šilumos siurblius CŠT tinkluose gali būti suskirstytos į pagrindines sritis: žemos temperatūros alternatyvių šilumos šaltinių panaudojimas tiesioginiam tiekimui, kitų alternatyvių energijos šaltinių, tokių kaip atliekinė šiluma ir atsinaujinanti energija, įtraukimas, ryšio su elektros energijos sistema stiprinimas per energijos balanso ir paklausos valdymo priemones, tinklo temperatūrų mažinimas ir decentralizuotų ŠS diegimo skatinimas ketvirtosios ir penktosios kartos centralizuoto šildymo bei vėsinimo tinkluose, galiausiai – šilumos perdavimo pajėgumų didinimas naudojant grįžtamąją liniją kaip šaltinį ir integruojant ŠS kaip efektyvinimo sistemas [1].

## 2. Šilumos tinklų duomenų analizė

Siekiant išsiaiškinti atsinaujinančių energijos šaltinių integracijos į centralizuotą šilumos tiekimo sistemą galimybes, būtina atlikti išsamią esamos šilumos gamybos struktūros ir dinamikos analizę. Šiame skyriuje remiamasi UAB „Biržų šilumos tinklai“ pateiktais duomenimis, apimančiais laikotarpį nuo 2020 iki 2024 metų.

Analizuota Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo infrastruktūra. Be 17,5 km izoliuotų šilumos tiekimo vamzdynų ją sudaro dvi pagrindinės katilinės – Kaštonų ir Rotušės. Šildymo sezono metu naudojama Kaštonų katilinė, ne šildymo sezono metu, karštam vandeniui šildyti, naudojama Rotušės katilinė. Pikiniais momentais Rotušės katilinė naudojama ir šildymo sezono metu padengti trūkstamai galiai. Kaštonų katilinėje naudojamas biokuras, Rotušės katilinėje didžiąją dalį sudaro granulinis kuras, o pikiniais momentais naudojamos gamtinės dujos. Duomenų analizė leidžia įvertinti šilumos gamybos apimtis, kuro rūšių struktūrą, katilinių darbo režimus, $CO_2$ emisijų lygį.

Kaštonų katilinėje yra įrengtas vienas 6 MW biokuro katilas (DEV6-110). Šis katilas rekonstruotas iš garo katilo DE16-14GM, kuris buvo įrengtas 1988 metais, paskutinis kapitalinis remontas atliktas 2019 metais. Remiantis katilo rėžimine kortele, minimalus katilo nusikrovimas siekia 2,1 MW, toks kiekis viršija CŠT tinklo vasaros poreikį, todėl katilas neturi techninių galimybių veikti ne šildymo sezono metu. Katilo naudingo veiksmo koeficientas, priklausomai nuo apkrovimo svyruoja apie 82 – 83 proc. Visi likusieji Biržų miesto CŠT sistemos šilumos šaltiniai yra įrengti Rotušės katilinėje. Joje įrengti 2 rezerviniai dujiniai katilai Vitomax 200, kurių galia sudaro 6,6 MW ir 11,2 MW, bei 2 MW granulėmis kūrenamas katilas Linka H 2000, kuris naudojamas tinklo vasaros poreikiui tenkinti [26].




**11 pav.** Biokuro katilinių panaudota vidutinė galia 2020 – 2024 metais

11 paveiksle pateikta Biržų šilumos tinklų biokuro katilinių – Kaštonų katilinės ir Rotušės katilinės – faktinė vidutinė panaudota galia (MW) 2020 – 2024 metų laikotarpiu, suskirstyta pagal mėnesius. Analizuojant pateiktus duomenis, akivaizdžiai išryškėja sezoninis šilumos poreikio pasiskirstymas bei katilinių darbo diferenciacija. Kaštonų katilinė, kurios nominali galia yra ženkliai didesnė, intensyviai eksploatuojama šaltuoju metų laikotarpiu – nuo sausio iki balandžio mėnesio bei vėl naudojama nuo spalio iki gruodžio. Šiais laikotarpiais katilinės panaudota galia siekė 0,7 – 6,5 MW, kas atspindi padidėjusį šilumos energijos poreikį centralizuotame tinkle šildymo sezono metu. Tuo tarpu šiltuoju metų laikotarpiu, ypač nuo gegužės iki rugsėjo, Kaštonų katilinės naudojimas buvo minimalus arba visai sustabdytas, išskyrus pavienius atvejus. Rotušės katilinė, priešingai, dažniau

naudojama vasaros mėnesiais. Nuo gegužės iki rugsėjo jos panaudota galia svyravo apie 1,1 – 1,4 MW. Šis modelis rodo, kad Rotušės katilinė atlieka rezervinę arba bazinės apkrovos funkciją ne šildymo sezono metu, kai šilumos poreikis ženkliai mažesnis, tačiau būtina užtikrinti karšto vandens tiekimą ar kitą mažo intensyvumo apkrovą.

Kaštonų katilinės nuostoliai dėl ne visiško mechaninio bei cheminio sudegimo viršija tipines reikšmes, tam gali turėti įtakos tiek prastai veikiančios katilo pakuros, tiek prasta deginamo kuro kokybė. Katilo efektyvumas nustatomas atvirkštinio balanso metodu:

$$\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \% \quad (1)$$

čia: $q_2$ – šilumos nuostoliai su dūmų fizine šiluma;

$q_3$ – šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl ne visiško cheminio kuro sudegimo;

$q_4$ – šilumos nuostoliai, kurie susidaro dėl ne visiško mechaninio sudegimo;

$q_5$ – šilumos nuostoliai nuo katilo išorinių paviršių;

$q_6$ – šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl to, kad šiluma buvo prarasta kartu su pelenais ir šlaku.

Apskaičiuojama žemutinė degimo šiluma:

$$Q_{ž} = 339C^n + 1035H^n - 109(O^n - S_d^n) - 25W^n \quad (2)$$

čia: $Q_ž$ – kuro žemutinė degimo šiluma, kJ/kg;

$C^n, H^n, O^n, S_d^n$ – atitinkamai anglies, vandenilio, deguonies ir sieros kiekis kure, %.

Kuro suvartojimas:

$$B = \frac{Q}{Q_ž \cdot \eta} \quad (3)$$

čia: Q – katilo galia, MW.

Skaičiuojamas teorinis degimui reikalingas oro tūris:

$$M_{O_2} = 2{,}66 \cdot \frac{C^n}{100} + 8 \cdot \frac{H^n}{100} + \frac{S_d^n}{100} - \frac{O^n}{100} \quad (4)$$

čia: $M_{O_2}$ – teorinis deguonies kiekis, reikalingas 1 kg kuro sudeginti, kg/kg.

$$V_o^t = \frac{100 \cdot M_{O_2}}{23 \cdot 1{,}293} \quad (5)$$

čia: $V_o^t$ – teorinis oro tūris, reikalingas 1 kg kuro sudeginti, $m^3/kg$;

23 – deguonies kiekis ore pagal svorį, %;

1,293 – oro tankis normaliomis sąlygomis, $kg/m^3$.

Randamas triatomių dujų tūris:

$$V_{RO_2} = 0{,}01866 \cdot (C^n + 0{,}375 \cdot S_d^n) \quad (6)$$

čia: $V_{RO_2}$ – triatominių dujų ($CO_2$, $SO_2$) tūris, $m^3/kg$.

Randamas azoto tūris:

$$V_{N_2} = 0{,}79 \cdot \alpha \cdot V_0^t + 0{,}008 \cdot N^n \quad (7)$$

čia: $V_{N_2}$ – azoto tūris degimo produktuose, $m^3/kg$;

$\alpha$ – oro pertekliaus koeficientas;

$N_n$ – azoto kiekis kure, %.

Randamas išsiskyrusio vandens garo tūris:

$$V_{H_2O} = 0{,}111 \cdot H^n + 0{,}0124 \cdot W^n + 0{,}0161 \cdot \alpha \cdot V_0^t \quad (8)$$

čia: $V_{H_2O}$ – vandens garų tūris degimo produktuose, $m^3/kg$;

$W^n$ – kuro drėgmė, %.

Randamas degimo produktų tūris:

$$V_d = V_{RO_2} + V_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot V_0^t + V_{H_2O} \quad (9)$$

čia: $V_d$ – bendras degimo produktų tūris, $m^3/kg$.

Randama degimo produktų entalpija:

$$H_d^t = \left(V_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{N_2}^t \cdot c_{N_2} + V_{H_2O}^t \cdot c_{H_2O}\right) \cdot t \quad (10)$$

$$H_0^t = V_0^t \cdot c_0 \cdot t \quad (11)$$

$$H_d = H_d^t + (\alpha - 1) \cdot H_0^t \quad (12)$$

čia: $H_d^t$ – degimo produktų entalpija, $kJ/m^3$;

$H_0^t$ – perteklinio oro entalpija, $kJ/m^3$;

$H_d$ – bendroji degimo produktų entalpija, $kJ/m^3$;

$c_{CO_2}, c_{N_2}, c_{H_2O}$ – atitinkamų dujų savitosios šilumos, $kJ/(m^3 \cdot K)$;

$c_0$ – oro savitoji šiluma, $kJ/(m^3 \cdot K)$;

t – degimo produktų temperatūra, $^oC$.

Skaičiuojami šilumos nuostoliai su dūmų fizine šiluma:

$$q_2 = \frac{H_d}{Q_ž} \cdot 100\ \% \quad (13)$$

Skaičiuojami cheminiai ne visiško sudegimo nuostoliai:

$$q_3 = \frac{\frac{CO}{100} \cdot V_{s.d} \cdot Q_{CO} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)}{Q_ž^n} \cdot 100 \quad (14)$$

čia: $V_{s.d}$ – sausų degimo produktų tūris, $nm^3/kg$;

CO – anglies viendeginio tūrinis procentas sausuose dūmuose;

$Q_{CO}$ – anglies viendeginio degimo šiluminis kaloringumas, 12700 $kJ/nm^3$;

$\left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$ – pataisa, kuria įvertinami mechaniniai ne visiško sudegimo šilumos nuostoliai.

Jei degimo produktuose be CO yra dar $H_2$, $CH_4$ ir kt., analogiškai skaičiuojami nuostoliai ir dėl jų nesudegimo.

Suminiai šilumos nuostoliai nuo katilo paviršių į aplinką:

$$q_5 = \frac{(\sum(\alpha_i F_i \Delta t_i))}{(B Q_ž^n)} \cdot 100 \quad (15)$$

čia: $\alpha_i$ – šilumos atidavimo nuo paviršiaus aplinkai koeficientas;

$F_i$ – paviršiaus plotas, $m^2$;

$\Delta t_i$ – išorinio paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumas, °C;

B – kuro sąnaudos, kg/s.

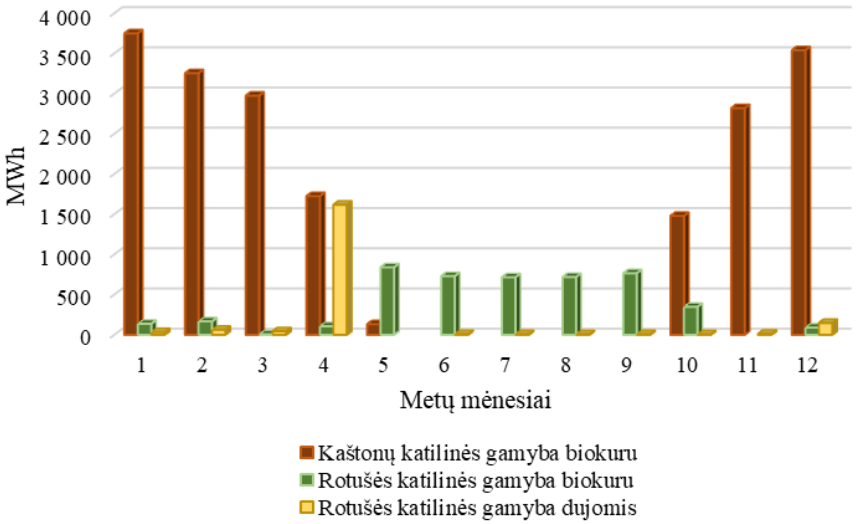
Mechaniniai ne visiško mechaninio sudegimo šilumos nuostoliai ($q_4$) ir šilumos nuostoliai atsirandantys dėl to, kad šiluma buvo prarasta kartu su pelenais ir šlaku ($q_6$) dažniausiai nustatinėjami jau eksploatuojamose katilinėse matavimų metu arba naudojami empyriniai duomenys.

**1 lentelė.** Kaštonų katilinės biokuro katilo nuostoliai [26]

| Šilumos nuostoliai | Kaštonų katilinės rodikliai, proc. | Tipiniai katilinių rodikliai, proc. |
|---|---|---|
| Katilo efektyvumo koeficientas ($q_1$) | 82,3 – 82,9 | 84,0 – 86,0 |
| Šilumos nuostoliai su dūmų fizine šiluma ($q_2$) | 7,1 – 9,6 | 10,0 – 20,0 |
| Šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl ne visiško cheminio sudegimo ($q_3$) | 1,0 | 0,2 – 0,5 |
| Šilumos nuostoliai, kurie susidaro dėl ne visiško mechaninio sudegimo ($q_4$) | 2,5 | >0,5 |
| Šilumos nuostoliai nuo katilo išorinių paviršių ($q_5$) | 3,0 – 5,8 | 2,0 – 3,5 |
| Šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl to, kad šiluma buvo prarasta kartu su pelenais ir šlaku ($q_6$) | 1,4 | 0,02 – 0,1 |

Katilinių darbo pasidalijimas leidžia optimizuoti kuro naudojimą, išvengti perteklinio eksploatavimo ir mažinti šilumos gamybos sąnaudas, priklausomai nuo sezoniškumo bei esamos infrastruktūros galimybių. Iš Kaštonų ir Rotušės katilinių panaudojimo duomenų matyti aiškus sezoniškumas, kuris sudaro palankias prielaidas atsinaujinančių energijos šaltinių integracijai į centralizuotos šilumos tiekimo sistemą. Vasaros metu pagrindinį šilumos gamybos krūvį perima Rotušės katilinė, kurios darbo intensyvumas sutampa su didžiausiu saulės spinduliuotės aktyvumo laikotarpiu. Tai leidžia daryti prielaidą, kad saulės šilumos kolektorių ar saulės elektrinių integracija galėtų ženkliai sumažinti vasaros metu naudojamų iškastinių ar biokuro šaltinių poreikį. Tokiu būdu Rotušės

katilinės veikla galėtų būti iš dalies arba visiškai pakeista AEŠ sprendimais. Tuo tarpu žiemos sezono metu Kaštonų katilinė veikia maksimaliu pajėgumu, todėl šiuo laikotarpiu AEŠ integravimas būtų sudėtingesnis dėl saulės energijos trūkumo ir žemo vėjo intensyvumo Lietuvoje. Vis dėlto, jei būtų vystomi šilumos akumuliatoriai arba didelio efektyvumo šilumos siurbliai, galėtų būti padengta dalis žiemos apkrovos, ypač pereinamuoju laikotarpiu (rugsėjis – spalis, kovas – balandis). Dar svarbiau, kad AEŠ integravimas net ir vasaros laikotarpiu turėtų netiesioginį teigiamą poveikį – mažėtų bendras kuro poreikis per metus, $CO_2$ emisijos bei eksploatacinės išlaidos. Taip pat, tai leistų rezervuoti biokuro katilinių pajėgumus kritiniams sezonams, o vasarą naudoti tvaresnius energijos šaltinius.




**12 pav.** Gamyba biokuro katilais ir KDE bei iškastiniu kuru 2020 – 2024 metais

2020 – 2024 metais vidutinė šilumos gamybos analizė analogiškai rodo ryškų sezoniškumo efektą – Kaštonų katilinė gamino didžiausią energijos kiekį šaltojo sezono mėnesiais: sausį, vasarį, kovą bei lapkritį ir gruodį. Didžiausia gamyba fiksuota gruodžio mėnesį – daugiau nei 3600 MWh, kai tuo tarpu vasarą šilumos gamyba šioje katilinėje buvo sustabdyta. Rotušės katilinė, priešingai, įsitraukė į gamybą nuo gegužės mėnesio ir veikė stabiliai iki spalio mėnesio, vidutiniškai generuodama 700 – 900 MWh per mėnesį. Tokia katilinių darbo strategija rodo sąmoningą šilumos gamybos optimizavimą, kuomet šiltuoju laikotarpiu eksploatuojami efektyvesni ar mažesnės galios įrenginiai, o pagrindiniai biokuro katilai rezervuojami šildymo sezonui. Duomenys atskleidžia, kad gamtinės dujos Biržų šilumos tiekimo sistemoje buvo naudojamos epizodiškai ir tik Rotušės katilinėje. Išsiskiria balandžio mėnuo, kurio metu fiksuota reikšminga šilumos gamyba – daugiau nei 1600 MWh, tuo tarpu kitu laikotarpiu dujų naudojimas išliko minimalus iki 100 MWh per mėnesį arba visai nefiksuotas. Tikėtina, kad intensyvus balandžio mėnesio dujų naudojimas susijęs su laikinu biokuro katilinių neveikimu dėl priežiūros, remonto ar pereinamojo sezono reguliavimu. Kitais mėnesiais dujos galėjo būti naudojamos kaip rezervinis arba balansavimo šaltinis, užtikrinant sisteminį patikimumą esant mažam momentiniam šilumos poreikiui. Dujinio kuro pakeitimas tvariais sprendimais būtų realistiškas net trumpuoju laikotarpiu.

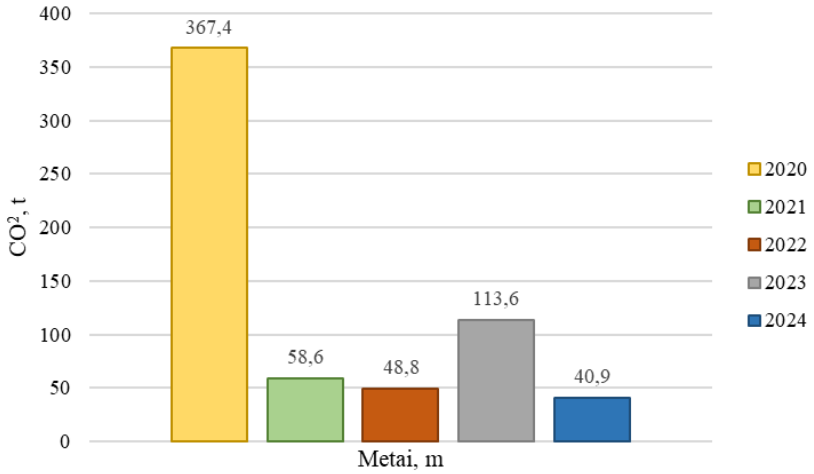
Gamybiniai rodikliai atskleidžia brandžią šilumos tiekimo valdymo struktūrą, kurioje efektyviai derinami didelės galios įrenginiai su ekonomiškais sprendimais. Tai sukuria itin palankų foną AEŠ integravimui be grėsmės esamai tiekimo kokybei. Gamtinių dujų išlikimas kaip atsarginio ar balansavimo šaltinio yra pagrįstas techniniu požiūriu, tačiau ilguoju laikotarpiu, vystant šilumos akumuliavimo, šilumos siurblių ar decentralizuotų AEŠ integraciją, šios funkcijos taip pat galėtų būti

perimtos be $CO_2$ emisijų. Dėl to analizė tampa stipriu argumentu tolimesniam sisteminiam dekarbonizacijos žingsniui.

