



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Lietuvos centralizuoto šildymo sistemos raidos klimato kaitos kontekste analizė

Baigiamasis magistro projektas

Irma Petrusevičienė

Projekto autorė

Doc. Eimantas Neniškis

Vadovas

Dr. Arvydas Galinis

Mokslinis konsultantas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Lietuvos centralizuoto šildymo sistemos raidos klimato kaitos kontekste analizė

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Irma Petrusevičienė

Projekto autorė

Doc. Eimantas Neniškis

Vadovas

Dr. Arvydas Galinis

Mokslinis konsultantas

Doc. Mindaugas Ažubalis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Irma Petrusėvičienė

Lietuvos centralizuoto šildymo sistemos raidos klimato kaitos kontekste analizė

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 sąrašė;
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.

Irma Petrusėvičienė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Petrusevičienė, Irma. Lietuvos centralizuoto šildymo sistemos raidos klimato kaitos kontekste analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Eimantas Neniškis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: centralizuotas šilumos tiekimas, klimato kaita, MESSAGE, dekarbonizacija, šilumos siurbliai, šilumos saugyklos.

Kaunas, 2026. 80 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe nagrinėjama Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos raida klimato kaitos kontekste. Darbe vertinama, kaip iki 2050 m. sistemą gali paveikti šilumos ir vėsumos poreikio pokyčiai, CO₂ emisijų mažinimo tikslai, elektros kainos ir technologijų plėtros prielaidos.

Darbe apžvelgta centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų raida Lietuvoje ir kai kuriose Europos valstybėse: Danijoje, Švedijoje, Suomijoje, Vokietijoje ir Ispanijoje. Išanalizuoti galimi klimato kaitos scenarijai bei jų poveikis energijos poreikiui. Taip pat aptartos esamos ir perspektyvios ateities technologijos, galinčios prisidėti prie šilumos sektoriaus transformacijos: šilumos saugyklos, saulės kolektoriai ir šilumos siurbliai.

Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos raidos analizė atlikta naudojant matematinį optimizacinį modelį, sudarytą MESSAGE programine įranga. Darbe paaiškinti modelio sudarymo principai, naudoti įvesties duomenys, tokie kaip technologijų kaštai, naudingumo ir taršos koeficientai, bei detalus laiko segmentavimas. Modeliuojamas laikotarpis apima 2023–2050 m., o scenarijuose vertinama elektros kainų, klimato kaitos, CO₂ emisijų ribojimų ir šilumos saugyklų plėtros įtaka sistemos struktūrai bei kaštams. Scenarijų rezultatai atskirai aptariami techninėje ir ekonominėje analizėje.

Petrusevičienė, Irma. Analysis of Development of Lithuania's Central Heating System in Context of Climate Change. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Eimantas Neniškis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering.

Field and area of study / study field group: Energy Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: district heating, climate change, MESSAGE, decarbonisation, heat pumps, thermal energy storage.

Kaunas, 2026. 80 p.

Summary

This master's thesis analyses the development of Lithuania's district heating system in the context of climate change. The study assesses how changes in heat and cooling demand, CO₂ emission reduction targets, electricity prices, and assumptions about technology development may affect the system by 2050.

The thesis reviews the development of district heating and cooling systems in Lithuania and in selected European countries: Denmark, Sweden, Finland, Germany, and Spain. Possible climate change scenarios and their impact on energy demand are analysed. Existing and prospective future technologies that could contribute to the transformation of the heating sector are also discussed, including thermal energy storage, solar collectors, and heat pumps.