**2 lentelė.** Šilumos gamybos katilais Biržuose santrauka 2020 – 2024 metais

| Metai | Kaštonų katilinės didžiausia mėnesinė šilumos gamyba, MWh | Rotušės katilinės didžiausia mėnesinė šilumos gamyba, MWh | Rotušės katilinės pagrindiniai veikimo mėnesiai | Bendras tendencijos įvertinimas |
|---|---|---|---|---|
| 2020 | 3403 | 938 | 05 – 10 | Aiški sezoniškumo pradžia |
| 2021 | 3943 | 888 | 05 – 09 | Didelis stabilumas, balansuotas pasiskirstymas |
| 2022 | 3861 | 864 | 05 – 10 | Stabilizuotas darbo režimas |
| 2023 | 3516 | 841 | 05 – 10 | Ankstyvesnė šiltojo sezono pradžia |
| 2024 | 4115 | 745 | 05 – 10 | Padidėjęs energijos poreikis |

Šie duomenys išryškina realius šilumos gamybos kiekius, kurie yra būtini planuojant atsinaujinančių energijos šaltinių integravimą. Vasaros laikotarpiu fiksuojama Rotušės katilinės gamyba galėtų būti efektyviai pakeista saulės šilumos energija, o pereinamuoju sezonu papildoma hibridiniais ar akumuliaciniais sprendimais. Toks scenarijus leistų ne tik sumažinti iškastinio ar biokuro poreikį, bet ir optimizuoti šilumos tinklo valdymą tvarumo požiūriu. Sistemose, kuriose dominuoja biokuras, iškastinis kuras nėra visiškai eliminuotas. Todėl sprendimai dėl atsinaujinančių energijos šaltinių integravimo turėtų taip pat apimti ir rezervinių apkrovų bei avarinių situacijų valdymo modeliavimą.




**13 pav.** $CO_2$ emisijos 2020 – 2024 metų laikotarpiu

Grafike pateikta $CO_2$ emisijų kaita Biržų šilumos tiekimo sistemoje 2020 – 2024 metais atskleidžia itin ryškią mažėjimo tendenciją. 2020 metais $CO_2$ emisijos sudarė net 367,4 tonas, kai tuo tarpu 2024 metais – vos 40,9 t, t. y. beveik 9 kartus mažiau. Reikšmingas emisijų mažėjimas siejamas su keliais veiksniais: gamtinių dujų vartojimo sumažėjimu – kaip rodo ankstesni grafikai, jų naudojimas po 2020 m. buvo ženkliai apribotas ir palaipsniui beveik eliminuotas. Didėjančiu šilumos gamybos efektyvumu – mažesni nuostoliai, tikslesnis apkrovų valdymas. Biokuro kaip pagrindinio kuro įsitvirtinimu – kuris, nors ir diskutuotinas klimato kaitos kontekste, pagal ES metodiką traktuojamas kaip neutralus $CO_2$ atžvilgiu. 2023 metais fiksuotas laikinas emisijų padidėjimas iki 113,6 t, galimai susijęs su intensyvesniu gamtinių dujų naudojimu techniniais tikslais ar padidėjusiu energijos poreikiu. Tačiau tai išlieka išimtinis atvejis bendroje mažėjimo tendencijoje. Toks grafikas ne tik vizualiai įrodo, kad sistema tapo tvaresnė, bet ir leidžia pagrįsti strateginius sprendimus dėl AEŠ

diegimo. Emisijų mažėjimo kreivė tampa stipriu argumentu dekarbonizacijos tęstinumui, o likusi emisijų dalis – tiksliniu tašku, kurį galima eliminuoti atsinaujinančiomis technologijomis, pavyzdžiui, saulės šiluma.

**3 lentelė.** Periodo šildymo dienų skaičius 2020 – 2024 metais

| Mėnesiai | Sausis | Vasaris | Kovas | Balandis | Gegužė | Birželis | Liepa | Rugpjūtis | Rugsėjis | Spalis | Lapkritis | Gruodis | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Metai | Šildymo dienų skaičius | | | | | | | | | | | | Viso |
| 2020 | 31 | 29 | 31 | 28 | - | - | - | - | - | 17 | 30 | 31 | 197 |
| 2021 | 31 | 28 | 31 | 30 | 4 | - | - | - | - | 28 | 30 | 31 | 213 |
| 2022 | 31 | 28 | 31 | 26 | - | - | - | - | - | 22 | 30 | 31 | 199 |
| 2023 | 31 | 28 | 31 | 18 | - | - | - | - | - | 16 | 30 | 31 | 185 |
| 2024 | 31 | 29 | 31 | 29 | - | - | - | - | - | 16 | 30 | 31 | 197 |
| | | | | | | | | | | | Vidurkis | | 198 |

3 lentelėje pateikiamas šildymo dienų skaičius kiekvienais metais laikotarpiu nuo 2020 iki 2024 metų. Tai leidžia vertinti ne tik šildymo sezono trukmės kitimą, bet ir galimai paaiškinti šilumos gamybos bei kuro sunaudojimo skirtumus tarp metų. Bendras šildymo dienų skaičius per metus svyravo nuo 185 (2023 m.) iki 213 (2021 m.), o vidurkis per visą laikotarpį sudarė 198 dienas. Šie skirtumai yra reikšmingi, nes 28 dienų skirtumas tarp trumpiausio ir ilgiausio šildymo sezono potencialiai reiškia keliasdešimt procentų didesnį šilumos poreikį. Ypatingai išsiskiria 2021 metai, kuriuose fiksuojama ilgiausia šildymo trukmė – šildymas vyko net dalį gegužės (4 d.) ir visą spalį (28 d.), o tai koreliuoja su tais metais pastebėtu padidėjusiu šilumos gamybos lygiu ir gamtinių dujų naudojimu bei $CO_2$ emisijų kiekiu. 2023 metais fiksuotas trumpiausias šildymo sezonas iš nagrinėtų duomenų laikotarpio, tik 16 šildymo dienų spalį ir be jokios papildomos veiklos puse balandžio mėnesio, kas gali būti susiję su šiltesniais orais ar optimizuotu šilumos reguliavimu.

Biržų mieste šilumos energija centralizuotu būdu tiekiama į 144 pastatus. Didžioji dalis šilumos vartotojų yra daugiabučiai gyvenamieji namai (viso 91 vnt.), juose sunaudojama apie 73 proc. visos tinkle realizuojamos šilumos energijos. Taip pat stambūs šilumos vartotojai yra 27 biudžetinės organizacijos, mokyklos, darželiai bei įvairios tarnybos. Šiems vartotojams tenka apie 22 proc. vartojamos šilumos. Likusi šiluma suvartojama privačių namų (34 vnt.) ir komercinių organizacijų (16 vnt.). Pastaruoju metu mieste įsibėgėja pastatų renovacijos procesai. Remiantis gautais duomenimis, mieste renovuota daugiau nei pusė daugiabučių pastatų (52 iš 91). Vertinant visame Biržų rajone esančius daugiabučius, taip pat, nėra atsiliekama nuo atnaujinimo tempo – renovuota 70 daugiabučių gyvenamųjų namų, tai sudaro 25,5 % visų potencialiai renovuotinų namų rajone, Biržų rajonas pagal renovacijos procentą užima 10 vietą Lietuvoje [27]. Atnaujinimas vyksta ne tik pastatų mastu, didžioji dalis Biržų CŠT sistemos šiai dienai yra rekonstruota. Vertinama, kad laikotarpyje nuo 2010 metų iki šios dienos pakeista apie 46 proc. visų CŠT tinklų, bekanaliu būdu paklotų vamzdynų absoliutus ilgis sudaro apie 68 proc. viso vamzdyno ilgio.

**4 lentelė.** Centralizuotų šilumos tiekimo tinklų ilgiai

| Paklojimo tipas | 1970-1980 metais | 1980-1990 metais | 1990-2000 metais | 2000-2010 metais | 2010-2022 metais | Viso |
|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Požeminis bekanalis | 15 | - | - | 4047 | 7883 | 11945 |
| Požeminis kanalinis | 368 | 2751 | 578 | - | - | 3697 |
| Antžeminis | - | 264 | - | - | - | 264 |
| Techninis koridorius | 419 | 918 | 121 | - | 127 | 1585 |
| Viso | 802 | 3933 | 699 | 4047 | 8010 | 17491 |

Iš pateiktų duomenų matyti, kad CŠT tinkle lieka mažiau nei 5 km trasų paklotų iki 1990 metų. Tai savo ruožtu atsispindi sumažėjusiuose šilumos nuostoliuose. 2021 metais CŠT šilumos nuostoliai Biržuose sudarė 16,5 proc., tokia reikšmė yra artima Lietuvos šilumos tiekimo įmonių vidurkiui. Atkreiptinas dėmesys, kad šilumos tinklų rekonstrukcijos procesą ženkliai spartino iki 2020 metų taikyti Europos Sąjungos struktūrinių fondų finansinės paramos mechanizmai. Pastaruoju metu numatoma, kad parama tinklų rekonstrukcijai nebebus skiriama, todėl tikėtina, kad renovacijos tempai ženkliai lėtės.

Lietuvoje centralizuoto šilumos tiekimo sektorius sudaro palankias sąlygas atsinaujinančių energijos išteklių integracijai, tačiau didžioji dalis tyrimų orientuota į didžiuosius miestus. Tuo tarpu mažesnių miestų, tokių kaip Biržai, šilumos tiekimo sistemų analizė yra mažiau nagrinėta, nors šiuose miestuose egzistuoja reikšmingas vietinių atsinaujinančių energijos išteklių potencialas. Remiantis Biržų rajono savivaldybės 2021 – 2030 metų atsinaujinančių išteklių energijos naudojimo plėtros veiksmų planu bendras techninis AEŠ potencialas savivaldybėje – apie 178 kilotonų naftos ekvivalentu (ktne), tai yra apie 7 kartus daugiau nei dabartinis metinis energijos poreikis (~ 25 ktne) [28]. Pastaraisiais metais vykdoma daugiabučių pastatų renovacija ženkliai mažina šilumos energijos poreikį, o tai lemia poreikį optimizuoti centralizuoto šilumos tiekimo sistemų veikimą ir ieškoti naujų technologinių sprendimų. Dėl šių priežasčių atsinaujinančių energijos išteklių integracijos į Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą analizė yra aktuali tiek moksliniu, tiek praktiniu požiūriu. Šio tyrimo rezultatai gali būti pritaikomi ir kitų panašios urbanizacijos, dydžio bei apgyvendinimo miestų centralizuoto šilumos tiekimo sistemų plėtrai.

Viena iš aktualių problemų yra santykinai aukšta šilumos kaina Biržų mieste, kuri daro įtaką gyventojų išlaidoms ir savivaldybės energetinei situacijai. Tyrimo aktualumą didina tai, kad Biržų miesto šilumos tiekimo sistemos efektyvinimas gali turėti tiesioginį poveikį šilumos kainos mažinimui ir gyventojų energetinei gerovei, AEŠ integracija gali padėti mažinti šilumos gamybos kaštus ilgalaikėje perspektyvoje. Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos (VERT) duomenimis 2026 m. kovo mėn. vidutinė centralizuotai tiekiamos šilumos kaina Lietuvoje – 8,87 ct/kWh be PVM. UAB „Litekso“ filialo „Biržų šiluma“ centralizuotai tiekiamos šilumos kaina – 13,11 ct/kWh be PVM [29]. Biržai yra pirmoje vietoje pagal didžiausią šilumos kainą Lietuvoje, Biržuose šiluma yra ~ 50 proc. brangesnė nei šalies vidurkis ir daugiau nei 2 kartus brangesnė nei pigiausiuose miestuose. Aukštai kainai įtakos turi mažas vartotojų skaičius – sąnaudos yra išdalinamos mažesniam vartotojų skaičiui, kitaip tariant nėra masto ekonomikos. Taip pat Biržų šilumos tinkluose didelė pastovioji kainos dalis – 7,62 ct/kWh, tai reiškia didelę infrastruktūros kainą sistemos amortizacijai, tinklų sistemai bei priežiūrai. Unikalumas Biržams, kad šilumos ūkis priklauso savivaldybei, tačiau eksploatuoja „Litesko“ priklausanti vienai didžiausių pasaulyje energijos paslaugų kompanijų grupei „Veolia“. Tai reiškia, kad į kainą įeina nuomos mokestis, investicijų grąža ir operatoriaus pelnas. Aukšta šilumos kaina Biržų mieste rodo būtinybę optimizuoti centralizuoto šilumos tiekimo sistemą, todėl atsinaujinančių energijos išteklių integracijos galimybių analizė yra ne tik aktuali, bet ir praktiškai reikšminga.

## 3. Atsinaujinančios energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus

### 3.1. Saulės energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus

Atsinaujinančių energijos šaltinių integravimas į centralizuoto šilumos tiekimo sistemas tampa vis aktualesnis siekiant dekarbonizuoti šilumos ūkį, mažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro bei užtikrinti ilgalaikį energetinį tvarumą. Viena iš labiausiai prie CŠT specifikos pritaikomų technologijų – saulės šilumos kolektoriai, kurie leidžia tiesiogiai gaminti šilumos energiją karšto vandens ruošimui, ypač šiltuoju metų laikotarpiu.

Atsinaujinančios energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus pradedamas analizuoti nuo galimybės panaudoti saulės kolektorius. Šiame tyrime vertinami galimi saulės šilumos integracijos scenarijai, atsižvelgiant į sezoniškai kintantį vartojimo pobūdį bei technologinius šilumos perdavimo parametrus. Išskiriami pagrindiniai galios scenarijai – šiltuoju sezonu reikalingos energijos padengimas, užtikrinantis visišką poreikio savarankiškumą vasaros mėnesiais, tačiau sukeliantis perteklinės energijos kaupimo poreikį ir dalinis poreikio padengimas. Analizuojant šilumos energijos pritaikymą tinkle, vertinami keli saulės kolektorių veikimo principai pagal temperatūrinius režimus. Vienas scenarijus numato šilumos pakėlimą nuo grįžtamojo srauto 40 °C iki reikalingos tiekiamos temperatūros 70 °C pagal šilumos tiekimo grafiką. Kitu atveju, mažesnio masto hibridinė sistema, kurioje grįžtamasis vanduo pirmiausia kondensaciniame ekonomaizeryje pašildomas nuo 40 °C iki 45 °C, saulės energija naudojama pakelti temperatūrą nuo 45 °C iki 60 °C saulės kolektoriais, o likusios energijos poreikio padengimas vykdomas biokuru. Tokia sistema leidžia sumažinti biokuro apkrovą bei tolygiau išskaidyti apkrovas tarp šaltinių. Šie scenarijai padeda ne tik įvertinti technologinį kolektorių pritaikomumą skirtingoms sąlygoms, bet ir pagrįsti efektyviausią integracijos mastelį bei akumuliacijos poreikį centralizuotuose šilumos tinkluose.

**5 lentelė.** Energijos poreikis šildymui ir karšto vandens ruošimui Biržų miesto CŠT metų laikotarpyje

| Mėnuo | Šiluminės energijos poreikis, MWh | Šiluminės energijos poreikis, MWh/d |
|---|---|---|
| Sausis | 4311 | 139,06 |
| Vasaris | 4034 | 144,07 |
| Kovas | 3299 | 106,42 |
| Balandis | 2431 | 81,03 |
| Gegužė | 1100 | 35,48 |
| Birželis | 752 | 25,07 |
| Liepa | 762 | 24,58 |
| Rugpjūtis | 762 | 24,58 |
| Rugsėjis | 888 | 29,60 |
| Spalis | 2210 | 71,29 |
| Lapkritis | 2939 | 97,97 |
| Gruodis | 4127 | 133,13 |
| Iš viso per metus | 27615 | - |

Skaičiuojamas terminių kolektorių naudingo veiksmo koeficientas:

$$\eta = \eta_0 - \frac{a_1 \cdot (t_m - t_a)}{G} - \frac{a_2 \cdot (t_m - t_a)^2}{G} \quad (16)$$

čia: $t_a$ – mėnesinė vidutinė aplinkos temperatūra, °C;

$t_m$ – vidutinė šilumnešio temperatūra, °C;

G – saulės spinduliuotės intensyvumas į paviršių, W/m$^2$;

$\alpha_1$ – pirmojo laipsnio šilumos nuostolių koeficientas, $\alpha_1$ – 2,2 W/(m$^2$ · K);

$\alpha_2$ – antrojo laipsnio šilumos nuostolių koeficientas, $\alpha_2$ – 0,0036 W/(m$^2$ · K);

$\eta_0$ – optinis naudingumo koeficientas, $\eta_0$ – 0,852.

**6 lentelė.** Saulės terminių kolektorių naudingo veiksmo koeficiento skaičiavimų suvestinė

| Mėnuo | Mėnesinė vidutinė spinduliuotė, kWh/m$^2$ | Vidutinis saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m$^2$ | Mėnesinė vidutinė lauko oro temperatūra, °C | Naudingumo koeficientas η (40°C →70°C) | Naudingumo koeficientas η (45°C →60°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| Sausis | 8 | 36,9 | -3,3 | - | - |
| Vasaris | 27 | 107,1 | -3,2 | - | - |
| Kovas | 65 | 190,6 | 0,5 | 0,17 | 0,20 |
| Balandis | 96 | 228,6 | 7,1 | 0,36 | 0,38 |
| Gegužė | 148 | 298,4 | 12,6 | 0,52 | 0,54 |
| Birželis | 156 | 305,9 | 16,1 | 0,55 | 0,58 |
| Liepa | 151 | 286,5 | 18,4 | 0,55 | 0,58 |
| Rugpjūtis | 135 | 290,3 | 17,4 | 0,55 | 0,57 |
| Rugsėjis | 83 | 212,8 | 12,5 | 0,38 | 0,41 |
| Spalis | 46 | 148,4 | 6,7 | 0,08 | 0,12 |
| Lapkritis | 9 | 37,5 | 2,2 | - | - |
| Gruodis | 2 | 10,8 | -1,5 | - | - |

Šaltuoju metų laikotarpiu apskaičiuoti naudingumo koeficientai yra nevertinami, nes šilumos nuostoliai viršija per mėnesį surenkamą saulės spinduliuotės kiekį. Tai rodo, kad vidutinės mėnesinės apšvitos reikšmės yra per mažos, kad kompensuotų kolektoriaus šilumos nuostolius, todėl tokiomis sąlygomis energijos gamyba yra neefektyvi. Atsižvelgiant į tai, tolimesniuose skaičiavimuose vertinamas tik šiltasis laikotarpis, kai vidutinis naudingumo koeficientas yra teigiamas ir sistema veikia efektyviai. Be to, atsižvelgiama į šylantį klimatą ir didėjantį saulės spinduliuotės kiekį, todėl vasaros laikotarpis laikomas racionaliausiu integravimo laikotarpiu.

Skaičiuojamas reikalingas kolektorių plotas:

$$\mathrm{Q} = I \cdot A \cdot \eta \rightarrow A = \frac{\mathrm{Q}}{I \cdot \eta} \tag{17}$$

čia: Q – energijos kiekis karšto vandens ruošimui per mėnesį, MWh;

A – saulės kolektorių plotas, m$^2$;

I – daugiametė vidutinė pilnutinė saulės ekspozicija, tenkanti horizontaliam paviršiui kiekvieną mėnesį, MWh/m$^2$;

$\eta$ – kolektoriaus naudingo veiksmo koeficientas.

**7 lentelė.** Saulės kolektorių poreikis šilumos energijos padengimui šiltuoju laikotarpiu

| Temperatūros pakėlimo scenarijus | Reikalingas kolektorių plotas, $m^2$ | Kolektorių skaičius, vnt. |
|---|---|---|
| (40 °C → 70 °C) | 11077 | 5300 |
| (45 °C → 60 °C) | 4155 | 1988 |

7 lentelėje pateikiamas saulės kolektorių poreikio palyginimas, vertinant du pagrindinius šilumos energijos padengimo scenarijus šiltuoju metų laikotarpiu keliant temperatūrą nuo 40 °C iki 70 °C ir nuo 45 °C iki 60 °C. Lentelėje nurodomas ne tik bendras reikalingas kolektorių plotas, bet ir atitinkamas kolektorių skaičius, kuris buvo apskaičiuotas laikantis prielaidos, kad vieno kolektoriaus plotas sudaro apie 2,09 m².