The analysis of Lithuania's district heating system development was carried out using a mathematical optimization model developed in the MESSAGE software. The thesis explains the modelling principles, the input data used, such as technology costs, efficiency and emission coefficients, and the detailed time segmentation. The modelling period covers 2023–2050. The scenarios assess the impact of electricity prices, climate change, CO₂ emission constraints, and thermal energy storage development on the system structure and costs. The scenario results are discussed separately in technical and economic analyses.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas	10
1. Centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų raida ir situacija Lietuvoje bei Europoje.....	11
1.1. Centralizuoto tiekimo sistemos	11
1.2. Centralizuoto tiekimo sistemos Europoje	15
1.3. Lietuvos centralizuoto tiekimo sistemos Europos kontekste	18
1.4. Centralizuoto vėsinimo plėtra Lietuvoje.....	19
1.5. Duomenų apibendrinimas: CŠT ir CVT situacija Europoje	19
1.6. Lietuvos centralizuoto šilumos/ vėsumos tiekimo sistemų esamos situacijos apžvalga.....	20
1.7. Perspektyvios technologijos.....	23
1.8. Šilumos/vėsumos poreikių struktūra	26
1.9. CŠT vaidmuo elektros sistemos balansavime.....	28
2. Klimato kaitos scenarijai ir jų įtaka centralizuoto tiekimo sistemoms.....	30
2.1. Klimato kaitos prognozės.....	30
2.2. Klimato kaitos poveikis šilumos ir vėsumos poreikiams.....	31
3. Lietuvos centralizuotos šilumos tiekimo sistemos raidos modeliavimo metodika	36
3.1. Modeliavimo priemonės pasirinkimas	36
3.2. Energijos sistemos struktūrinė schema	38
3.3. Modeliuojamų technologijų pagrindiniai rodikliai	40
3.4. Laiko segmentavimas.....	43
3.5. Šilumos ir vėsumos poreikių dinamika 2020–2100m.....	44
3.6. Šilumos paklausos nustatymas MESSAGE modeliui	47
3.7. Vėsumos paklausos nustatymas MESSAGE modeliui	48
3.8. Modelyje taikomos apkrovos ir išteklių kreivės	49
3.9. CO2 emisijų ribojimai.....	51
3.10. Modeliuojami scenarijai.....	52
4. Tyrimo rezultatai	54
4.1. Techninė scenarijų analizė	54
4.2. Ekonominė scenarijų analizė.....	66
4.3. Šilumos saugyklų reikšmė sistemoje	70
Išvados.....	73
Literatūros sąrašas.....	74
Priedai	80
1 priedas. Lietuvos centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemos energijos srautų ir technologijų schema.....	80

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Centralizuoto šilumos ir vėsinimo tiekimo apžvalga Europos šalyse.....	19
1.2 lentelė. Centralizuotos šilumos gamybos technologijos Lietuvoje	22
1.3 lentelė. Esamų šilumos gamybos technologijų techninių – ekonominių parametru palyginimas	23
1.4 lentelė. CŠT energijos suvartojimas pagal sektorius ir mėnesius.....	27
2.1 lentelė. Vidutinis vėsinimo dienų skaičius per metus Lietuvoje skirtingais laikotarpiais pagal skirtingus klimato kaitos scenarijus	33
3.1 lentelė. Technologijų rodikliai	40
3.2 lentelė. 2023 m. kuro ir energijos kainos modelyje.....	41
3.3 lentelė. Prognozuojamas šilumos ir vėsumos pokytis Lietuvoje 2020 m. – 2100 m.....	47
3.4 lentelė. CŠT energijos suvartojimo namų ūkiuose pasiskirstymas pagal miestus 2023 m.....	48
3.5 lentelė. Bendras CŠT energijos suvartojimas 2023 m. skirtingais matavimo vienetais	48
3.6 lentelė. CVT energijos suvartojimo namų ūkiuose pasiskirstymas pagal miestus	48
3.7 lentelė. Bendras CVT energijos suvartojimas 2023 skirtingais matavimo vienetais.....	48
3.8 lentelė. Pagrindiniai taikyti dydžiai	51
3.9 lentelė. CO ₂ emisijų mažinimo tikslai modelyje	52
3.10 lentelė. Energetikos sistemos modeliavimo scenarijų charakteristikos ir prielaidos.....	53
4.1 lentelė. CŠT šilumos gamybos struktūra 1A scenarijuje 2023–2050 m.....	55
4.2 lentelė. CŠT šilumos gamybos struktūra 1B scenarijuje 2023–2050 m.....	55
4.3 lentelė Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2A scenarijuje.	57
4.4 lentelė Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2B scenarijuje.	58
4.5 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3A scenarijuje	59
4.6 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3B scenarijuje	60
4.7 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4A scenarijuje	61
4.8 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4B scenarijuje.	62
4.9 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5A scenarijuje.	63
4.10 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5B scenarijuje	64
4.11 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5C scenarijuje.....	65