Nuo 40 °C iki 70 °C padengimo scenarijus reikalautų daugiau nei 11 000 m² kolektorių ploto ir 5 300 vienetų kolektorių. Tai didelio masto projektas, kuris generuotų perteklinę šilumos energiją vasaros mėnesiais, todėl būtinas kaupimo infrastruktūros įvertinimas. Nuo 45 °C iki 60 °C padengimo sprendimas sumažina ploto ir įrangos poreikius apie 60 %, tačiau vis dar išlaiko labai aukštą padengimo lygį ir eliminuoja pertekliaus problemą.

Siekiant išvengti kolektorių tarpusavio šešėliavimo bei užtikrinti efektyvų saulės spindulių pasisavinimą viso sezono metu, tarp kolektorių būtina palikti technologiškai pagrįstus tarpus. Tai reiškia, kad realus užimamas plotas yra didesnis nei vien tik kolektorių aktyvioji absorbcijos zona. Analizuotoje literatūroje rekomenduojama skaičiuoti, kad 1 m² kolektoriaus ploto reikalinga apie 2 m² bendrojo užimamo ploto, įskaitant tarpus. Tokiu atveju realus reikalaujamas plotas saulės kolektoriams išauga dvigubai nuo 40 °C iki 70 °C padengimo scenarijui reikėtų apie 22 154 m², nuo 45 °C iki 60 °C – 8 310 m².

Reikalingas tarpas tarp šilumos kolektorių eilių, įvertinti šešėliavimui skaičiuojamas pagal formulę:

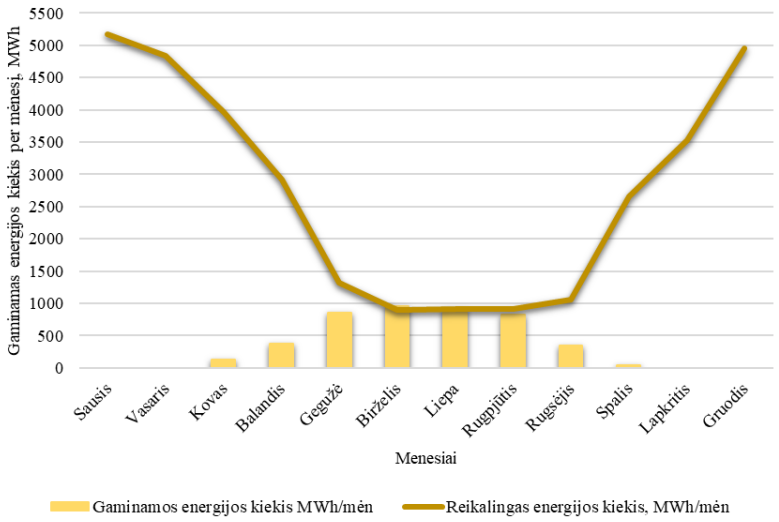
$$d = h \cdot \cot(\theta) \tag{18}$$

čia: d – tarpas tarp eilių, m;

h – kolektoriaus aukštis, m;

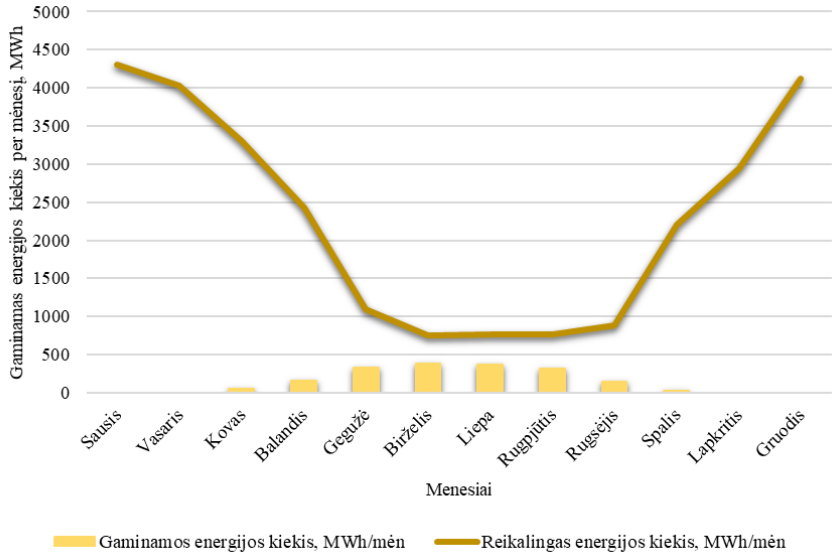
θ – minimalus saulės aukščio kampas šiltuoju sezonu.

Pateiktame 14 paveiksle lyginami dviejų šaltinių duomenys – mėnesinis reikalingas šilumos kiekis šildymui ir karštam vandeniui ir potencialiai saulės kolektorių generuojama šilumos energija, esant nuo 40 °C iki 70 °C scenarijaus vasaros laikotarpio poreikio padengimui. Gamybos kreivė atspindi tipišką saulės intensyvumo sezoniškumą Lietuvos sąlygomis – aukščiausia generacija birželį ir liepą, beveik siekia 900 MWh per mėnesį, o žiemos mėnesiais – neefektyvi saulės šilumos gamyba. Tuo tarpu poreikio kreivė šaltuoju metų laikotarpiu (sausis – balandis ir spalis – gruodis) gerokai padidėja, nes šiuo laikotarpiu CŠT sistemose tenkinamas karšto vandens poreikis ir pastatų šildymo poreikis. Karšto vandens vartojimo įpročiai yra nepriklausomi nuo sezono. Matomas poreikio intensyvumo sumažėjimas vasaros mėnesiais – birželį, liepą ir rugpjūtį.




**14 pav.** Nuo 40 °C iki 70 °C scenarijaus energijos gamyba saulės kolektoriais (plotas – 11 077 $m^2$)

Analizuojant rezultatą, matoma, kad vasaros laikotarpiu (gegužė – rugpjūtis) kolektoriai gali sėkmingai patenkinti beveik visą karšto vandens poreikį, o kai kuriais mėnesiais net generuoti perteklių (birželis, liepa). Perteklius galėtų būti kaupiamas akumuliacinėse talpose ir panaudojamas padengti rudens mėnesių energijos trūkumui. Rudens ir pavasario mėnesiais dalis poreikio būtų padengiama, tačiau reikalingas papildymas rezerviniu šaltiniu – biokuru. Žiemos mėnesiais sistema tampa neefektyvi – saulės kolektorių gamyba nepadengtų reikalingo kiekio. Tačiau principas yra koncentruotis į padengimą šiltuoju periodu ir integruoti atsinaujinančius šaltinius būtent šiam laikotarpiui, o šaltuoju sezonu naudoti biokurą. Tokiu būdu pavyktų eliminuoti iškastinio kuro naudojimą ir būtų sumažintos $CO_2$ emisijos.

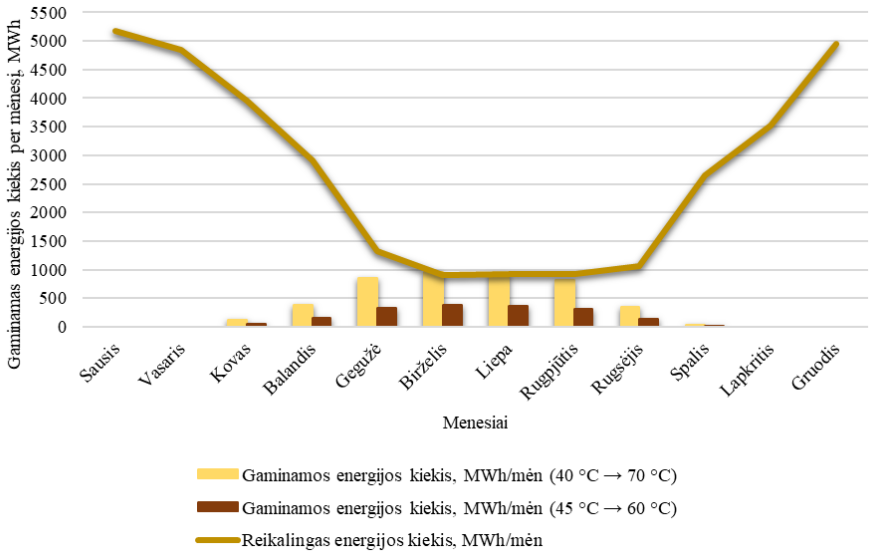



**15 pav.** Nuo 45 °C iki 60 °C scenarijaus energijos gamyba saulės kolektoriais (plotas – 4 155 $m^2$)

Šis grafikas atspindi mažesnio mastelio integracijos scenarijų – kai saulės kolektoriai padengia tik nuo 45 °C iki 60 °C šiltojo laikotarpio karšto vandens poreikio. Šis scenarijus numato, kad saulės kolektoriai sugeneruoja maždaug 50 % vasaros poreikio, todėl saulėtais mėnesiais (gegužė–rugpjūtis) kolektorių gamyba priartėja prie poreikio. Sistemos naudingumo koeficientas pagerėja, nes vidutinė termofikato temperatūra yra mažesnė bei nelieka perteklinės gamybos. Šiuo atveju nebereikia akumuliacijos, kaip nuo 40 °C iki 70 °C scenarijuje. Tai leidžia sumažinti tiek įrangos mastelį, tiek perteklinės energijos kiekį, kuris realybėje dažnai nėra išnaudojamas. Tai gali būti pasirenkama kaip

realistinė pilotinė AEŠ integracijos versija mažesniuose miesteliuose ar riboto biudžeto projektuose. Skirtingai nei ankstesniuose modeliuose, šiame scenarijuje – saulės energijos gamyba neprilygsta poreikiui net vasaros mėnesiais. Birželį ir liepą sugeneruojama ~380 MWh, kai poreikis siekia ~760 MWh. Perteklinės gamybos beveik nėra, todėl akumuliacinės talpos poreikis iš esmės eliminuojamas.

Šis scenarijus leidžia stabiliai padengti dalį karšto vandens poreikio vasaros metu, bet neužtikrina visiško nepriklausomumo nuo kitų šaltinių. Sistema efektyviausiai veikia nuo gegužės iki rugsėjo, bet be perteklių. Didžiausias privalumas – investicijų efektyvumas. Šis variantas reikalauja ~60 % mažiau kolektorių ir ploto nei nuo 40 °C iki 70 °C padengimo scenarijus. Šis scenarijus gali būti pasirinktas kaip pereinamasis etapas, vėliau plečiant sistemą. Dėl nedidelės generacijos apimties, saulės energija tampa stabilia bazinės apkrovos dalimi vasaros metu.




**16 pav.** Nuo 45 °C iki 60 °C ir nuo 40 °C iki 70 °C scenarijų energijos gamyba saulės kolektoriais

Skirtingiems temperatūrų pakėlimo scenarijams naudojant šilumos kolektorius įvertinti naudojama šilumos kiekio formulė:

$$Q = \frac{[c \cdot \rho \cdot V \cdot (t_{k.v.} - t_{š.v.})]}{1000} \rightarrow V = \frac{1000 \cdot Q}{[c \cdot \rho \cdot (t_{k.v.} - t_{š.v.})]} \quad (19)$$

čia: Q – energijos kiekis, kWh;

c – savitoji vandens šiluminė talpa – 1,16 Wh/kg·K;

ρ – vandens tankis – 1000 kg/m³;

V – karšto vandens poreikis per parą, m³;

$t_{k.v.}$ – pageidaujama karšto vandens temperatūra, ºC;

$t_{š.v.}$ – vidutinė šalto vandens temperatūra, ºC.

Kadangi sunaudojama šilumos energija yra tiesiogiai susijusi su grįžtamojo srauto temperatūros padidinimu nuo 40 °C iki 70 °C, kaip numatyta centralizuoto šilumos tiekimo temperatūriniame grafike, galima apytiksliai nustatyti reikalingą termofikacinio vandens kiekį šilumos poreikiui

padengti. Atlikus skaičiavimus, sudaromos prielaidos įvertinti energijos sąnaudas skirtingiems temperatūrų pakėlimo scenarijams.

Naudojantis išreikšta formule, buvo nustatytas reikalingas karšto vandens kiekis pagal bendrą šilumos poreikį. Įvertinus temperatūrų pakėlimo skirtumą ir vidutines reikšmes, apskaičiuotas šilumos energijos kiekis, reikalingas šildymui ir karštam vandeniui paruošti skirtingais temperatūrų pakėlimo scenarijais. Gauti rezultatai pateikti 8 lentelėje.

**8 lentelė.** Energijos poreikis šildymui ir karšto vandens ruošimui skirtingais temperatūrų pakėlimo variantais

| Mėnuo | Reikalingas energijos kiekis pakeliant temperatūrą nuo 40 ˚C iki 70 ˚C, MWh | Pagaminamas energijos kiekis saulės kolektoriais pakeliant temperatūrą nuo 40 ˚C iki 70 ˚C, MWh | Reikalingas energijos kiekis pakeliant temperatūrą nuo 45 ˚C iki 60 ˚C, MWh | Pagaminamas energijos kiekis saulės kolektoriais pakeliant temperatūrą nuo 45 ˚C iki 60 ˚C, MWh | Reikalingas energijos kiekis pakeliant temperatūrą nuo 60 ˚C iki 70 ˚C, MWh |
|---|---|---|---|---|---|
| Sausis | 5173 | - | 2587 | - | 1724 |
| Vasaris | 4841 | - | 2420 | - | 1614 |
| Kovas | 3959 | 122 | 1979 | 54 | 1320 |
| Balandis | 2917 | 383 | 1459 | 152 | 972 |
| Gegužė | 1320 | 853 | 660 | 332 | 440 |
| Birželis | 902 | 950 | 451 | 376 | 301 |
| Liepa | 914 | 920 | 457 | 364 | 305 |
| Rugpjūtis | 914 | 823 | 457 | 320 | 305 |
| Rugsėjis | 1066 | 349 | 533 | 141 | 355 |
| Spalis | 2652 | 41 | 1326 | 23 | 884 |
| Lapkritis | 3527 | - | 1763 | - | 1176 |
| Gruodis | 4952 | - | 2476 | - | 1651 |
| Iš viso per metus | 33137 | 4441 | 16569 | 1762 | 11046 |

Analizėje pasirinktas nuolatinis temperatūros pakėlimas nuo 40 °C iki 70 °C, kuris atspindi tipinę CŠT veikimo situaciją šildymo sezono metu. Galimas palyginimas tarp scenarijų nuo 40 °C iki 70 °C ir nuo 45 °C iki 60 °C, pastaruoju atveju trūkstama temperatūra galėtų būti kompensuojama naudojant biokurą. Reikalingas saulės kolektorių plotas gali būti nustatomas gana paprastai, kadangi vienas pagrindinių veiksnių yra temperatūrų skirtumas. Pavyzdžiui, scenarijuje, kai temperatūra keliama nuo 40 °C iki 70 °C, temperatūrų skirtumas yra dvigubai didesnis nei scenarijuje nuo 45 °C iki 60 °C, todėl atitinkamai reikalingas saulės kolektorių skaičius bei plotas taip pat būtų maždaug dvigubai didesnis. Saulės kolektorių scenarijaus 40 °C – 70 °C montavimo plotas numatomas šalia Kaštonų katilinės esančiame sklype adresu Skratiškių g. 9, nuosavybes teise priklausančiame valstybei, patikėjimo teise disponuojamame Biržų rajono savivaldybės. Saulės kolektorių scenarijaus 45 °C – 60 °C montavimo plotas numatomas sklype adresu Vėjo g. 25, kuriame šiuo metu yra Biržų šilumos tinklų Kaštonų katilinė. Šis sklypas nuo sklypo Skratiškių g. 9 nutolęs apie 100 m atstumu.

**17 pav.** Preliminari teritorija saulės kolektorių įrengimui 40 °C – 70 °C scenarijaus atveju [30]

**18 pav.** Preliminari teritorija saulės kolektorių įrengimui 45 °C – 60 °C scenarijaus atveju [30]

## 3.2. Šilumos siurblių integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus

Analizuojant šilumos energijos pritaikymą tinkle, vertinami šilumos siurbliai. Ekonomiškam siurblių panaudojimui išnagrinėjamos atliekinės šilumos panaudojimo galimybės, prieš svarstant orą arba gruntą kaip pagrindinį šilumos šaltinį. Atliekinė šiluma – tai šiluma, kuri susidaro technologinių ar buitinių procesų metu, šiuo metu nėra panaudojama, išmetama į aplinką, turi žemą arba vidutinę temperatūrą (5 – 40 °C) ir gali būti pakelta iki tinkamos CŠT temperatūros šilumos siurblių pagalba. Realistiškas atliekinės šilumos šaltinis Biržuose UAB „Biržų vandenys“ – nuotekų (kanalizacijos) atliekinė šiluma. Nuotekų temperatūra ištisus metus 12 – 15 °C, žiemą – aukštesnė nei oras. Temperatūra stabili, todėl efektyvumo rodiklis (COP) aukštas 3 – 4, nėra atitirpinimo problemų kaip oro šilumos šaltinio šilumos siurbliui. Nuotekų kiekis tiesiogiai susijęs su gyventojų skaičiumi, tai reiškia prognozuojamą srautą. Šiluma imama iš išvalytų nuotekų (saugiau eksploatacijai) arba iš pagrindinio kolektoriaus prieš valymą. Šilumos potencialas yra 5 – 15 kWh/m³ nuotekų, galimas padengimas 10 – 25 % miesto CŠT bazinės apkrovos.

Taip pat gali būti naudojama pramonės ir verslo atliekinė šiluma. Nors ir Biržuose nėra sunkiosios pramonės, bet yra maisto perdirbimo, sandėliavimo, logistikos centrų. Galimas variantas būtų UAB

„Biržų alus“ alaus darykla. Gamyboje vyksta fermentacijos, aušinimo, šaldymo procesai. Gaunama nuolatinė atliekinė šiluma 20 – 35 °C. Labai aukštas efektyvumo rodiklis 5 – 7. Dar vienas galimas variantas būtų panaudoti atliekinę šilumą iš Širvėnos ežero, seniausio dirbtinio vandens telkinio Lietuvoje. Žiemą vandens temperatūra siekia 1 – 4 °C, vasarą apie 15 – 20 °C, bendras efektyvumo rodiklis būtų maždaug 3,5 – 4,5. Tačiau yra galimų ribojimų – aplinkosauginiai leidimai, sezoniškumas, didesnės investicijos. Panaudojimas galimas, bet silpnesnis nei nuotekos ar pramonė.

Analizuojant šilumos siurblių integracijos galimybes Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje, identifikuojami keli realistiški atliekinės šilumos šaltiniai. Didžiausią potencialą turi komunalinės nuotekos, kurių temperatūra ištisus metus išlieka santykinai aukšta (12 – 15 °C) ir pasižymi stabiliais debitais. Toks šaltinis leidžia šilumos siurbliams pasiekti aukštą sezoninį naudingumo koeficientą SPF > 4 ir gali būti naudojamas kaip bazinės apkrovos šaltinis CŠT tinkle. Papildomai vertinamas vandens telkinių bei vietinių pramonės objektų – ypač maisto ir gėrimų gamybos – atliekinės šilumos panaudojimas, kuris leidžia dar labiau sumažinti iškastinio kuro poreikį ir $CO_2$ emisijas.

Tolimesnei analizei paskaičiuojamos nuotekų šaltinio šilumos siurblio integracijos į CŠT galimybės. Pagal viešai prieinamą informaciją UAB „Biržų vandenys“ tinklalapyje vidutinis realus nuotekų srauto debitas yra 2500 $m^3$/d [31]. Nuotekų temperatūra tipiškai 12 – 15 ˚C, tinkama šilumos siurbliui ištisus metus. Praktiškai dažniausiai imama ΔT = 3 – 6 ˚C, kad nekelti apledėjimo/biologinių rizikų, priklauso nuo sprendinio – prieš/po valymo. Toliau skaičiuojama su ΔT = 4 ˚C, vidutine inžinerine paklaida. Kadangi nuotekų šaltinis yra vandens tipo ir stabilus, todėl COP dažniausiai aukštesnis nei oras – vanduo. Naudojant šiluminę talpą 1 $m^3$ vandens atšaldant 1 K gauname apie 1,163 kWh šilumos. Kadangi vandens savitoji šiluminė talpa $c_p$ = 4,18 kJ/(kg · K), o tankis ρ = 1000 kg/$m^3$, todėl gauname $c_p$ = 4180 kJ/($m^3$ · K). Atliekama vienetų konversija 1 kWh = 3600 kJ, todėl 4180 kJ/($m^3$ K) / 3600 = 1,163 kW/($m^3$ · K). Skaičiuojama vidutinė šaltinio galia:

$$P = V_{dien} \cdot 1{,}163 \cdot \Delta T \tag{20}$$

čia: P – vidutinė šilumos siurblio galia, kW;

$V_{dien}$ – išvalytų nuotekų debitas, $m^3$/h;

ΔT – tiekiamų ir grįžtamų nuotekų temperatūrų skirtumas, ˚C.

Iš nuotekų šaltinio Biržai realistiškai gali gauti apie 0,48 MW vidutinės šilumos galios ir 5,37 GWh per metus žemos temperatūros šilumos. Palyginimui su CŠT poreikiu 5368 / 27615 = 19,4 %, tai yra apie 19 proc. metinio poreikio, jei visa šiluma būtų panaudota.

Jei šilumos siurblys paima iš šaltinio $Q_{šalt}$ ir sunaudoja elektrą $E_{el}$, jis pagamina:

$$Q_{\check{S}S} = Q_{\check{s}alt} + E_{el} \tag{21}$$

Efektyvumo rodiklio COP apibrėžimas:

$$COP = \frac{Q_{\check{S}S}}{E_{el}} \rightarrow E_{el} = \frac{Q_{\check{S}S}}{COP} \tag{22}$$

Patogus ryšys su šaltiniu:

$$Q_{šalt} = Q_{šS}\left(1 - \frac{1}{COP}\right) \rightarrow Q_{šS} = \frac{Q_{šalt}}{1-\frac{1}{COP}} \quad (23)$$

Lorenzo efektyvumo koeficiento skaičiavimas:

$$COP_{Lorenz} = \frac{T_{lm,karšt}}{T_{lm,karšt} - T_{lm,šalt}} \quad (24)$$

čia: $T_{lm,karšt}$ – karštosios pusės logaritminis temperatūrų skirtumas;

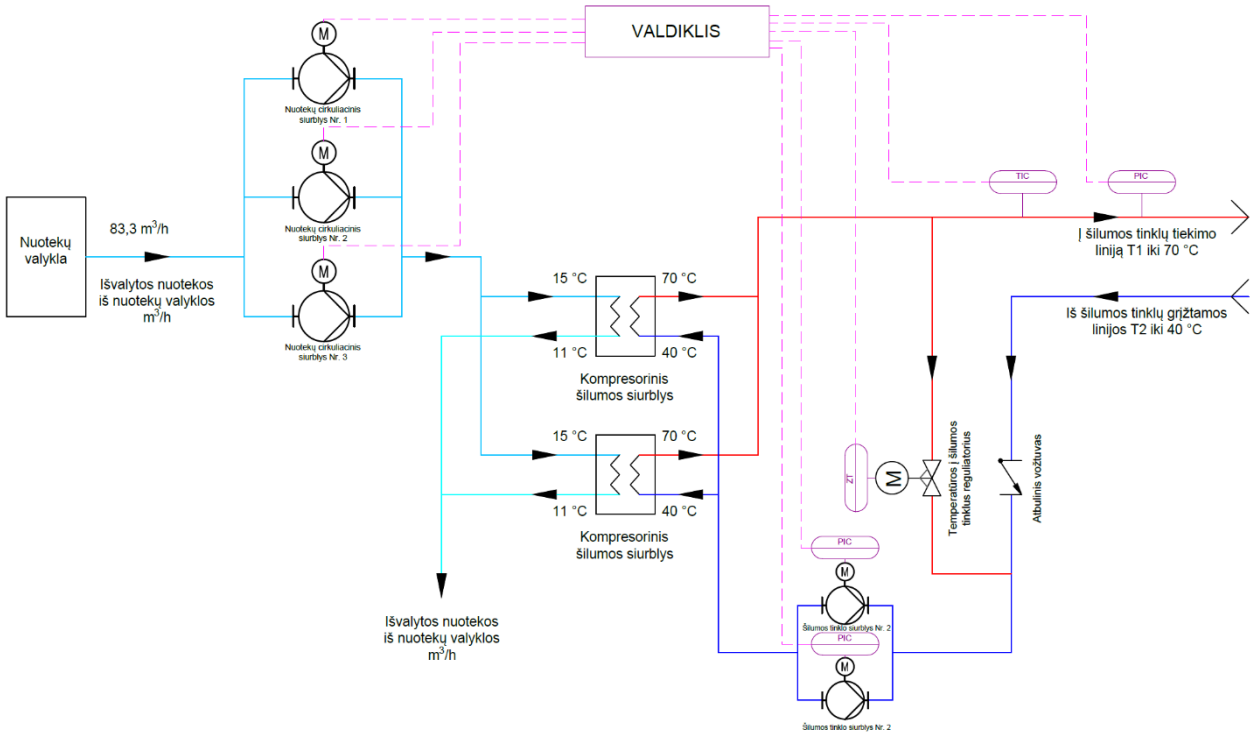
$T_{lm,šalt}$ – šaltosios pusės logaritminis temperatūrų skirtumas.

$$T_{lm} = \frac{T_{in} - T_{out}}{ln\left(\frac{T_{in}}{T_{out}}\right)} \quad (25)$$

čia: $T_{in}$ – į šilumokaitį įtekančio srauto temperatūra;

$T_{out}$ – iš šilumokaičio ištekančio srauto temperatūra.

Pagal pateiktas formules apskaičiuojamas teorinis ciklo efektyvumas (COP), kurį lemia fizikos dėsniai, o gauta teorinė vertė dauginama iš tipinio ciklo efektyvumo. Šiuo metu rinkoje esančių šilumos siurblių Lorenco ciklo efektyvumas gali svyruoti nuo 40 % mažiems įrenginiams iki 60 % dideliems pramoniniams šilumos siurbliams. Tai lemia teorinio ir faktinio efektyvumo skirtumą, kadangi teorinis COP efektyvumas dauginamas iš efektyvumo koeficiento, kuris atspindi šilumos siurblio mechaninius ir šiluminius nuostolius. Remiantis Danijos energetikos agentūros technologinių duomenų katalogu priimama 45 % pataisa [32].




**19 pav.** Šilumos siurblių sistemos technologinė schema

Gauname, kad pagaminama šiluma į CŠT 5,37 GWh/metus, elektros poreikis 1,85 $GWh_{el}$/metus, vidutinė tiekiama galia į tinklą 0,70 MW. Tai yra bazinis dydis, be sezoniškumo – nuotekų srautas gana stabilus, todėl šilumos siurblys dažnai dirba kaip bazinis šaltinis.

Taip pat atliekamas palyginimas iš nuotekų šilumos šaltinio gaunamo ŠS rezultatai su oro ir grunto šilumos šaltinių ŠS. Šilumos tiekimo tinklų sistemoje šaltuoju periodu temperatūrinis grafikas yra 85 ºC tiekiamas ir 45 ºC grįžtamas, o šiltuoju periodu 70 ºC tiekiamas, 40 ºC grįžtamas. Čia pateikiamos maksimalios reikšmės prie blogiausių ir nepalankiausių oro sąlygų. Didinti temperatūra iki maksimalios tiekiamos su šilumos siurbliais dažnu atveju nėra technologiškai ir ekonomiškai racionalu. Kadangi esant didelėms neigiamoms lauko oro temperatūroms krenta COP, ypatingai oro šilumos šaltinio šilumos siurbliams. Todėl geresnis kompromisas kelti grįžtamo srauto temperatūrą, tokiu principu gaunamas didesnis COP, išnaudojamas mažesnis kiekis elektros energijos ir investicija gaunama racionalesnė.

**9 lentelė.** Skirtingų šilumos šaltinių šilumos siurblių efektyvumo ir elektros sąnaudų lyginamoji analizė

| Šaltinis | COP (70/40 ºC) | COP (85/45 ºC) | COP Metinis efektyvumas | Elektros sąnaudos (70/40 ºC), $MWh_{el}$/metus | Elektros sąnaudos (85/45 ºC), $MWh_{el}$/metus | Pagaminamas energijos kiekis, MWh/metus |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nuotekos (20˚C/15 ˚C) | 4,0 | 3,0 | 3,6 | 621 | 870 | 5368 |
| Gruntas (12˚C/7 ˚C) | 3,3 | 2,8 | 3,1 | 769 | 1077 | 5723 |
| Oras (15˚C/0 ˚C) | 3,5 | 2,3 | 3,0 | 808 | 1131 | 5815 |

Nemažą dalį elektros sąnaudų sudaro cirkuliaciniai siurbliai, todėl skaičiuojama jų galia ir sunaudojama elektros energija.

$$P_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (26)$$

čia: $P_{el}$ – siurblio elektrinė galia, W;

ρ – vandens tankis – 1000 kg/m$^3$;

g – laisvojo kritimo pagreitis, 9,81 m/s$^2$;

Q – debitas, m$^3$/s;

H – siurblio kėlimo aukštis, m;

η – bendras siurblio ir variklio naudingumo koeficientas.

**10 lentelė.** Cirkuliacinių siurblių galia

| Parametras | Cirkuliacinis siurblys į šilumos tiekimo tinklus | Išvalytų nuotekų cirkuliacinis siurblys |
|---|---|---|
| Vandens debitas, m$^3$/h | 9 | 50 |
| Tiekiamojo vandens slėgis, bar | 10 | 5 |
| Grįžtamojo vandens slėgis, bar | 4 | 3,5 |
| Siurblio sudaromas slėgis, m. v. st. | 60 | 15 |
| Bendras siurblio efektyvumas, proc. | 80 | 67 |
| Siurblio elektrinė galia, kW | 1,85 | 3,00 |

Šilumos tiekimo tinklų vamzdyno diametras parenkamas pagal apskaičiuotą tinklo vandens debitą ir leistiną vandens tekėjimo greitį vamzdyne. Pirmiausia apskaičiuojamas reikalingas vamzdžio skerspjūvio plotas, o pagal jį – vidinis vamzdžio skersmuo. Gautas teorinis skersmuo suapvalinamas iki artimiausio didesnio standartinio nominalaus diametro DN.

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{27}$$

$$A = \frac{Q}{v} \tag{28}$$

čia: Q – debitas, $m^3/s$;

v – termofikato greitis, m/s;

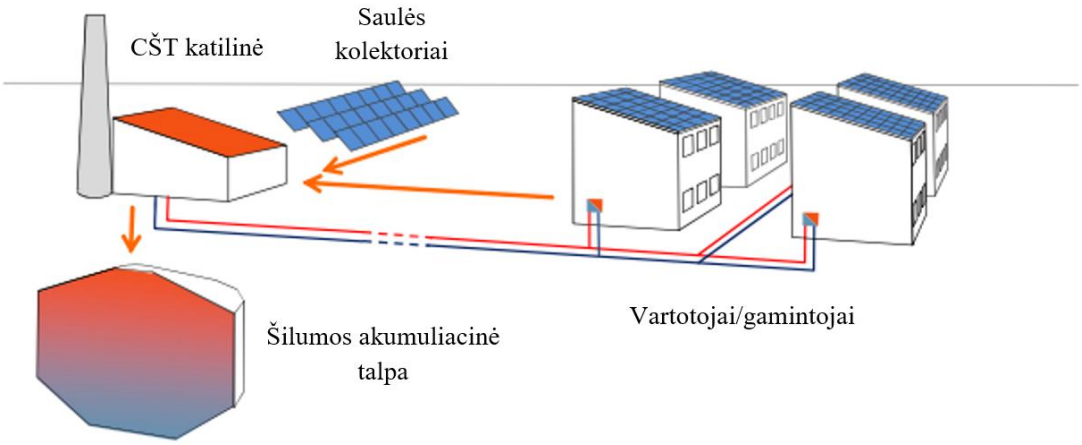
A – vamzdžio skerspjūvio plotas, $m^2$;

D – vidinis vamzdžio diametras, m.

Parenkamas reikalingas DN150 diametro vamzdynas, toks diametras užtikrina šilumos kiekio perdavimą. Nuo vandenvalos vietos iki šilumos tiekimo tinklų sistemos reikalinga suprojektuoti 3,1 km tinklo. Reikalaujamas pastato plotas šilumos siurbliui 30 $m^2/MW_{šil}$, reikalaujamas pastato tūris – 90 $m^3/MW_{šil}$. Parenkamas šilumos siurblio pastato plotas – 18 $m^2$, parenkamas šilumos siurblio pastato tūris – 55 $m^3$.

### 3.3. Akumuliacinės talpos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus

Kadangi saulės energijos generacija yra nepastovi ir stipriai priklauso nuo meteorologinių sąlygų bei paros ir sezono ciklų, šilumos kaupimas leidžia suderinti energijos gamybą su vartojimu. Akumuliacinė talpa naudojama saulės kolektorių pagamintai šiluminei energijai balansuoti ir kaupti, kadangi didžiausia energijos generacija vyksta dienos metu, o poreikio tenkinimas reikalingas visą parą. Taip pat akumuliacinė talpa leidžia sukaupti perteklinę šilumos energiją ir ją panaudoti vėlesniu laikotarpiu, kai šilumos poreikis viršija momentinę generaciją. Kaip alternatyvus sprendimas gali būti svarstomas vėjo jėgainėse pagamintos elektros energijos panaudojimas arba perteklinės elektros energijos konversija į šiluminę energiją, elektriniais kaitinimo elementais šildant akumuliacinėje talpoje esantį vandenį.




**20 pav.** Šilumos akumuliacinės talpos ir saulės kolektorių sistemos principinė schema [33]

Pirmiausia atliekamos saulės kolektorių pagamintos energijos balanso įvertinimas ir perteklinės energijos kaupimo akumuliacinėje talpoje analizės. Didžiausios generacijos laikotarpiu, šilčiausią vasaros mėnesį, per parą pagaminama apie 30 MWh šiluminės energijos, esant 40 – 70 °C temperatūros režimui. Skaičiavimuose vertinama ne visa saulės kolektorių pagaminta šiluminė energija, o tik ta jos dalis, kuri tam tikru laikotarpiu viršija momentinį CŠT šilumos poreikį. Pirmiausia pagaminta šiluma naudojama tiesioginiam vartotojų poreikiui padengti, o perteklinė energija nukreipiama į akumuliacinę talpą. Sukaupta šiluma vėliau gali būti panaudojama tos pačios dienos eigoje, kai saulės generacija sumažėja, arba paliekama kitai dienai, jeigu saulės energijos gamyba yra nepakankama.

Skaičiuojamas debitas:

$$Q = \frac{V}{t} \tag{29}$$

čia: Q – debitas, $m^3/h$;

V – tūris, $m^3$;

t – laikas, per kurį prateka tūris, h.

Per parą saulėčiausią vasaros mėnesį 45 – 60 °C temperatūros pakėlimo scenarijaus atveju saulės kolektoriais pagaminama apie 12,5 MWh šiluminės energijos. Dalis šios energijos sunaudojama tiesiogiai CŠT šilumos poreikiui tenkinti, o perteklinė dalis kaupiama akumuliacinėje talpoje. Reikalingas akumuliacinės talpos tūris nustatomas remiantis sukaupiamos šilumos kiekio priklausomybe nuo vandens tūrio ir temperatūrų skirtumo. Talpos geometriniai matmenys apskaičiuojami pasirenkant cilindrinės formos talpą. Šiame darbe daroma prielaida, kad cilindrinės talpos spindulio ir aukščio santykis yra lygus 1, talpos aukštis laikomas lygiu jos spinduliui. Toks santykis laikomas racionaliu, nes leidžia užtikrinti kompaktišką konstrukciją, patogų talpos išdėstymą ir priimtinus šilumos nuostolius.

Cilindrinės talpos tūris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \tag{30}$$

čia: V – tūris;

r – pagrindo spindulys;

h – aukštis.

Atsižvelgiant į nagrinėjamus temperatūrų pakėlimo scenarijus, buvo apskaičiuoti skirtingi akumuliacinių talpų tūrio variantai – tiek dienos poreikio balansavimui, tiek perteklinės šiluminės energijos kaupimui. Gauti rezultatai pateikiami 13 lentelėje. Lentelėje pateikti akumuliacinių talpų tūrio variantai apskaičiuoti ne visai pagamintai šiluminei energijai sukaupti, o perteklinės energijos kaupimui ir paros šilumos poreikio balansavimui.

**11 lentelė.** Akumuliacinių talpų tūrio variantai

| Scenarijus | Talpos tūris, $m^3$ | Talpos pagrindo spindulys, m | Talpos aukštis, m | Debitas, $m^3/h$ | Šilumos nuostoliai, MWh/metus |
|---|---|---|---|---|---|
| 40 °C – 70 °C scenarijaus balansavimas | 862 | 6,5 | 6,5 | 72 | 30,2 |
| 45 °C – 60 °C scenarijaus balansavimas | 718 | 6,1 | 6,1 | 60 | 26,6 |
| Vėjo perteklinės energijos panaudojimas | 287 | 4,5 | 4,5 | 24 | 14,5 |

Sezoniniam saulės šilumos kaupimui reikėtų atlikti metinį valandinį arba paros energijos balanso skaičiavimą, įvertinant tiesiogiai panaudojamą saulės šilumą, perteklinės šilumos kaupimą, šilumos paėmimą iš talpos ir šilumos nuostolius. Tokios talpos tūris būtų ženkliai didesnis nei paros balansavimo talpos ir galėtų siekti nuo kelių iki kelių dešimčių tūkstančių kubinių metrų, priklausomai nuo pasirinkto temperatūrinio režimo ir norimos sezoninio padengimo dalies.

Vėjo jėgainės pagaminta elektros energija pirmiausia naudojama tiesioginiam CŠT elektros energijos poreikiui padengti. Tais laikotarpiais, kai vėjo jėgainės gamyba viršija momentinį elektros energijos poreikį, susidaro perteklinė elektros energija. Ši perteklinė energija gali būti panaudojama šilumos gamybai elektrodiniame katile ir nukreipiama į akumuliacinę talpą. Skaičiavimuose priimama, kad elektrodinio katilo naudingo veikimo koeficientas yra 0,95. Taip pat įvertinami apie 2 % šilumos nuostoliai akumuliavimo metu. Todėl naudinguoju šilumos kiekiu laikoma ne visa perteklinė elektros energija, o tik ta jos dalis, kuri po konversijos elektrodiniame katile ir akumuliavimo nuostolių gali būti panaudojama CŠT sistemoje. Kadangi vėjo energijos gamyba pasižymi kelių dienų trukmės svyravimais, akumuliacinės talpos tūris vertinamas ne pagal vienos paros, o pagal kelių parų perteklinės energijos kiekį. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad didžiausias 3 parų perteklinės elektros energijos kiekis sudaro apie 3 MWh, o didžiausias 7 parų perteklinės elektros energijos kiekis – apie 5 MWh. Perteklinė vėjo jėgainės elektros energija gali būti nukreipiama į tą pačią akumuliacinę talpą, kuri numatyta saulės kolektorių perteklinės šilumos kaupimui. Tokiu atveju akumuliacinė talpa veikia kaip bendra trumpalaikio balansavimo priemonė, leidžianti kaupti saulės kolektorių pagamintos šilumos perteklių ir perteklinės vėjo elektros energijos pagamintą šilumą. Siekiant įvertinti galimą saulės ir vėjo energijos pertekliaus sutapimą, prie saulės kolektorių šilumos pertekliaus kaupimui parinktos talpos papildomai turėtų būti pridedamas vėjo energijos kaupimui reikalingas rezervinis tūris.