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos veikimo schema.....	11
1.2 pav. CŠT raida pagal kartas	13
1.3 pav. Centralizuoto vėsumos tiekimo sistemos schema	14
1.4 pav. CŠT dalis namų ūkių sektoriaus šilumos poreikyje	19
1.5 pav. Pirminio kuro sudėtis centralizuotos šilumos gamyboje	21
1.6 pav. Šilumos vartotojų struktūra	21
1.7 pav. Sezoninių šilumos kaupimo talpyklų tipai	24
1.8 pav. Saulės kolektorių integracija į CŠT tinklą.....	25
1.9 pav. CŠT energijos suvartojimas pagal sektorius.....	26
1.10 pav. CŠT sektoriaus sezoninis kitimas	28
1.11 pav. Lanksti centralizuoto šilumos tiekimo schema su <i>Power-to-Heat</i> technologijomis ir šilumos kaupikliais.....	29
2.1 pav. vidutinė metinė temperatūra Lietuvoje 1961 m.- 2024 m.....	30
2.2 pav. Lietuvos metinės oro temperatūros raida ir prognozės pagal RCP 4.5 scenarijų (1777–2100 m.).....	31
2.3 pav. Pasaulinis elektros energijos suvartojimas oro kondicionavimui.....	32
2.4 pav. Dienų per metus skaičius, kai vidutinė paros oro temperatūra pasiekia ar viršija 15 °C	33
2.5 pav. Dienolaipsnių vėsinimui pokytis Lietuvoje (1979–2023 m.).....	34
2.6 pav. Vėsinimo dienų skaičiaus prognozė Klaipėdoje skirtingais klimato kaitos scenarijais	34
2.7 pav. Šildymo dienų skaičiaus prognozė Vilniuje skirtingais klimato kaitos scenarijais.	34
2.8 pav. Dienolaipsnių pokytis (HDD) Lietuvoje (1777–2100 m.) pagal 10 metų slankųjį vidurkį	34
3.1 pav. Pavyzdinė energijos sistemos schema	37
3.2 pav. energijos lygiai	39
3.3 pav. 2023 m. elektros valandinės kainos Lietuvoje.	42
3.4 pav. 2023 m. realių ir modifikuotų dienos elektros kainų palyginimas (intensyvios saulės elektrinių plėtros scenarijus)	42
3.5 pav. Realių ir modifikuotų 2023 m. mėnesinių elektros kainų palyginimas (intensyvios saulės elektrinių plėtros scenarijus).....	43
3.6 pav. Laiko segmentavimas modelyje	44
3.7 pav. Šildymo poreikio prognozė Lietuvoje iki 2100 m.....	45
3.8 pav. Vėsinimo poreikio prognozė Lietuvoje iki 2100 m.....	45
3.9 pav. Vidutinės metinės oro temperatūros pokyčiai Lietuvoje pagal klimato kaitos scenarijus (1980–2100 m.)	46
3.10 pav. Šilumos vartojimo vienu metų dinamika: realus ir modifikuotas scenarijai	47
3.11 pav. 2023 m. vidutinės elektros kainos Lietuvoje pagal mėnesius ir dienos tipą.....	49
3.12 pav. 2023 m. vidutinės momentinės saulės generacijos tipinės paros Lietuvoje pagal mėnesius ir dienos tipą.....	49
3.13 pav. 2023 m. vidutinis momentinis šilumos vartojimas CŠT tinkluose Lietuvoje pagal mėnesius ir dienos tipą.....	50
3.14 pav. Vidutinis momentinis vėsos (decentralizuotos) vartojimas Lietuvoje pagal mėnesius ir dienos tipą.....	50