Skaičiuojami talpyklos šilumos metiniai nuostoliai:

$$Q_{nusotoliai} = U \cdot A \cdot \left(T_{vidut} - T_{aplink}\right) \cdot t \quad (31)$$

čia: $Q_{nuostoliai}$ – šilumos nuostoliai, Wh/metus;

U – šilumos perdavimo koeficientas, $W/m^2K$;

A – talpyklos paviršiaus plotas, $m^2$;

$T_{vidut}$ – vidutinė talpyklos temperatūra, °C;

$T_{aplink}$ – vidutinė aplinkos temperatūra, °C;

t – metinės valandos.

### 3.4. Vėjo energijos integravimas į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus

Alternatyvus būdas atsinaujinančių šaltinių integravimui į centralizuotus šilumos tiekimo tinklus būtų vėjo energija pagamintos elektros tiesioginis panaudojimas savosioms sąnaudoms (cirkuliaciniams siurbliams, katilinėje esantiems elektros įrenginiams, apšvietimui ir pan.) ir/ arba perteklinės vėjo energijos konversija į šilumos energiją talpoje su elektriniu katilu. Vidutinis vėjo greitis randamas remiantis Biržų meteorologijos stoties 2024 m. duomenimis. Vėjo greičiai buvo fiksuojami kiekvieną mėnesio dieną, kiekvieną valandą. Tokiu būdu surinkti duomenys ir sudaryti mėnesiniai vidurkiai bei bendras metinis vidurkis, kuris naudojamas tolimesniuose inžineriniuose skaičiavimuose.

**12 lentelė.** Vidutiniai vėjo greičiai Biržuose 2024 m.

| Mėnuo | Sausis | Vasaris | Kovas | Balandis | Gegužė | Birželis | Liepa | Rugpjūtis | Rugsėjis | Spalis | Lapkritis | Gruodis | Vidurkis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vidutinis vėjo greitis, m/s | 2,9 | 3 | 2,8 | 2,7 | 2,1 | 1,9 | 2,1 | 1,9 | 1,9 | 2,1 | 2,8 | 2,9 | 2,4 |

2024 m. empyriniai vidutinio vėjo greičio duomenys yra neženkliai mažesni už STR 2.01.12:2024 „Statybų klimatologija“ [34] pateikiamus 1991 – 2020 m. pateikiamus vidutinius vėjo greičius. Skaičiavimams priimami pastarųjų metų duomenys, kurie reprezentuoja blogesnio scenarijaus atvejį.

Vėjo greitis Biržų meteorologijos stotyje buvo fiksuojamas 10 m aukštyje, dėl šios priežasties reikalinga persiskaičiuoti vėjo greitį reikiamame vėjo jėgainės darbiniame aukštyje.

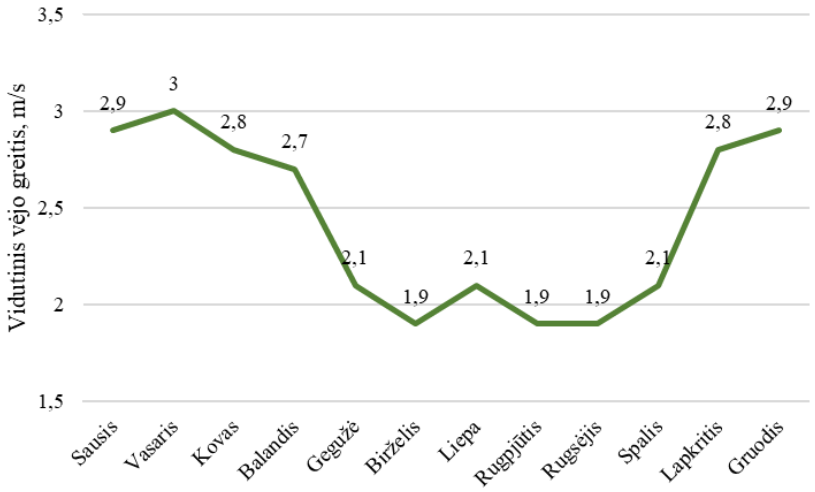
Apytikslis vėjo greičio didėjimas keičiantis aukščiui išreiškiamas matematine priklausomybe:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n \tag{32}$$

čia: $v_1$ – išmatuotas vėjo greitis aukštyje $h_1$, m/s;

$v_2$ – apskaičiuotas vėjo greitis aukštyje $h_2$, m/s;

n – koeficientas, kuris priklauso nuo žemės paviršiaus tipo, šiame tyrime priimamas pagal reljefą – 0,16.




**21 pav.** Mėnesinis vidutinis vėjo greitis (10 m aukštyje)

Vėjo (judančios oro masės) kinetinė energija pagal antrąjį Niutono dėsnį arba galia išreiškiama priklausomybe:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (33)$$

čia: ρ – oro tankis, kg/m$^3$;

A – oro srauto skerspjūvis, m$^2$;

v – oro masės judėjimo (vėjo) greitis, m/s.

Metinė vėjo elektros energijos generacija skaičiuojama pagal formulę:

$$E = P \cdot CF \cdot 8760 \quad (34)$$

čia: E – metinė elektros gamyba, MWh;

P – vėjo jėgainės nominali galia, MW;

CF – pajėgumo koeficientas (angl. Capacity factor, dažniausiai 0,25 – 0,35 Lietuvoje), šiame tyrime priimamas 0,25 koeficientas;

8 760 – valandų skaičius per metus.

Tikslesniam išteklių įvertinimui minėtų duomenų nepakanka, kadangi vėjo energijos potencialo priklausomybė nuo vėjo greičio išreiškiama kubine laipsnio funkcija, todėl turi būti žinoma kiekvieno vėjo greičio m/s pasirodymo tikimybė metuose. Tikimybinis vėjo greičio pasiskirstymas geriausiai atitinka Veibulo pasiskirstymą (Weibull distribution). Pagal Weibull'ą, vėjo greičio tikimybės pasiskirstymo tankis f(v) gali būti išreikštas tokiu būdu:

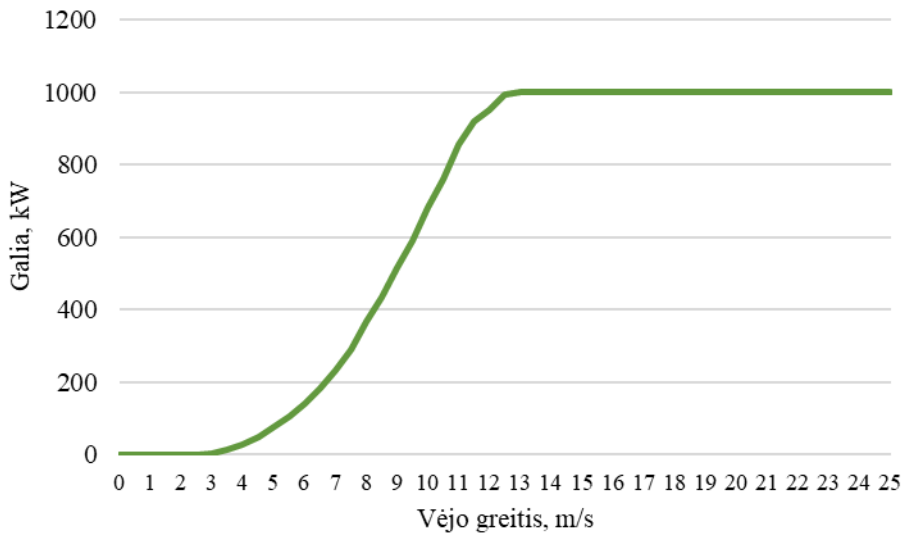
$$f(v) = \frac{K}{\alpha^K} \cdot v^{K-1} \cdot e^{-(v/\alpha)^K} \quad (35)$$

čia: α ir K – Weibull'o pasiskirstymo parametrai. Parametrai priklauso nuo vietovės geografinių charakteristikų ir nuo vėjaračio veleno aukščio virš žemės paviršiaus.

Vėjas labai dažnai keičia savo greitį ir kryptį. Taigi, vėjo greitis ir energija yra laiko funkcijos. Vėjo energija apskaičiuojama tiksliau remiantis atsitiktine vėjo stacionaria funkcija.

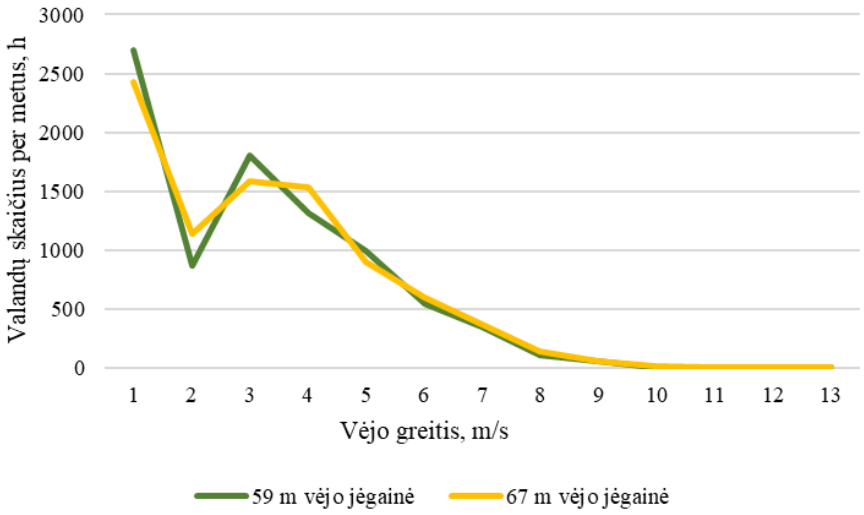
$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f(v) \cdot v^3 \quad (36)$$

Pasirenkama 1 MW horizontalios ašies vėjo jėgainė. Pagal galios grafiką ir atitinkamą vėjo greitį kiekvienai valandai metų laikotarpyje apskaičiuojama galima vėjo jėgainės elektros energijos gamyba. Skaičiuojami du variantai su 67 metrų ir 59 metrų bokšto aukščiais.



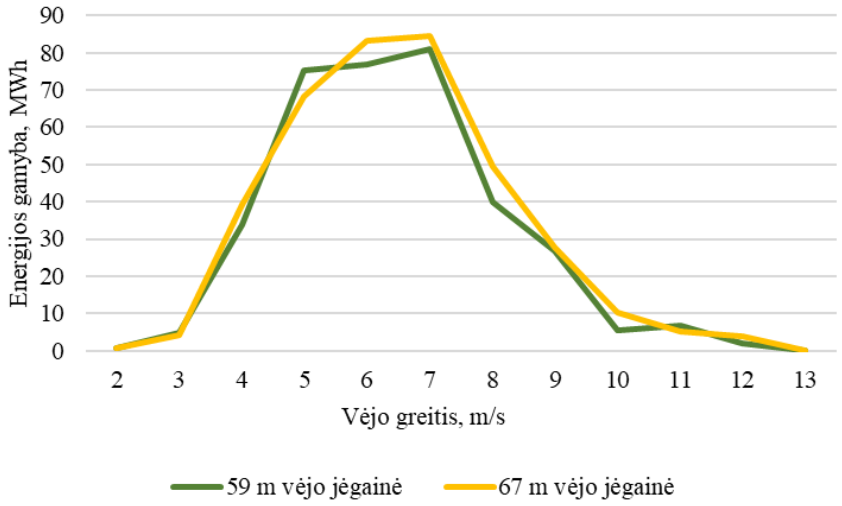

**22 pav.** Vėjo jėgainės elektrinės galios priklausomybė vėjo greičio [35]

21 pav. pateikiamas vėjo greičio pasiskirstymo palyginimas dviejuose skirtinguose vėjo elektrinės bokšto aukščiuose – 59 m ir 67 m. Iš grafiko matyti, kad abiejuose aukščiuose vėjo greitis pasiskirsto pagal panašią dinamiką – daugiausia valandų per metus vyrauja žemo bei vidutinio vėjo greičio intervalai (2 – 7 m/s), o esant didesniems greičiams laiko dalis ženkliai mažėja. Tai yra būdingas vidutinio klimato zonų vėjo režimo bruožas. Vis dėlto aiškiai matyti, kad 67 m aukštyje fiksuojama šiek tiek daugiau valandų su didesniu vėjo greičiu, ypač 3 – 6 m/s intervale, kuris yra statistiškai reikšmingiausias vėjo elektrinės darbui. Šiame intervale nedidelis vėjo greičio padidėjimas gali lemti disproporcingai didesnę energijos gamybą, nes vėjo elektrinės efektyvumas šiame ruože yra didžiausias. Šis skirtumas tarp aukščių kyla dėl logaritminės vėjo profilio priklausomybės nuo aukščio, kai mažėjant paviršiaus šiurkštumui ar didėjant matavimo taško aukščiui vėjas tampa tolygesnis ir stipresnis. Tai ypač pastebima lygumų ar atvirų teritorijų vietovėse, kur turbulencijos lygis išlieka santykinai mažas. Analizuojant rezultatus galima teigti, kad nors skirtumas tarp 59 m ir 67 m nėra didelis, tačiau jis yra pakankamas, kad sukeltų matomą pagerėjimą vėjo greičio vidurkiuose ir vėjo greičių pasiskirstyme. Tai yra svarbu projektavimo proceso metu, nes vėjo elektrinės bokšto aukštis tiesiogiai daro įtaką metinei energijos gamybai ir gali padidinti jos ekonominį efektyvumą bei sumažinti energijos savikainą. Todėl galima teigti, kad aukštesnio bokšto pasirinkimas yra pagrįstas šioje vietovėje, nes jis sudaro palankesnes sąlygas didesniam vėjo energijos potencialui panaudoti.




**23 pav.** Vėjo greičio skirtinguose aukščiuose pasiskirstymo palyginimas

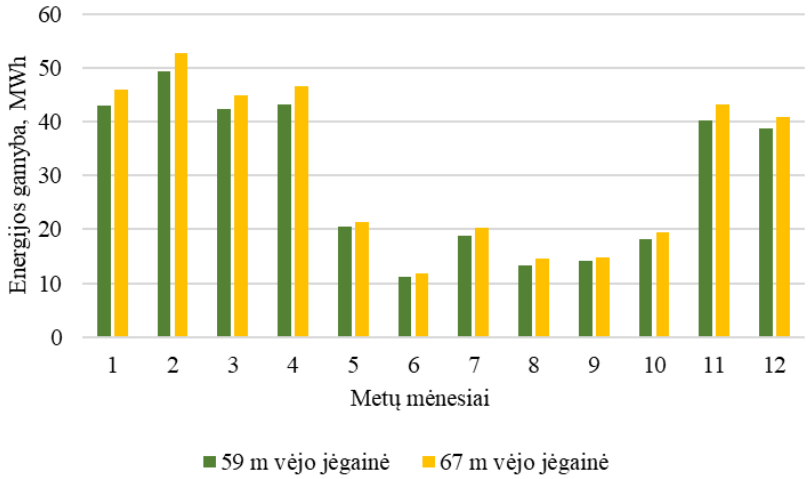
22 pav. pateikiamas vėjo elektrinės energijos gamybos palyginimas dviejuose skirtinguose jėgainės bokšto aukščiuose, esant skirtingiems vėjo greičiams. Diagramoje aiškiai matyti, kad 59 m ir 67 m aukščiuose energijos gamyba didėja kartu su vėjo greičiu iki maždaug 6 – 7 m/s, kur pasiekiamos maksimalios metinės generacijos vertės. Šis intervalas atitinka didžiausio turbinos aerodinaminio efektyvumo zoną, kurioje vėjo elektrinė generuoja didžiausią naudingąjį energijos kiekį. Aukštesniame – 67 m aukštyje energijos gamybos kreivė didesnė didžiojoje dalyje greičio diapazono, ypač 5 – 8 m/s srityje. Tai rodo, kad aukštesniame lygyje vėjo greitis dažniau pasiekia vertes, priartėjančias prie optimalios vėjo elektrinės darbinės zonos, o tai lemia aukštesnę metinę energijos gamybą. Skirtumai matyti ir mažėjant vėjui – esant žemesniems greičiams (2 – 4 m/s), 67 m aukštyje vis tiek fiksuojama kiek didesnė energijos gamyba nei 59 m, kas rodo, kad net esant silpnesniam vėjui aukštesnis bokštas pasižymi geresnėmis aerodinaminėmis sąlygomis. Didėjant vėjo greičiui virš 9 m/s, energijos gamyba abiejuose aukščiuose palaipsniui mažėja, o esant dar didesniems greičiams (10 – 13 m/s), generacija tampa labai maža dėl to, kad tokie greičiai pasitaiko retai. Tai atitinka natūralų vietovės vėjo režimą, kuriame ekstremalūs greičiai sudaro labai nedidelę metų dalį. Analizuojant gautus rezultatus galima teigti, kad 67 m bokšto aukštis turi aiškų pranašumą energijos gamybos atžvilgiu. Nors skirtumas tarp aukščių yra tik 8 metrai, tačiau tai lemia įžvelgiamai geresnį vėjo greičio potencialą, ypač vidutinio greičio zonoje. Šie rezultatai turi tiesioginę reikšmę projektavimui – didesnio aukščio bokštas leidžia efektyviau išnaudoti vėjo energijos išteklius, sumažinti energijos gamybos savikainą ir padidinti vėjo elektrinės ekonominį efektyvumą. Taip pat toks rezultatas atitinka analizuotoje literatūroje ir atliktuose tyrimuose aprašytas tendencijas, jog didėjant aukščiui vėjo greitis didėja logaritmiškai, todėl energijos gamyba gali padidėti 3 – 12 % priklausomai nuo vietos ir turbulencijos sąlygų [36–39].