3.15 pav. CO2 emisijų kitimas Lietuvos CŠT sektoriuje	51
4.1 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 1A scenarijuje.....	54
4.2 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 1B scenarijuje.....	55
4.3 pav. Energijos išteklių sunaudojimas šilumos gamybai 1A scenarijuje	55
4.4 pav. Energijos išteklių sunaudojimas šilumos gamybai 1B scenarijuje.....	56
4.5 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2A scenarijuje.....	56
4.6 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2B scenarijuje.	58
4.7 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3A scenarijuje.. ..	59
4.8 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3B scenarijuje.	60
4.9 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4A scenarijuje.....	61
4.10 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4B scenarijuje.	62
4.11 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5A scenarijuje.	63
4.12 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5B scenarijuje.	64
4.13 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5C scenarijuje.	64
4.14 pav. Šilumos gamybos savikaina	66
4.15 pav. Kuro/energijos kaštai šilumos gamyboje.....	67
4.16 pav. Elektrinių technologijų dalis šilumos gamyboje CŠT tinkle 2023–2050 m. skirtinguose scenarijuose	69
4.17 pav. Vėsumos gamybos struktūra Lietuvoje 2023-2050 m.....	70
4.18 pav. Šilumos saugyklų plėtra CŠT tinkle.	70
4.19 pav. Dieninės šilumos saugyklos veikimas ir energijos lygis 2045 m. rugsėjo mėn.	71
4.20 pav. Dieninės šilumos saugyklos veikimas ir energijos lygis 2045 m.	71
4.21 pav. Sezoninės šilumos saugyklos veikimas ir energijos lygis 2045 m.	72

Įvadas

Klimato kaita daro vis didesnę įtaką energijos vartojimui – žiemos tampa šiltesnės, o vasaros – karštesnės, dažnesni staigūs temperatūrų svyravimai, todėl kinta ir šilumos bei vėsumos poreikiai. Šie pokyčiai tiesiogiai veikia centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) sistemas, kurios ilgą laiką buvo plėtojamos remiantis gana stabilium ir prognozuojamu miestų šilumos poreikiu. Tokį poreikį lėmė urbanizacija, gyvenamųjų bei pramoninių teritorijų plėtra ir bendras energijos vartojimo augimas. Vis dėlto klimato kaita keičia šiuos vartojimo modelius, todėl šildymo ir vėsavimo poreikiai ateityje gali skirtis nuo tų, kuriais remiantis šios sistemos buvo planuojamos anksčiau.

Šiuolaikinėje energetikoje, vis didėjanti atsinaujinančių energijos išteklių dalis, energijos balanse kelia papildomų iššūkių dėl šių šaltinių generacijos nepastovumo. CŠT sistemos, integravus pažangias technologijas ir šilumos akumuliacijos sprendimus, galėtų atlikti svarbų vaidmenį palaikant elektros sistemos stabilumą, užtikrinant rezervinius pajėgumus bei energijos pertekliaus panaudojimą šilumos gamybai.

Atsižvelgiant į klimato kaitos poveikį bei energetikos sektoriaus transformaciją, vis svarbesniu tampa klausimas, kaip CŠT sistemos galėtų būti plėtojamos, kad prisitaikytų prie kintančių šilumos ir vėsumos poreikių bei prisidėtų prie energetikos sistemos balansavimo. Šios temos aktualumą lemia ir augantis atsinaujinančių energijos šaltinių svarba, ir būtinybė užtikrinti visos energetikos sistemos patikimumą.