**24 pav.** Energijos gamybos pagal vėjo greitį skirtinguose aukščiuose palyginimas

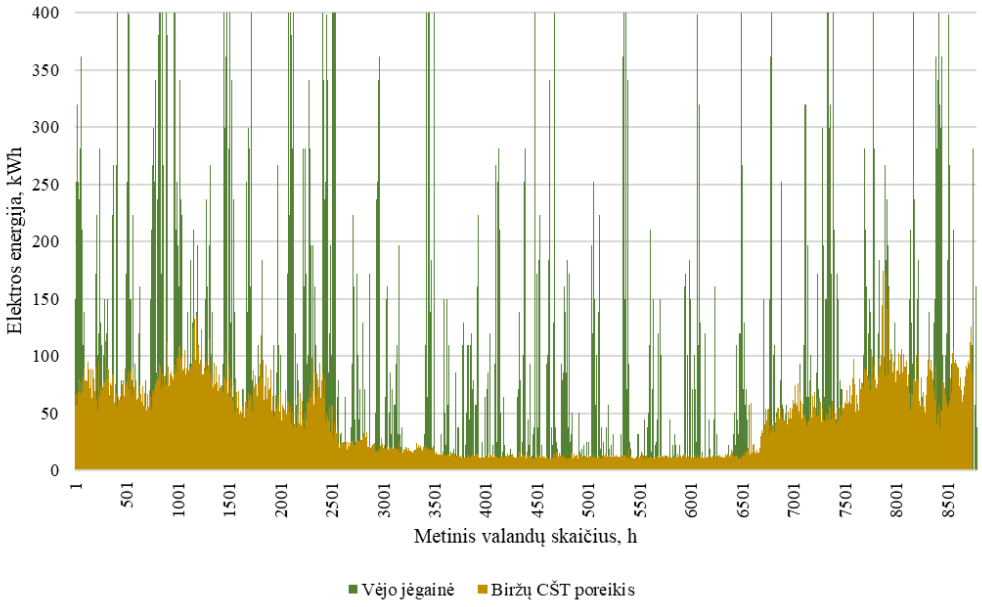
23 pav. pateikiamas mėnesinės energijos gamybos dviejuose skirtinguose vėjo elektrinės bokšto aukščiuose – 59 m ir 67 m palyginimas. Iš diagramos matyti aiški sezoniškumo dinamika: didžiausia energijos gamyba užfiksuota žiemos sezono mėnesiais (sausio – kovo bei spalio – lapkričio laikotarpiu), kai vėjo greičiai yra didžiausi. Šaltuoju metų laiku vyraujant stipresniems ir pastovesniems vakarų bei pietvakarių vėjams, vėjo elektrinė generuoja didžiausią energijos kiekį. Tuo tarpu vasaros mėnesiais (birželį – rugpjūtį) gamybos apimtys sumažėja daugiau nei dvigubai, kas rodo tipinę Lietuvos klimatinę vėjo resursų struktūrą. Lyginant energijos gamybą tarp 59 m ir 67 m aukščio, akivaizdu, kad aukštesniame bokšto lygyje generacija visuose metų mėnesiuose yra didesnė. Didžiausias skirtumas stebimas žiemos ir ankstyvo pavasario laikotarpiu, kai vidutiniai vėjo greičiai

yra aukštesni ir net nedidelis papildomas vėjo greičio padidėjimas 67 m aukštyje sukuria disproporcingai didesnę gamybą. Tai susiję su tuo, kad vėjo elektrinės efektyvumas yra jautriausias vidutinio greičio ruože (5 – 8 m/s), kuriame palyginti nedidelis greičio padidėjimas lemia itin didelį metinės generacijos augimą. Vasaros mėnesiais, kai vėjas silpnesnis ir labiau nepastovus, skirtumas tarp dviejų aukščių išlieka, tačiau procentiškai yra šiek tiek mažesnis. Tai rodo, kad aukštesnio bokšto privalumai išryškėja vėjuotu laikotarpiu, kai vėjo profilio augimas su aukščiu tampa statistiškai reikšmingas. Šie rezultatai patvirtina, kad 67 m aukščio bokštas yra energetiškai pranašesnis ir lemia pastebimai didesnę metinę gamybą. Tai ypač svarbu vėjo jėgainių projektavimo procese, nes sezoniškumo analizė leidžia įvertinti ne tik bendrą metinį potencialą, bet ir elektros tiekimo patikimumą bei gamybos struktūrą skirtingais metų laikais.




**25 pav.** Mėnesinės energijos gamybos skirtinguose aukščiuose palyginimas

Planuojama statinio teritorija patenka į Biržų aerodromo apsaugos zoną (zona „D“), todėl sklypuose ribojamas statinių aukštis, kuris turi neviršyti 122 m. Apsaugos zonos nustatomos pagal specialiųjų žemės naudojimo sąlygų aerodromo apsaugos zonas III skyriaus pirmą skirsnį [40]. Todėl pasirenkamas vėjo jėgainės aukštis atitinkantis reikalavimus – 59 m. Taip pat planuojamas statinys priskiriamas ypatingųjų statinių grupei ir patenka į Šiaurės Lietuvos karstinį rajoną, todėl privaloma atlikti inžinerinius geologinius, geotechninius tyrimus [41, 42].




**26 pav.** Biržų CŠT elektros poreikio padengimas 59 m aukščio vėjo jėgaine

Pasirenkama 59 m aukščio vėjo jėgainė, kadangi jos metinė elektros energijos gamyba yra artima metiniam CŠT elektros energijos poreikiui. Nors metinis pagaminamos elektros energijos kiekis yra pakankamas metiniam poreikiui padengti, vėjo energijos gamyba yra nepastovi ir ne visada sutampa su elektros energijos vartojimo grafiku. Dėl šios priežasties tiesiogiai panaudojama energijos dalis sudaro 40,4 proc. metinio CŠT elektros energijos poreikio. Likusi vėjo jėgainės pagaminta elektros energijos dalis sudaro perteklių, kuris gali būti perduodamas į elektros tinklą, kaupiamas elektros baterijose arba, naudojant elektrinius tenus, verčiama šiluma ir kaupiamas akumuliacinėje talpoje, taip iš dalies mažinant šilumos gamybos poreikį CŠT sistemoje.

**13 lentelė.** 59 m aukščio vėjo jėgainės pagamintos elektros energijos panaudojimo rodikliai

| Rodiklis | Reikšmė |
|---|---|
| Metinis CŠT elektros energijos poreikis | 332 654 kWh |
| Metinė vėjo jėgainės elektros energijos gamyba | 343 044 kWh |
| Tiesiogiai padengtas CŠT elektros energijos poreikis | 134 367 kWh |
| Tiesioginio padengimo dalis | 40,4 % |
| Perteklinė elektros energija | 208 677 kWh |

## 4. Ekonominė analizė

Ekonominis vertinimas atliekamas siekiant nustatyti, ar atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklą yra pagrįsta ne tik energetiniu, bet ir ekonominiu požiūriu. Ekonominis atsinaujinančių energijos šaltinių integracijos į centralizuoto šilumos tiekimo tinklą vertinimas atliekamas lyginant modeliuojamus scenarijus su baziniu šilumos gamybos variantu. Vertinamos pradinės investicijos, metinės eksploatacinės sąnaudos, kuro sąnaudų pokytis, elektros energijos poreikis, galimas $CO_2$ emisijų sumažėjimas bei pagamintos šilumos kiekis. Ekonominiam efektyvumui įvertinti apskaičiuojamas atsipirkimo laikas ir šilumos gamybos savikaina. Ekonominei analizei atlikti taikomos 2025 m. vidutinės kuro ir elektros energijos kainos. Medienos biokuro ir granulių kainos apskaičiuotos pagal „Baltpool“ energijos išteklių biržoje skelbiamus 2025 m. biokuro kainų duomenis, o gamtinių dujų ir elektros energijos technologinėms reikmėms kainos priimtos pagal VERT skelbiamomis 2025 m. vidutinėmis reikšmėmis. Skaičiavimuose priimama vidutinė biokuro kaina – 20,82 Eur/MWh, granulių kaina – 37,11 Eur/MWh, gamtinių dujų kaina – 52,12 Eur/MWh, elektros kaina – 0,20 Eur/kWh [43, 44].

Išlaidos kurui per metus:

$$Išlaidos\ kurui = kuro\ sąnaudos \cdot kuro\ kaina \quad (37)$$

Išlaidos elektrai per metus:

$$Išlaidos\ elektrai = (vidutinė\ metų\ \ elektros\ energijos\ kaina + elektros\ perdavimo\ paslaugos + papildoma\ dedamoji\ prie\ perdavimo\ paslaugos + skirstymo\ vidutinės\ įtampos\ tinklais\ kaina) \cdot elektros\ sąnaudos \quad (38)$$

Priimame, kad katilinėje biokuro peleningumas yra 2 % pagal vartojamo kuro tipą. Išlaidos pelenų šalinimui:

$$Išlaidos\ pelenų\ utilizavimui = pelenų\ kiekis \cdot pelenų\ šalinimo\ kaina \quad (39)$$

Išlaidos ATL (apyvartinis taršos leidimas):

$$Išlaidos\ ATL = Išmetamų\ ŠESD\ kiekis \cdot ATL\ kaina \quad (40)$$

Eksploatavimo ir aptarnavimo sąnaudos:

$$Eksploatavimo\ ir\ aptarnavimo\ išlaidos = pastoviosios\ eksploatavimo\ ir\ aptarnavimo\ sąnaudos + kintamosios\ eksploatavimo\ ir\ aptarnavimo\ sąnaudos \quad (41)$$

Kapitalo investicijos grąža nuo likutinės turto vertės per metus [45]:

$$Investicijos\ grąža = (investiciniai\ kaštai - investicinis\ nusidėvėjimas) \cdot WACC \quad (42)$$

Investicinis nusidėvėjimas:

$$Investicinis\ nusidėvėjimas = \left(investicija - \left(\frac{investicija}{buhalterinio\ nusidėvėjimo\ laikotarpis}\right)\right) \quad (43)$$

Analogiškai paskaičiuojama grąža per likusius nusidėvėjimo metus.

Suminės metinės sąnaudos:

*Suminės metinės sąnaudos = investicinis nusidėvėjimas + kapitalo investicijos grąža + pastoviosios sąnaudos + kintamosios sąnaudos* (44)

**14 lentelė.** Biržų šilumos tinklų metinės sąnaudos [46]

| Sąnaudos | Paslaugos | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Šilumos tiekimas | | | Karšto vandens tiekimas |
| | Šilumos gamyba | Šilumos perdavimas | Mažmeninis aptarnavimas | |
| Kuro sąnaudos, Eur | 765 655 | - | - | - |
| Elektros energijos sąnaudos, Eur | 48 863 | 13 890 | - | - |
| Vandens technologinėms reikmėms sąnaudos, Eur | 556 | 387 | - | 11748 |
| Kitos kintamos sąnaudos, Eur | 12 075 | - | - | - |
| Nusidėvėjimo (amortizacijos) sąnaudos, Eur | 118 889 | 110 612 | - | 363 |
| Einamojo remonto ir aptarnavimo sąnaudos, Eur | 134 207 | 73 781 | 2 287 | 2 659 |
| Personalo sąnaudos, Eur | 379 783 | 320 535 | 32 122 | 907 |
| Mokesčių sąnaudos, Eur | 11 217 | 66 120 | 154 | 15 |
| Administracinės sąnaudos, Eur | 22 567 | 20 167 | 1 700 | 154 |
| Rinkodaros ir pardavimų sąnaudos, Eur | 596 | 522 | 9 085 | 469 |
| Kitos pastoviosios sąnaudos, Eur | 13 658 | 10 746 | 1 414 | 81 |
| Viso: | 1 500 060 | 616 753 | 46 760 | 16 395 |

Išanalizavus esamos sistemos metines sąnaudas, vertinami saulės kolektorių ir akumuliacinės talpos investiciniai kaštai bei atsiperkamumas. Tiksli investicija turėtų būti nustatoma pagal komercinius pasiūlymus, tačiau preliminariai ji gali būti vertinama pagal technologinių katalogų arba analogiškų CŠT saulės šilumos projektų duomenis.

Saulės kolektorių sistemos investicinės sąnaudos buvo vertinamos pagal Valančius ir kt. [47] pateiktą priklausomybę, kurioje specifinė investicinė kaina mažėja didėjant kolektorių plotui. Formulėje x – kolektorių plotas, $m^2$, y – investicinė kaina, Eur/$m^2$.

$$y = 740{,}07 \cdot x^{-0{,}14} \quad (45)$$

Pastoviosios ir kintamosios eksploatacinės sąnaudos priimtos pagal danų energetikos agentūros technologinių duomenų katalogą [32], pastoviosios – 0,09 €/MWh/metus/metus, kintamosios – 0,21 €/MWh/metus/metus. Skaičiavimuose įvertinama cirkuliacinių siurblių suvartojama elektros energija per metus.

Kuro sutaupymo vertė skaičiuojama pagal formulę:

$$S_{kuras} = \frac{Q}{\eta_{katilo}} \cdot c_{kuro} \quad (46)$$

čia: $S_{kuras}$ – sutaupomo kuro sąnaudos, Eur/metus;

Q – alternatyvia atsinaujinančios energijos technologija pagaminamas šilumos kiekis, MWh/metus;

$\eta_{katilo}$ – katilo naudingumo koeficientas;

$c_{kuro}$ – kuro kaina, Eur/MWh.

Ekonominiam saulės kolektorių ir akumuliacinių talpų sistemos vertinimui buvo apskaičiuotos pradinės investicinės sąnaudos, metinės eksploatacinės sąnaudos ir galimi kuro sąnaudų sutaupymai. Saulės kolektorių investicinės sąnaudos vertintos pagal kolektorių ploto priklausomybę nuo sistemos mastelio, kai didesnėms sistemoms taikoma mažesnė specifinė įrengimo kaina. Akumuliacinės talpos investicijos apskaičiuotos pagal reikalingą talpos tūrį ir pasirinktą specifinę įrengimo kainą, Eur/$m^3$ [32]. Papildomoms sistemos dalims, įskaitant vamzdynus, siurblius, šilumokaičius, automatiką, projektavimo ir montavimo darbus, taikytas procentinis priedas nuo pagrindinės įrangos kainos. Metiniai ekonominiai sutaupymai įvertinti pagal saulės kolektoriais pagamintos naudingos šilumos kiekį, kuris pakeičia katilinėje gaminamą šilumą iš kuro. Sutaupytos kuro sąnaudos apskaičiuotos atsižvelgiant į katilo naudingumo koeficientą ir kuro kainą. Iš bendrų sutaupymų atimtos papildomos eksploatacinės ir elektros energijos sąnaudos, reikalingos siurblių bei pagalbinės įrangos darbui. Sistemos ekonominis efektyvumas įvertintas pagal atsipirkimo laiką. Investicinio nusidėvėjimo skaičiavimui taikomas 16 metų laikotarpis, atitinkantis pasirinktą technologinės įrangos nusidėvėjimo prielaidą. Tačiau vidutinė energijos gamybos savikaina papildomai įvertinama per 20 metų analizės laikotarpį, siekiant parodyti ilgesnio projekto eksploatavimo įtaką energijos vieneto kainai.

**15 lentelė.** Saulės terminių kolektorių ekonominiai rodikliai [32]

| Scenarijus | 40 °C – 70 °C | 45 °C – 60 °C |
|---|---|---|
| Nusidėvėjimo laikas, metai | 16 | 16 |
| Investicijos į saulės kolektorius, Eur<br>Iš kurių investicijos į įrangą, Eur<br>Iš kurių investicijos į montavimą, Eur | 2 225 747<br>1 891 885<br>333 862 | 957 732<br>814 072<br>143 660 |
| Investicijos į akumuliacinę talpą, Eur | 129 300 | 107 770 |
| Pastoviosios eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus | 22657 | 9736 |
| Kintamos eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus | 5032 | 2369 |
| Investicinis nusidėvėjimas, Eur/metus | 147 190 | 66 589 |
| Investicijos grąža, Eur (pirmaisiais metais) | 110 393 | 49 942 |
| Suminės metinės sąnaudos, Eur/metus | 285 273 | 128 636 |
| Metinis kuro sąnaudų sutaupymas, Eur | 172 560 | 67 346 |
| Atsipirkimo laikas, metai | 14 | 16 |
| Atsipirkimas su 25 % parama, metai | 10 | 12 |
| Vidutinė šilumos gamybos savikaina, Eur/MWh | 51,8 | 58,8 |

Gauti rezultatai rodo, kad saulės kolektorių integracijos ekonominis patrauklumas labai priklauso nuo kuro, kurį pakeičia saulės šiluma, kainos. Lyginant su biokuru, atsipirkimo laikas yra ilgesnis dėl santykinai mažos biokuro kainos, lyginant su granuliniu kuru atsipirkimas gaunamas patrauklesnis. Tačiau, saulės kolektorių sistema mažina kuro poreikį, eksploatacines sąnaudas, priklausomybę nuo

kuro kainų svyravimo ir gali prisidėti prie šilumos gamybos dekarbonizacijos. Taikant investicinę paramą, sistemos atsipirkimo laikas reikšmingai sutrumpėja.

Šilumos siurblių ekonominis vertinimas atliktas skaičiuojant pradinę investiciją, metines elektros energijos sąnaudas, eksploatacines išlaidas ir kuro sąnaudų sumažėjimą. Šilumos siurblio elektros poreikis nustatytas pagal pagaminamos šilumos kiekį ir apskaičiuotą transformacijos koeficientą COP. Kadangi šilumos siurblio efektyvumas priklauso nuo šilumos šaltinio ir tiekiamos šilumos temperatūrinio režimo, skaičiavimai atlikti vasaros ir žiemos darbo režimams. Ekonominis efektas įvertintas lyginant šilumos siurbliu pagaminamos šilumos savikainą su katilinėje naudojamo kuro šilumos gamybos sąnaudomis. Sutaupymai skaičiuoti pagal sumažėjusį kuro poreikį, įvertinant katilo naudingumo koeficientą.

Atsipirkimo laikas skaičiuojamas remiantis formule:

$$T = \frac{I_0}{CF} \tag{47}$$

čia: T – atsipirkimo laikas, metais;

$I_0$ – pradinė investicija, Eur;

CF – metinis ekonominis efektas, Eur/ metus.

Grynoji dabartinė vertė skaičiuojama remiantis formule:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \tag{48}$$

čia: NPV – grynoji dabartinė vertė, Eur;

$I_0$ – pradinė investicija, Eur;

$CF_t$ – pinigų srautas t-aisiais metais, Eur;

r – diskonto norma;

n – vertinimo laikotarpis, metais. Vertinimas: jeigu NPV > 0, projektas ekonomiškai naudingas, jeigu NPV < 0, projektas ekonomiškai neatsiperka pagal pasirinktas prielaidas.

**16 lentelė.** Šilumos siurblio ekonominiai rodikliai [32]

| Scenarijus | Žiemos režimas | Vasaros režimas | Metinis režimas |
|---|---|---|---|
| Nusidėvėjimo laikas, metai | 16 | 16 | 16 |
| Investicijos į šilumos siurblį, Eur | 868 000 | 868 000 | 868 000 |
| Iš kurių investicijos į įrangą, Eur | 693 000 | 693 000 | 693 000 |
| Iš kurių investicijos prijungimui prie elektros tinklo, Eur | 14 000 | 14 000 | 14 000 |
| Iš kurių investicijos į montavimą, Eur | 161 000 | 161 000 | 161 000 |
| Pastoviosios eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus | 10 169 | 10 169 | 10 169 |
| Kintamos eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus | 128 269 | 91 559 | 219 828 |
| Investicinis nusidėvėjimas, Eur/metus | 54 250 | 54 250 | 54 250 |
| Investicijos grąža, Eur (pirmaisiais metais) | 40 688 | 40 688 | 40 688 |
| Suminės metinės sąnaudos, Eur/metus | 233 376 | 196 665 | 324 935 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Metinis kuro sąnaudų sutaupymas, Eur | -12 854 | 39 550 | 26 697 |
| Atsipirkimo laikas, metai | Neatsiperka | 24 | Neatsiperka |
| Atsipirkimas su 25 % parama, metai | Neatsiperka | 18 | Neatsiperka |
| Vidutinė šilumos gamybos savikaina, Eur/MWh | 68,0 | 78,9 | 56,7 |

Gauti rezultatai leidžia įvertinti, kokiomis sąlygomis šilumos siurblio integracija į centralizuoto šilumos tiekimo sistemą yra ekonomiškai pagrįsta. Šilumos siurblio ekonominis patrauklumas labiausiai priklauso nuo COP reikšmės, elektros energijos kainos ir kuro, kurį pakeičia šilumos siurblys, kainos. Didžiausias ekonominis efektas pasiekiamas tais atvejais, kai šilumos siurblys pakeičia gamtines dujas arba granulinį kurą lyginant su biokuru.

Vėjo jėgainės ekonominis vertinimas atliktas lyginant du perteklinės elektros energijos panaudojimo scenarijus – tiesioginį perteklinės elektros energijos vertimą į šilumą ir perteklinės elektros energijos kaupimą baterijose. Vėjo energijos gamyba yra nepastovi ir nesutampa su objekto elektros vartojimo grafiku. Dėl šios priežasties ekonominis vertinimas atliekamas pagal valandinį energijos balansą, nustatant tiesiogiai suvartojamą elektros energiją, perteklinę elektros energiją ir elektros energijos kiekį perkamą iš tinklo. Pirmuoju scenarijumi perteklinė elektros energija tiesiogiai verčiama į šilumą elektriniame katile. Šiuo atveju ekonominis efektas susidaro iš dviejų dalių – sutaupymų dėl tiesiogiai suvartotos vėjo elektros energijos ir kuro sąnaudų sumažėjimo, kai perteklinė elektros energija pakeičia esamą šilumos gamybos šaltinį. Šio scenarijaus efektyvumas priklauso nuo to, ar perteklinės elektros susidarymo metu egzistuoja šilumos poreikis, taip pat nuo keičiamo kuro kainos. Jeigu perteklinė energija pakeičia pigų biokurą, ekonominis efektas yra ribotas, tačiau, jei ji pakeičia brangesnį granulinį, dujinį ar rezervinį kurą, efektas tampa didesnis. Antruoju scenarijumi perteklinė elektros energija kaupiama elektros baterijoje ir naudojama vėliau, kai objekto elektros poreikis viršija vėjo jėgainės momentinę gamybą. Šis sprendinys leidžia padidinti vietoje panaudojamos vėjo elektros energijos dalį. Lyginant abu scenarijus, tiesioginis elektros vertimas į šilumą pasižymi mažesne investicija, tačiau jo nauda priklauso nuo šilumos poreikio perteklinės elektros gamybos metu. Elektros kaupimo baterijoje scenarijus leidžia geriau suderinti vėjo gamybą su elektros vartojimu, tačiau reikalauja žymiai didesnės investicijos. Todėl galutinis sprendimas turi būti priimamas įvertinus ne tik metinį energijos balansą, bet ir valandinį gamybos bei vartojimo grafiką, elektros kainą, pakeičiamo kuro kainą, kaupimo įrangos kainą ir jos išnaudojimo intensyvumą.

Išlygintoji šilumos gamybos savikaina skaičiuojama pagal formulę:

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{Q_t}{(1+r)^t}} \quad (49)$$

čia: LCOH – išlygintoji šilumos gamybos savikaina, Eur/MWh;

$I_0$ – investicijos, Eur;

$C_t$ – metinės eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus;

$Q_t$ – pagamintas šilumos/elektros kiekis, MWh/metus;

r – diskonto norma;

n – vertinimo laikotarpis, metais.

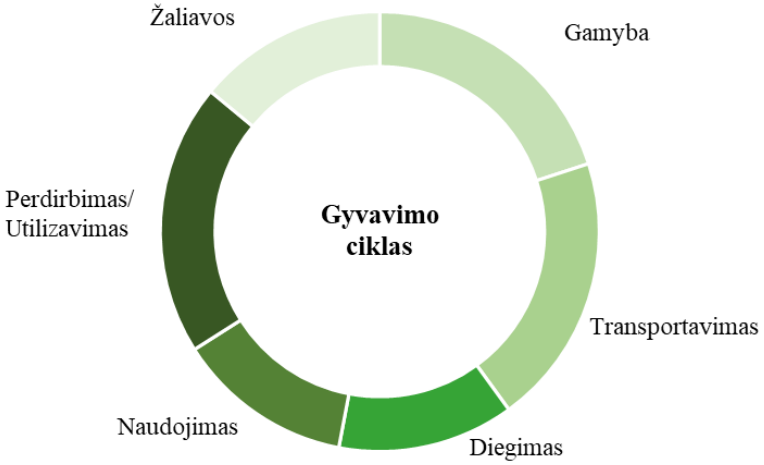
**17 lentelė.** Vėjo jėgainės ekonominiai rodikliai [32]

| Scenarijus | Terminis | Elektrinis |
|---|---|---|
| Nusidėvėjimo laikas, metai | 16 | 16 |
| Investicijos į vėjo jėgainę, Eur<br>Iš kurių investicijos į įrangą, Eur<br>Iš kurių investicijos prijungimui prie elektros tinklo, Eur<br>Iš kurių investicijos į pamatą, Eur<br>Iš kurių investicijos į montavimą, Eur | 1 540 000<br>930 000<br>110 000<br>380 000<br>120 000 | 1 540 000<br>930 000<br>110 000<br>380 000<br>120 000 |
| Investicijos į akumuliacinę talpą (terminę arba elektrinę), Eur | 43 050 | 600 000 |
| Investicijos į elektrodinį katilą, Eur | - | 150 000 |
| Pastoviosios eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus | 34 000 | 34 000 |
| Kintamos eksploatacinės sąnaudos, Eur/metus | 1 183 | 1 183 |
| Investicinis nusidėvėjimas, Eur/metus | 98 941 | 143 125 |
| Investicijos grąža, Eur (pirmaisiais metais) | 74 205 | 107 344 |
| Suminės metinės sąnaudos, Eur/metus | 208 329 | 285 652 |
| Metinis kuro sąnaudų sutaupymas, Eur | 5022 | 33417 |
| Atsipirkimo laikas, metai | Neatsiperka | Neatsiperka |
| Atsipirkimas su 25 % parama, metai | Neatsiperka | Neatsiperka |
| Vidutinė elektros gamybos savikaina, Eur/MWh | 210,7 | 259,1 |
| Vidutinė šilumos gamybos savikaina, Eur/MWh | 177,5 | - |

Atlikti skaičiavimai rodo, kad nagrinėjamoje vietovėje 1 MW vėjo jėgainės ekonominį efektyvumą labiausiai riboja mažas metinis energijos gamybos kiekis ir gamybos nesutapimas su vartojimo poreikiu. Dėl mažo apkrovos koeficiento gaunama didelė elektros gamybos savikaina. Elektros kaupimo scenarijus technologiškai padidina vietoje panaudojamos elektros energijos dalį, tačiau dėl didelės kaupimo įrangos investicijos ekonomiškai nėra pagrįstas.

## 5. Aplinkosauginė analizė

Aplinkosauginėje analizėje vertinamas viso gyvavimo ciklo metu išskiriamos kenksmingos medžiagos nuo pat elementų pagaminimo iki utilizavimo stadijos. Bazinis scenarijus apibūdina esamą centralizuoto šilumos tiekimo sistemos veikimą, kai šilumos poreikis padengiamas naudojant esamus šilumos gamybos įrenginius ir kuro rūšis. Šis scenarijus naudojamas kaip palyginimo pagrindas vertinant atsinaujinančių energijos šaltinių integravimo poveikį kuro sąnaudoms ir $CO_2$ emisijoms.




**27 pav.** Gyvavimo ciklo etapų schema

Pagrindinis aplinkosauginis rodiklis yra išvengtas $CO_2$ emisijų kiekis, apskaičiuojamas kaip skirtumas tarp bazinio scenarijaus emisijų ir emisijų po atsinaujinančios energijos šaltinių integravimo. Saulės kolektorių atveju vertinama, kiek šilumos gamybos iš esamų katilų yra pakeičiama saulės energija. Vėjo jėgainės atveju analizuojama, kokia pagamintos elektros dalis gali būti panaudojama vidinėms sistemos reikmėms arba šilumai gaminti elektriniu katilu. Šilumos siurblio atveju įvertinama ne tik pagaminta šiluma, bet ir elektros energijos poreikis, priklausantis nuo sezoninio naudingo veiksmo koeficiento. Tokia analizė leidžia nustatyti, kurios technologijos ne tik ekonomiškai, bet ir aplinkosauginiu požiūriu yra racionalios miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje. Didžiausias aplinkosauginis efektas pasiekiamas tada, kai atsinaujinanti energija pakeičia iškastinį kurą arba elektros energiją iš tinklo, o ne tik perskirsto esamą biokuro naudojimą.

Atliekant aplinkosauginį vertinimą, skirtingoms energijos gamybos technologijoms taikomi gyvavimo ciklo ŠESD emisijų rodikliai, išreikšti kg $CO_2$–eq/MWh naudingo energijos kiekio. Saulės kolektoriams, remiantis tyrimais [48, 49], būdingas 23,8 – 34,0 kg $CO_2$–eq/MWh emisijų intervalas, todėl šiame darbe priimama 33,99 kg $CO_2$–eq/MWh reikšmė, atitinkanti saulės kolektorių sistemą su šilumos balansavimo akumuliavimu [50]. Šilumos siurblių gyvavimo ciklo emisijų rodiklio intervalas, remiantis tyrimais [51, 52] siekia 88,0 – 276,0 kg $CO_2$–eq/MWh, o vertinimui pasirenkamas palankesnis 8,8 kg $CO_2$–eq/MWh scenarijus be elektros sąnaudų emisijų, jos vertinamos atskirai. Gamtinių dujų katilui taikoma 268,0 kg $CO_2$–eq/MWh reikšmė [53]. Elektros energijos emisijų dedamoji vertinama atskirai, kadangi ji priklauso nuo pasirinkto elektros apskaitos metodo. Lietuvos 2024 m. liekamojo energijos rūšių derinimo emisijų rodiklis, taikytinas elektros energijai be priskirtų kilmės garantijų, yra 567,91 kg $CO_2$/MWh [54]. Tuo tarpu fizinio Lietuvos vartojamos elektros tinklo vidurkio rodiklis pagal realius elektros srautus siekia 152,8 kg $CO_2$–eq/MWh [55]. Vėjo jėgainės gyvavimo ciklo emisijų rodiklis, remiantis tyrimais [56, 57], svyruoja nuo 15,98 iki 33,60 kg $CO_2$–eq/MWh, todėl 1 MW vėjo jėgainei šiame darbe priimama vidutinė 24,8

kg $CO_2$–eq/MWh reikšmė. Biokuro technologijoms, remiantis tyrimais [58, 59], taikomos 54,0 kg $CO_2$–eq/MWh emisijos granuliniam katilui ir 43,2 kg $CO_2$–eq/MWh biokuro katilui.

**18 lentelė.** Saulės kolektorių $CO_2$ emisijų lyginamoji analizė

| Scenarijus | $CO_2$ emisijos sistemoje, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijos akumuliacijoje, t $CO_2$–eq/metus | Bendros $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | Pakeičiamo kuro $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijų sumažėjimas, t $CO_2$–eq/metus |
|---|---|---|---|---|---|
| Saulės kolektoriai, 40 °C –70 °C | 38,2 | 56,4 | 94,6 | 239,8 | 145,2 |
| Saulės kolektoriai, 45 °C –60 °C | 15,2 | 22,4 | 37,6 | 95,1 | 57,5 |

Vertinant saulės kolektorių sistemas, 40 °C – 70 °C scenarijuje bendros metinės emisijos sudaro 94,6 t $CO_2$–eq/metus, o pakeičiamo biokuro scenarijaus emisijos siektų 239,8 t $CO_2$–eq/metus. Todėl šiuo atveju metinis emisijų sumažėjimas sudarytų apie 145,2 t $CO_2$–eq/metus. Mažesnės apimties 45 °C – 60 °C scenarijuje bendros emisijos siekia 37,5 t $CO_2$–eq/metus, o pakeičiamo biokuro emisijos – 95,1 t $CO_2$–eq/metus, todėl emisijų sumažėjimas sudarytų 57,5 t $CO_2$–eq/metus.

**19 lentelė**. Šilumos siurblio $CO_2$ emisijų lyginamoji analizė

| Laikotarpis su liekamojo energijos rūšių derinio emisijų rodikliu | $CO_2$ emisijos sistemoje, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijos elektrai, t $CO_2$–eq/metus | Bendros $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | Pakeičiamo kuro $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijų padidėjimas, t $CO_2$–eq/metus |
|---|---|---|---|---|---|
| Metinis | 34,1 | 846,8 | 880,9 | 468,5 | 412,4 |
| Vasara | 14,2 | 352,7 | 366,9 | 164,8 | 202,1 |
| Žiema | 19,9 | 494,1 | 514,0 | 303,7 | 210,3 |
| Laikotarpis su Lietuvos fizinio elektros tinklo vidurkio emisijų rodikliu | $CO_2$ emisijos sistemoje, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijos elektrai, t $CO_2$–eq/metus | Bendros $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | Pakeičiamo kuro $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijų sumažėjimas, t $CO_2$–eq/metus |
| Metinis | 34,1 | 227,8 | 261,9 | 468,5 | 206,6 |
| Vasara | 14,2 | 94,9 | 109,1 | 164,8 | 55,7 |
| Žiema | 19,9 | 132,9 | 152,8 | 303,7 | 150,9 |

Kai šilumos siurblių elektros sąnaudoms taikomas Lietuvos 2024 m. liekamojo energijos rūšių derinio emisijų rodiklis, bendros metinės šilumos siurblių emisijos sudaro 880,9 t $CO_2$–eq/metus. Tai yra 412,4 t $CO_2$–eq/metus daugiau nei palyginamojo scenarijaus atveju, kuriame naudojamas biokuras, gamtinės dujos ir elektra. Todėl šiuo elektros apskaitos atveju šilumos siurblių scenarijus aplinkosauginiu požiūriu nėra palankesnis. Taikant Lietuvos fizinio elektros tinklo vidurkio emisijų rodiklį, šilumos siurblių metinės emisijos sumažėja iki 261,9 t $CO_2$–eq/metus. Šiuo atveju šilumos siurblių scenarijus generuoja 206,6 t $CO_2$–eq/metus mažiau nei palyginamasis biokuro, gamtinių dujų ir elektros scenarijus, todėl yra palankesnis aplinkosauginiu požiūriu nei taikant liekamojo energijos rūšių derinio emisijų rodiklį.

**20 lentelė.** Vėjo jėgainės $CO_2$ emisijų lyginamoji analizė

| Scenarijus | $CO_2$ emisijos sistemoje, t $CO_2$–eq/metus | Pakeičiamos elektros $CO_2$ emisijos, t $CO_2$–eq/metus | $CO_2$ emisijų sumažėjimas, t $CO_2$–eq/metus |
|---|---|---|---|
| Vėjo jėgainė, lyginant su elektra be kilmės garantijų | 8,5 | 190,3 | 181,8 |
| Vėjo jėgainė, lyginant su Lietuvos elektros tinklo fiziniu vidurkiu | 8,5 | 51,2 | 42,7 |

1 MW vėjo jėgainės metinės gyvavimo ciklo emisijos sudaro apie 8,5 t $CO_2$–eq/metus. Lyginant su elektros energija be kilmės garantijų, kurios emisijos siektų 190,3 t $CO_2$–eq/metus, vėjo jėgainė leistų sumažinti emisijas 181,8 t $CO_2$–eq/metus. Lyginant su Lietuvos fizinio elektros tinklo vidurkiu, emisijų sumažėjimas būtų mažesnis ir siektų 42,7 t $CO_2$–eq/metus.

Rezultatų palyginimas rodo, kad didžiausias metinis $CO_2$–eq emisijų sumažėjimas gaunamas šilumos siurblio scenarijaus atveju, taikant Lietuvos fizinio elektros tinklo vidurkio rodiklį, emisijos tokiu atveju sumažėja 206,6 t $CO_2$–eq/metus emisijų lyginant su biokuro, dujų ir elektros scenarijus. Naudojant liekamojo energijos rūšių derinio rodiklį, šilumos siurblių scenarijus tampa reikšmingai taršesnis už palyginamąjį scenarijų ir nepalankus aplinkosauginiu požiūriu. Vėjo jėgainės scenarijuje, kai pagaminta elektros energija pakeičia elektros energiją be kilmės garantijų emisijos sumažėja apie 181,8 t $CO_2$–eq/metus. Saulės kolektorių scenarijuose taip pat gaunamas reikšmingas emisijų sumažėjimas, 40 °C – 70 °C sistemos atveju jis sudaro 145,2 t $CO_2$–eq/metus, o 45 °C – 60 °C sistemos atveju – 57,6 t $CO_2$–eq/metus. Šilumos siurblių rezultatai labiausiai priklauso nuo taikomo elektros energijos emisijų rodiklio.

## Išvados

1. Nagrinėjamo objekto analizės aktualumas pagrįstas santykinai aukšta šilumos kaina Biržų mieste, centralizuoto šilumos tiekimo sistemos efektyvumo didinimo poreikiu ir siekiu mažinti iškastinio kuro naudojimą bei $CO_2$ emisijas. Atsinaujinančių energijos išteklių integracija į Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemą gali prisidėti prie šilumos gamybos sąnaudų mažinimo ilgalaikėje perspektyvoje ir didinti gyventojų energetinę gerovę.

2. Mokslinės literatūros analizė parodė, kad atsinaujinančių energijos išteklių, šilumos akumuliavimo ir šilumos siurblių integracija centralizuoto šilumos tiekimo sistemose yra plačiai nagrinėjama, tačiau mažo miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoms trūksta išsamių teorinių ir eksperimentinių tyrimų.

3. Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje nustatytas šilumos įrenginių darbo režimas – šildymo sezono metu naudojama Kaštonų katilinė, ne šildymo sezono metu naudojama Rotušės katilinė. Kaštonų katilinėje naudojama įrenginių galia iki 6 MW, Rotušės katilinėje – iki 1,5 MW. Metinis Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemos šilumos energijos poreikis yra 27 615 MWh.

4. Įvertinti du saulės terminių kolektorių sistemų integravimo į Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemą scenarijai. 40 °C – 70 °C scenarijaus atveju numatomas šilumos pakėlimas nuo grįžtamojo srauto 40 °C iki tiekiamo srauto 70 °C pagal šilumos tiekimo grafiką. 45 °C iki 60 °C scenarijaus atveju grįžtamasis vanduo pirmiausia pašildomas kondensaciniame ekonomaizeryje nuo 40 °C iki 45 °C, o saulės terminiais kolektoriais temperatūra keliama nuo 45 °C iki 60 °C, o likusios energijos poreikio padengimas vykdomas biokuru. Nustatyta, kad 40 °C – 70 °C scenarijaus atveju reikalingas 11077 $m^2$ saulės terminių kolektorių plotas, o metinė šilumos gamyba siekia 4441 MWh. 45 °C – 60 °C scenarijaus atveju reikalingas 4155 $m^2$ saulės terminių kolektorių plotas, o metinė šilumos gamyba siekia 1762 MWh.

5. Didžiausias atliekinės šilumos šaltinio potencialas nustatytas nuotekoms, kurių temperatūra ištisus metus išlieka santykinai aukšta 15 – 20 °C, o debitas siekia 2500 $m^3$ per dieną. Paskaičiuota šilumos siurblio galia – 0,70 MW, pagal esantį šilumos šaltinio potencialą. Šilumos siurblys pagamintų 5368 MWh šiluminės energijos per metus.

6. Įvertinus akumuliacinių talpų integravimo galimybes nustatyta, kad saulės kolektorių sistemų balansavimui reikalingos skirtingo tūrio akumuliacinės talpos. 40 °C – 70 °C scenarijaus atveju projektuojama cilindrinė akumuliacinė talpa 862 $m^3$. 45 °C – 60 °C scenarijaus atveju – 718 $m^3$ talpa. Perteklinės vėjo elektros energijos konversijai į šiluminę energiją ir jos akumuliavimui projektuojama 287 $m^3$ talpa.

7. Įvertinti du vėjo jėgainės scenarijai – 59 metrų ir 67 metrų bokšto aukščio. Biržų centralizuoto šilumos tiekimo sistemai projektuojamas tinkamesnis 59 metrų aukščio scenarijus, kuris atitinka sistemos elektros energijos poreikį. Šiuo atveju, vėjo jėgainė per metus pagamintų 343 MWh elektros energijos, iš kurių 134 MWh būtų sunaudojama tiesiogiai, o 209 MWh sudarytų perteklinę energiją, kuri galėtų būti akumuliuojama šilumos pavidalu arba perduodama į elektros tinklą. Tiesiogiai panaudojama elektros energijos dalis sudarytų 40,4 % metinio CŠT sistemos elektros energijos poreikio.