Tikslas – išanalizuoti centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų plėtros galimybes ir kryptis, atsižvelgiant į klimato kaitos poveikį bei įvertinti šių sistemų galimybes prisidėti prie elektros sistemos balansavimo.

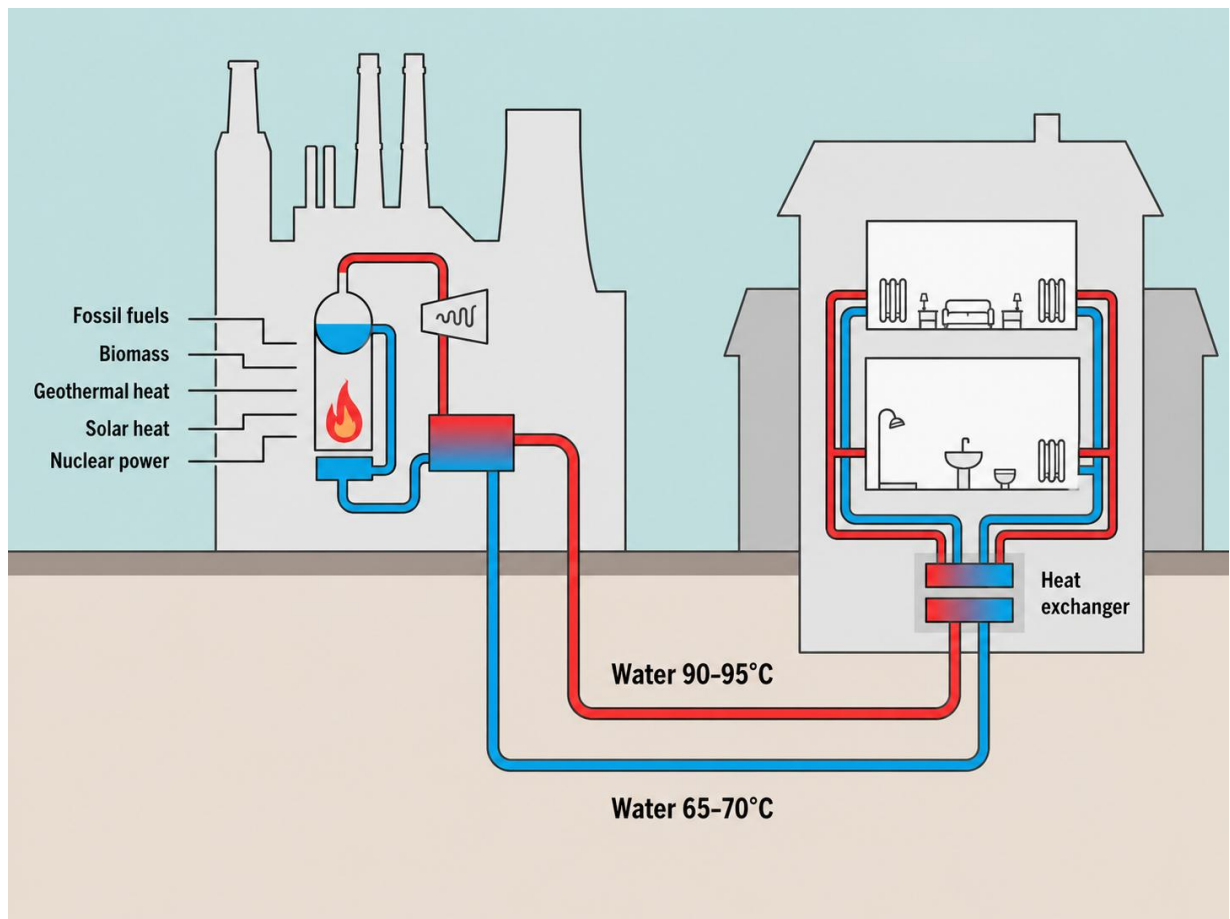
Uždaviniai:

1. išnagrinėti centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų raidos tendencijas Lietuvoje ir Europoje, taikomas šilumos bei vėsumos gamybos ir kaupimo technologijas bei jų galimybes prisidėti prie elektros energetikos sistemos balansavimo;
2. įvertinti klimato kaitos poveikį šilumos ir vėsumos poreikių struktūrai ir dinamikai ilgalaikėje perspektyvoje;
3. sukurti tyrimo metodiką ir matematinį modelį, skirtą centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemos raidai analizuoti klimato kaitos kontekste;
4. atlikti Lietuvos centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemos raidos analizę, numatant pagrindinius scenarijus, technologinę plėtros dinamiką, investicijų poreikį, kuro balansą, CO₂ emisijas ir eksploatacines sąnaudas;
5. palyginti išnagrinėtų centralizuotų šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų plėtros scenarijų energetinius, ekonominius ir aplinkosauginius rodiklius;

1. Centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų raida ir situacija Lietuvoje bei Europoje

1.1. Centralizuoto tiekimo sistemos

Centralizuoto šilumos tiekimo ir vėsumos tiekimo (CVT) sistemos yra vienos iš efektyviausių ir tvariausių miestų energetinio aprūpinimo sprendimų. Šios sistemos užtikrina šilumos tiekimą iš vieno arba kelių centralizuotų šaltinių į gyvenamuosius, komercinius ar pramoninius pastatus. Centralizuotas šildymas ir vėsinimas siūlo daugybę privalumų, tokių kaip energijos efektyvumas, mažesnė tarša ir išlaidų taupymas, be to leidžia išnaudoti įvairių šaltinių šilumą ar vėsą – nuo kogeneracijos, pramonės perteklinės šilumos, atliekų deginimo, iki šilumos siurblių ar atsinaujinančių energijos šaltinių – ir tiekti ją pastatams per izoliuotus vamzdžius [1].



1.1 pav. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos veikimo schema. Šaltinis: [2]

1.1.1. Centralizuoto šilumos tiekimo privalumai

Miestai sunaudoja daugiau nei 70 % visos pasaulyje pagaminamos energijos ir yra atsakingi už 40 – 50 % visų šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų. Daugelyje miestų šildymas ir vėsinimas sudaro reikšmingą – net iki pusės – visos energijos suvartojimo dalį. Vienas iš veiksmingiausių būdų mažinti emisijas ir pirminės energijos poreikį yra modernių, mažai anglies dioksido išskiriančių ir klimato kaitos poveikiui atsparių centralizuotų energijos sistemų plėtra [3].

Pagrindiniai centralizuotų šilumos tiekimo sistemų privalumai [1].

- Dėl centralizuotos gamybos masto pasiekiamas ekonomiškumas, kuris lemia mažesnes energijos tiekimo sąnaudas vartotojams.
- Efektyvus pramonės procesų ar elektros gamybos metu susidaranti perteklinė šilumos panaudojimas, kuri kitu atveju būtų iššvaistyta.
- Dėl aukšto energijos vartojimo efektyvumo ir atsinaujinančių išteklių integracijos sumažinamos CO₂ emisijos.
- Nebelieka poreikio įrengti atskirų šildymo ar vėsinimo sistemų kiekviename pastate.
- Eliminavus individualius šilumos gamybos įrenginius, sumažėja gaisro rizika.

Centralizuotas šildymas naudingas ne tik galutiniams vartotojams, bet ir visai visuomenei. Tokios sistemos padeda efektyviau naudoti energiją ir mažina socialines išlaidas, susijusias su tarša – pavyzdžiui, sveikatos apsaugos ir klimato kaitos padarytais nuostoliais. Jos taip pat prisideda prie elektros ir šilumos kainų mažinimo, didina pramonės konkurencingumą ir bendrą visuomenės gerovę [1].