8. Atlikus pasirinktų technologijų energetinę, ekonominę ir aplinkosauginę analizes nustatyta, kad palankiausi ekonominiai rezultatai gaunami 40 °C – 70 °C saulės terminių kolektorių scenarijaus atveju – atsipirkimo laikotarpis siekia 14 metų, o vidutinė šilumos gamybos savikaina – 51,8 Eur/MWh. 45 °C – 60 °C scenarijaus atveju atsipirkimo laikotarpis siekia 16 metų, o vidutinė šilumos gamybos savikaina – 58,8 Eur/MWh. Šilumos siurblys, naudojantis nuotekų atliekinę šilumą, šildymo sezono režimu ekonomiškai neatsiperka, ne šildymo sezono režimu atsipirkimo laikotarpis siekia 24 metus, o metiniu režimu – viršija eksploatavimo laikotarpį. Vėjo jėgainės scenarijus, kai perteklinė elektros energija naudojama šilumai gaminti, taip pat ekonomiškai neatsiperka. Naudojant elektros akumuliaciją atsipirkimo laikotarpis viršija įrangos eksploatacijos trukmę. Aplinkosauginiu požiūriu 40 °C – 70 °C saulės terminių kolektorių scenarijus leistų sumažinti emisijas 145,2 t $CO_2$–eq per metus, 45 °C – 60 °C scenarijus – 57,5 t $CO_2$–eq per metus. Šilumos siurblio rezultatai priklauso nuo taikomo elektros energijos emisijų rodiklio – naudojant Lietuvos liekamojo energijos rūšių derinio rodiklį, emisijos padidėtų 412,4 t $CO_2$–eq per metus, o taikant Lietuvos fizinio elektros tinklo vidurkio rodiklį, emisijos sumažėtų 206,6 t $CO_2$–eq per metus. Vėjo jėgainės atveju, lyginant su elektros energija be kilmės garantijų, emisijų sumažėjimas siektų 181,8 t $CO_2$–eq per metus, o lyginant su Lietuvos fizinio elektros tinklo vidurkiu – 42,7 t $CO_2$–eq per metus.

## Literatūros sąrašas


1. BARCO-BURGOS, J., BRUNO, J. C., EICKER, U., SALDAÑA-ROBLES, A. L., ALCÁNTAR-CAMARENA, V. *Review on the integration of high-temperature heat pumps in district heating and cooling networks*. Energy. 2022, T. 239, Nr. 122378. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122378. [žiūrėta 2026-05-17].
2. JONYNAS, R., PUIDA, E., POŠKAS, R., PAUKŠTAITIS, L., JOUHARA, H., GUDZINSKAS, J., MILIAUSKAS, G., LUKOŠEVIČIUS, V. *Renewables for district heating: The case of Lithuania.* Energy. Amsterdam: Elsevier, 2020, 211, 119064. ISSN 0360-5442. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119064. [žiūrėta 2026-05-17].
3. GRZEGÓRSKA, A., RYBARCZYK, P., LUKOŠEVIČIUS, V., SOBCZAK, J., ROGALA, A. *Smart asset management for district heating systems in the Baltic Sea region.* Energies. Basel: MDPI, 2021, 14(314). ISSN 1996-1073. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/en14020314. [žiūrėta 2026-05-17].
4. LIETUVOS ŠILUMOS TIEKĖJŲ ASOCIACIJA. *About DH Sector.* Interaktyvus. Prieiga per: https://lsta.lt/en/about-dh-sector/. [žiūrėta 2026-05-17].
5. VAN RUIJVEN, B. J., DE CIAN, E., SUE WING, I. *Amplification of future energy demand growth due to climate change*. Nature Communications, 2019, Vol. 10, Article number: 2762. Available from: https://doi.org/10.1038/s41467-019-10399-3. [žiūrėta 2026-05-17].
6. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2025*. IEA, Paris, 2025. Available from: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9753df19-0a71-422a-b725-012c555763b3/WorldEnergyOutlook2025.pdf. [žiūrėta 2026-05-17].
7. BAGHERIAN, M. A., MEHRANZAMIR, K. *A comprehensive review on renewable energy integration for combined heat and power production.* Energy Conversion and Management. Amsterdam: Elsevier, 2020, 224, 113454. ISSN 0196-8904. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113454. [žiūrėta 2026-05-17].
8. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Europe – Emissions*. Interaktyvus. Prieiga per: https://www.iea.org/regions/europe/emissions. [žiūrėta 2026-05-17].
9. OLSTHOORN, D., HAGHIGHAT, F., MIRZAEI, P. A. *Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization*. Solar Energy, 2016, vol. 136, p. 49–64. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.054. [žiūrėta 2026-05-17].
10. EUROSTAT. *Municipal waste statistics.* Interaktyvus. Prieiga per: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasmun__custom_14781864/default/table?lang=en. [žiūrėta 2026-05-17].
11. DAHASH, A., OCHS, F., JANETTI, M. B., STREICHER, W. *Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems.* 2019. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.01.189. [žiūrėta 2026-05-17].
12. SOLARGIS. *Free maps and GIS data – Lithuania.* Interaktyvus. Prieiga per: https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=lithuania. [žiūrėta 2026-05-17].
13. POPOVSKI, E., FLEITER, T., RAGWITZ, M. *The role of solar district heat in the energy transition of the German heating sector.* Energy. Amsterdam: Elsevier, 2024, 310, 133176. ISSN 0360-5442. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133176. [žiūrėta 2026-05-17].

14. TIAN, Z., ZHANG, S., DENG, J., FAN, J., HUANG, J., KONG, W., PERERS, B., FURBO, S. *Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends*. Energy Conversion and Management. 2019, T. 189, p. 67–80. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.071. [žiūrėta 2026-05-17].
15. ARIAS, I., CARDEMIL, J., ZARZA, E., VALENZUELA, L., ESCOBAR, R. *Latest developments, assessments and research trends for next generation of concentrated solar power plants using liquid heat transfer fluids.* 2022. Interaktyvus. Prieiga per*:* https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112844. [žiūrėta 2026-05-17].
16. VAHIDHOSSEINI, S. M., RASHIDI, S., HSU, S. H., YAN, W. M., & RASHIDI, A. *Integration of solar thermal collectors and heat pumps with thermal energy storage systems for building energy demand reduction: A comprehensive review.* 2024. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.112568. [žiūrėta 2026-05-17].
17. NUßBICKER-LUX J. *Simulation und Dimensionierung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Erdsonden-Wärmespeicher.* Ph.D. Dissertation, University of Stuttgart; 2010. Prieiga per: https://doi.org/10.18419/opus-1859. [žiūrėta 2026-05-17].
18. ZHENG, J., ZHOU, Z., ZHAO, J., WANG, J. *Effects of the operation regulation modes of district heating system on an integrated heat and power dispatch system for wind power integration.* Applied Energy, 2018, vol. 230, p. 1126–1139. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.077. [žiūrėta 2026-05-17].
19. ZHENG, J., ZHOU, Z., ZHAO, J., WANG, J. *Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration.* Applied Energy, 2018, vol. 211, p. 865–874. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.080. [žiūrėta 2026-05-17].
20. WANG, Y., LIU, H., LI, Q., WANG, X., ZHOU, Z., XU, H., ZHANG, D., QIAN, P. *Overview of condition monitoring technology for variable-speed offshore wind turbines*. Energies. 2025, T. 18, Nr. 5, 1026. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/en18051026. [žiūrėta 2026-05-17].
21. ZHENG, J., ZHOU, Z., ZHAO, J., WANG, J., GUAN, Z. *Optimizing for clean-heating improvements in a district energy system with high penetration of wind power.* Applied Energy, 2019, vol. 253, 113538. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.153. [žiūrėta 2026-05-17].
22. XYDIS, G. *Wind energy integration through district heating: A wind resource based approach.* Resources, 2015, vol. 4, no. 1, p. 110–127. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/resources4010110. [žiūrėta 2026-05-17].
23. DIMOULKAS, I., AMELIN, M., LEVIHN, F. *District heating system operation in power systems with high share of wind power.* Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, vol. 5, no. 6, p. 850–862. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/s40565-017-0344-6. [žiūrėta 2026-05-17].
24. BERTELSEN, N., MATHIESEN, B., V. *EU-28 Residential Heat Supply and Consumption: Historical Development and Status*. Energies, 2020, vol. 13, no. 8, p. 1894. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/en13081894. [žiūrėta 2026-05-17].
25. TIHANA, J., ALI, H., APSE, J., JEKABSONS, J., IVANCOVS, D., GAUJENA, B., DEDOV, *A. Hybrid heat pump performance evaluation in different operation modes for single-family house*. Energies. 2023. T. 16, Nr. 7018. Interaktyvus. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/en16207018. [žiūrėta 2026-05-17].

26. ASTAFJEV, J., PUODŽIUS, R., DMUCHOVSKIS, K., SEREIKA, T. *Šilumos gamybos ir tiekimo efektyvumo įvertinimo bei investicijų nustatymo trumpalaikėje ir ilgalaikėje perspektyvoje Biržų ir Vabalninko miestuose studija*. Kaunas: Teisingi energetikos sprendimai, ataskaita, 2022-07-14, 49 p. Interaktyvus. Prieiga per: https://www.birzai.lt/gyventojams/naujienos/35/parengta-silumos-gamybos-ir-tiekimo-efektyvumo-ivertinimo-birzuose-ir-vabalninke-studija:2901?lang=lt. [žiūrėta 2026-05-17].
27. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJOS APLINKOS PROJEKTŲ VALDYMO AGENTŪRA (APVA). *Biržų rajono renovacijos projektai*. Interaktyvus. Prieiga per: https://renomap.apva.lt/Birzu-rajono-6. [žiūrėta 2026-05-17].
28. BIRŽŲ RAJONO SAVIVALDYBĖS TARYBA. *Biržų rajono atsinaujinančių išteklių energijos naudojimo plėtros veiksmų plano iki 2030 m. patvirtinimas*. Interaktyvus. TAR, 2023-02-24, Nr. T-52. Prieiga per: https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/a85706b0b43711ed8df094f359a60216. [žiūrėta 2026-05-17].
29. VALSTYBINĖ ENERGETIKOS REGULIAVIMO TARYBA (VERT). *Šilumos kainos*. Interaktyvus. Prieiga per: https://vert.lt/siluma/Puslapiai/silumos-kainu-statistika/silumos-kainos.aspx. [žiūrėta 2026-05-17].
30. REGISTRŲ CENTRAS. *REGIA – regionų geoinformacinės aplinkos interaktyvus žemėlapis*. Interaktyvus. Prieiga per: https://regia.lt/map/regia2. [žiūrėta 2026-05-17].
31. UAB „BIRŽŲ VANDENYS“. *Nuotekų tvarkymas*. Interaktyvus. Prieiga per: https://birzuvandenys.lt/nuoteku-tvarkymas/. [žiūrėta 2026-05-17].
32. DANISH ENERGY AGENCY; ENERGINET. *Technology Data Catalogue for Electricity and District Heating Production*. Interaktyvus. Prieiga per: https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-generation-electricity-and-district-heating. [žiūrėta 2026-05-17].
33. KVESELIS, V., LISAUSKAS, A., DZENAJAVIČIENĖ, E. F. *Investigating possibilities to integrate solar heat into district heating systems of Lithuanian towns*. The 9th International Conference “Environmental Engineering”. Vilnius, Lithuania, 2014. Prieiga per: https://doi.org/10.3846/enviro.2014.268. [žiūrėta 2026-05-17].
34. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *STR 2.01.12:2024 „Statybų klimatologija“*. Interaktyvus. Valstybės žinios, 2024-09-30, Nr. 17072. Prieiga per: https://www.e-tar.lt/portal/legalAct.html?documentId=0ccb92d07ef511efabdbb4a1fc8b0b63. [žiūrėta 2026-05-17].
35. WIND-TURBINE-MODELS. *Enercon E-58/10.58 – 1,00 MW*. Interaktyvus. Prieiga per: https://en.wind-turbine-models.com/turbines/114-enercon-e-58-10-58#powercurve. [žiūrėta 2026-05-17].
36. ALAM, M. M., REHMAN, S., MEYER, J. P., AL-HADHRAMI, L., M. *Review of 600–2500 kW sized wind turbines and optimization of hub height for maximum wind energy yield realization.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, Vol. 15, pp. 3796–3812. Available from: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.004. [žiūrėta 2026-05-17].
37. CAI, B., VO, P., SRITHARAN, S., M. ASCE, TAKLE, E. S. *Wind Energy Potential at Elevated Hub Heights in the US Midwest Region*. Journal of Energy Engineering, 2021, Vol. 147, No. 4. Available from: https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000760. [žiūrėta 2026-05-17].
38. KANAPICKAS, A., JANKEVIČIENĖ, J. *Impact of Urban Expansion on Wind Energy Potential in Rural Regions of Lithuania*. Proceedings of the 12th International Scientific Conference Rural Development 2025, Vytautas Magnus University Agriculture Academy, 2025. Available from: https://doi.org/10.15544/RD.2025.024. [žiūrėta 2026-05-17].

39. SOFIU, V., GASHI, S., SOFIU, M., SHABANI, Y. *Efficiency of wind turbines and sustainable development in Kitka Park – Case study*. Journal of Ecological Engineering, 2025, Vol. 26, No. 4, pp. 359–368. Available from: https://doi.org/10.12911/22998993/200479. [žiūrėta 2026-05-17].
40. LIETUVOS RESPUBLIKA. *Lietuvos Respublikos specialiųjų žemės naudojimo sąlygų įstatymas*. Interaktyvus. Valstybės žinios, 2019-06-19, Nr. 9862. Prieiga per: https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/420f4dd0927c11e9ae2e9d61b1f977b3/asr. [žiūrėta 2026-05-17].
41. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *STR 1.04.02:2011 „Inžineriniai geologiniai (geotechniniai) tyrimai“*. Interaktyvus. Valstybės žinios, 2012-01-07, Nr. 5-144. Prieiga per: https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.77B02EDEB1E6. [žiūrėta 2026-05-17].
42. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *STR 1.04.02:2011 „Inžineriniai geologiniai ir geotechniniai tyrimai Šiaurės Lietuvos karstiniame rajone“*. Interaktyvus. Valstybės žinios, 2012-03-15, Nr. 32-1503. Prieiga per: https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.1EDDE8D55E07/asr. [žiūrėta 2026-05-17].
43. BALTPOOL. *Biokuro tiekimo kainos.* Interaktyvus. Prieiga per: https://e.baltpool.eu/heat/?ti=5759676&bp=biopriceforperiod&oldti=6820990. [žiūrėta 2026-05-17].
44. VALSTYBINĖ ENERGETIKOS REGULIAVIMO TARYBA (VERT). *Vidutinė šalies kuro žaliavos kaina*. Interaktyvus. Prieiga per: https://vert.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx. [žiūrėta 2026-05-17].
45. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. *Dėl Investicijų grąžos normos nustatymo metodikos patvirtinimo.* 2015 m. rugsėjo 22 d. nutarimas Nr. O3-510. Interaktyvus. TAR, 2015-09-23, Nr. 2015-14120. Prieiga per: https://e-tar.lt/portal/lt/legalAct/7e02a05061be11e589fccd6fa118e11c/asr [žiūrėta 2026-05-17].
46. UAB „LITESKO“. *UAB „Litesko“ filialo „Biržų šiluma“ 2024 m. šilumos ir karšto vandens tiekimo veiklų sąnaudos*. Interaktyvus. Prieiga per: https://www.litesko.lt/apie-mus/sanaudu-ataskaitos/ataskaitos/birzai. [žiūrėta 2026-05-17].
47. VALANČIUS, R., JURELIONIS, A., JONYNAS, R., KATINAS, V., PEREDNIS, E. *Analysis of Medium-Scale Solar Thermal Systems and Their Potential in Lithuania*. Energies, 2015, vol. 8, no. 6, p. 5725–5737. Interaktyvus.. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/en8065725. [žiūrėta 2026-05-17].
48. MILOUSI, M., SOULIOTIS, M., ARAMPATZIS, G., PAPAEFTHIMIOU, S. *Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis.* Sustainability. Interaktyvus. 2019, vol. 11, no. 9, 2539. Prieiga per: https://doi.org/10.3390/su11092539. [žiūrėta 2026-05-17].
49. GREENING, B., AZAPAGIC, A. *Domestic solar thermal water heating: A sustainable option for the UK?* Renewable Energy. Interaktyvus. 2014, vol. 63, p. 23–36. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.048. [žiūrėta 2026-05-17].
50. RALUY, R. G., GUILLÉN-LAMBEA, S., SERRA, L. M., GUADALFAJARA, M., LOZANO, M. A. *Environmental assessment of central solar heating plants with seasonal storage located in Spain*. Journal of Cleaner Production. Interaktyvus. 2021, vol. 314, 128078. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128078. [žiūrėta 2026-05-17].
51. AUTELITANO, K., FAMIGLIETTI, J., TOPPI, T., MOTTA, M. *Empirical power-law relationships for the Life Cycle Assessment of heat pump units*. Cleaner Environmental Systems. Interaktyvus. 2023, vol. 10, 100135. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100135. [žiūrėta 2026-05-17].

52. RIVA, C., ROUMPEDAKIS, T. C., KALLIS, G., ROCCO, M. V., KARELLAS, S. *Life cycle analysis of a photovoltaic driven reversible heat pump*. Energy and Buildings. Interaktyvus. 2021, vol. 240, 110894. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110894. [žiūrėta 2026-05-17].
53. MAHON, C., MEDIBOYINA, M. K., GARTLAND, D., MURPHY, F. *Life cycle assessment of Irish district heating systems: a comparison of waste heat pump, biomass-based and conventional gas boiler*. Clean Technologies and Environmental Policy. Interaktyvus. 2022, vol. 24, p. 1437–1451. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/s10098-021-02257-y. [žiūrėta 2026-05-17].
54. LITGRID AB. *Liekamasis energijos rūšių derinys*. Litgrid. Interaktyvus. Prieiga per: https://www.litgrid.eu/index.php/paslaugos/kilmes-garantijos/liekamasis-energijos-rusiu-derinys/31206. [žiūrėta 2026-05-17].
55. ELECTRICITY MAPS. *Electricity Grid Review 2025: Lithuania*. Electricity Maps. Interaktyvus. Prieiga per: https://www.electricitymaps.com/grid-in-review-2025/lithuania. [žiūrėta 2026-05-17].
56. DAS, U., NANDI, C. *Life cycle assessment of wind farm: A review on current status and future knowledge*. Energy and Climate Change. Interaktyvus. 2025, vol. 6, 100206. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.egycc.2025.100206. [žiūrėta 2026-05-17].
57. KADIYALA, A., KOMMALAPATI, R., HUQUE, Z. *Characterization of the life cycle greenhouse gas emissions from wind electricity generation systems*. International Journal of Energy and Environmental Engineering. Interaktyvus. 2017, vol. 8, no. 1, p. 55–64. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/s40095-016-0221-5. [žiūrėta 2026-05-17].
58. SELIVANOV, E., CUDLÍN, P. *Life cycle assessment of residential heat production from wood pellet combustion in the Northwest region of Russia*. Journal of Forest Science. Interaktyvus. 2025, vol. 71, no. 4, p. 182–194. Prieiga per: https://doi.org/10.17221/88/2024-JFS. [žiūrėta 2026-05-17].
59. SCRUCCA, F., BARBERIO, G., CUTAIA, L., RINALDI, C. *A simplified methodology for estimating the Carbon Footprint of heat generation by forest woodchips as a support tool for sustainability assessment in decision-making*. Cleaner Environmental Systems. Interaktyvus. 2023, vol. 9, 100126. Prieiga per: https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100126. [žiūrėta 2026-05-17].

## Priedai

### 1 priedas. „Industrial Engineering 2026“ konferencija

# CERTIFICATE

V24-11-82

This certificate confirms that

Arnas Dagys, Egidijus Puida

attended the 13th International Young Researchers' Conference
"Industrial Engineering 2026" and published the article

**Integration of Solar and Wind Energy Sources into District Heating Networks**

in the conference proceedings

14 May 2026, Kaunas, Lithuania

**dr. Kazimieras Juzėnas**
Dean of the Faculty of
Mechanical Engineering
and Design

ktu 1922 faculty of mechanical engineering and design