1.1.2. Centralizuotų šildymo sistemų raida

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos perėjo keturis raidos etapus – nuo paprastų, mažai efektyvių 1-osios kartos tinklų, naudojančių garą, iki 4-osios kartos sistemų, paremtų žemos temperatūros šilumos tiekimu, atsinaujinančiais energijos šaltiniais, šilumos siurbliais, kaupimo sprendimais ir skaitmeniniu valdymu. Ši evoliucija (1.2 pav) atspindi žmonijos siekį didinti energijos vartojimo efektyvumą, mažinti CO₂ emisijas ir integruoti šilumos tiekimą į tvarią energetikos sistemą.

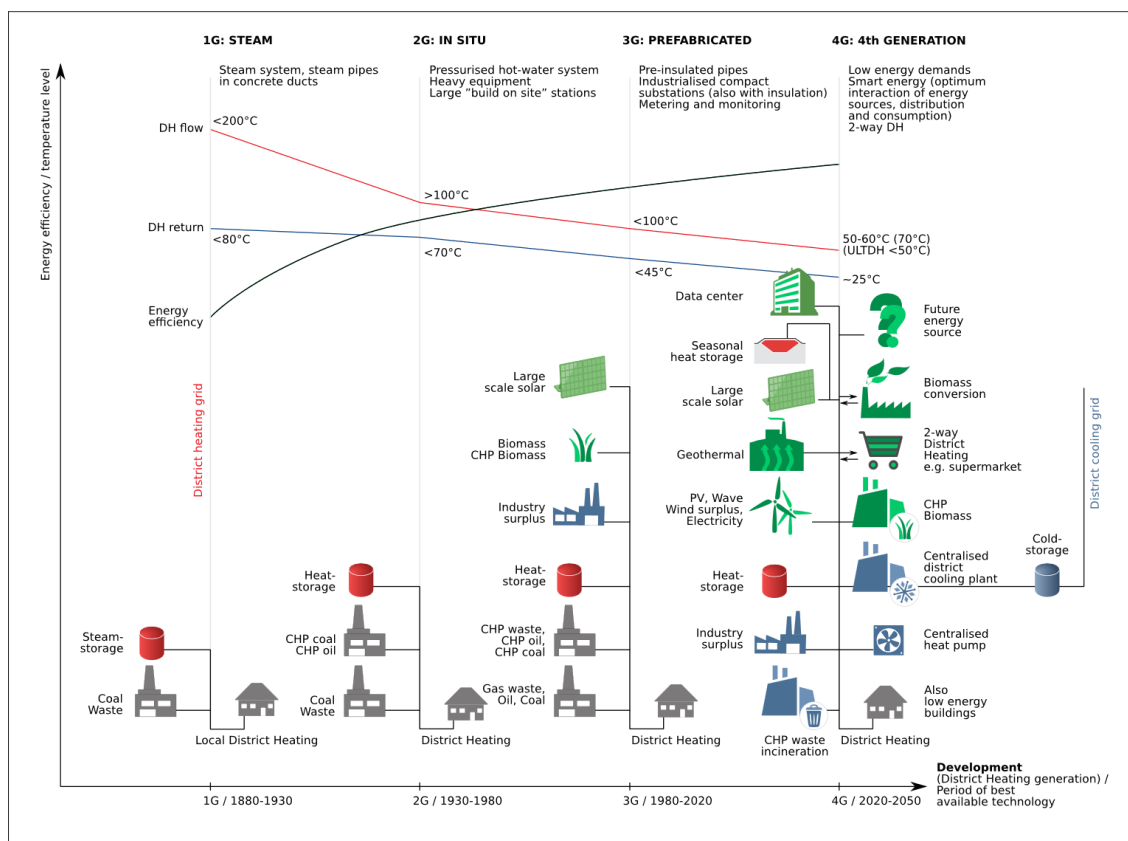
Pirmoji karta atsirado 1880 m. ir naudojo garą kaip šilumos nešiklį. Sistemos buvo grindžiamos anglies deginimu, veikė aukštu slėgiu ir temperatūra, tačiau buvo neefektyvios bei kėlė patikimumo ir saugumo problemų. Nors ši technologija jau pasenusi, kai kur – pavyzdžiui, Niujorke ar Paryžiuje – vis dar yra naudojama [4].

Antroji karta pradėta plėtoti 1930 m. Šiluma buvo perduodama naudojant karštą vandenį (daugiau nei 100 °C) vamzdžiais, įmontuotais betoniniuose kanaluose. Šios sistemos buvo efektyvesnės nei pirmakės, dažnai buvo susietos su kogeneracinėmis elektrinėmis, degino anglį ar naftą. Plačiai paplito Rytų Europoje [4].

Trečioji karta atsirado 1980 m. Jos išskirtinumas – iš anksto izoluoti vamzdžiai, kurie tiesiami tiesiai į gruntą ir leidžia sistemai veikti žemesnėje nei 100 °C temperatūroje. Kadangi sistema atsirado po naftos krizių, energijos šaltiniai buvo diversifikuoti – naudota biomasė, atliekos, geoterminė bei saulės šiluma [4].

Ketvirtoji karta pradėta plėtoti kaip atsakas į klimato kaitą 2020 m. Šios sistemos veikia itin žemoje temperatūroje (paprastai iki 50–70 °C) ir yra orientuotos į maksimalią atsinaujinančių energijos išteklių – saulės, geoterminės bei perteklinės šilumos – integraciją. Siekiant prisitaikyti prie nepastovios atsinaujinančių šaltinių generacijos (ypač vėjo ir saulės), itin svarbiais tampa šilumos kaupimo sprendimai. Didelio našumo šilumos siurbliai laikomi pagrindine technologija, leidžiančia šiai sistemai užtikrinti lankstumą ir efektyvumą. Vienas iš technologinių iššūkių – užtikrinti tinkamą

karšto vandens temperatūrą, kad būtų išvengta sveikatai pavojingų bakterijų, tokių kaip „legionelės“ dauginimosi [4].



1.2 pav. CŠT raida pagal kartas. Šaltinis: [5]

Lietuvoje dauguma centralizuoto šildymo sistemų priskiriamos antrajai ir trečiajai CŠT kartoms. Antrosios kartos sistemoms būdingi aukštos temperatūros ($110\text{--}150^{\circ}\text{C}$) garo arba karšto vandens tinklai, daugiausia statyti sovietmečiu. Trečiosios kartos sistemose naudojamas karštas vanduo (paprastai $90\text{--}120^{\circ}\text{C}$), o vamzdynai jau yra iš anksto izoliuoti. Šios sistemos šiuo metu vyrauja didžiuosiuose Lietuvos miestuose.

Nors technologijų pažanga leidžia pereiti prie ketvirtosios kartos sistemų, kurios pasižymi žematemperatūriu tiekimu, integruotu atsinaujinančios energijos išteklių (AEI) naudojimu, tokios sistemos Lietuvoje kol kas diegiamos tik pavienių projektų lygmeniu. Nors Lietuvos energetikos ministerijos dokumentuose [6], [7] pabrėžiama būtinybė skatinti perėjimą prie ketvirtosios kartos CŠT sistemų, integruojant saulės jėgaines ir panaudojant perteklinę bei atliekinę šilumą pastatų šildymui, tam būtina ne tik technologinė, bet tinkama ekonominė aplinka, skatinanti inovacijų diegimą šilumos ūkyje. CŠT sistemų raida rodo aiškia kryptį link tvaresnių ir efektyvesnių sprendimų. Atsižvelgiant į augantį poreikį užtikrinti komfortą ir šiltuoju metų laiku, svarbu atkreipti dėmesį ir į centralizuoto vėsinimo galimybes.

1.1.3. Centralizuotas vėsumos tiekimas ir jo raida

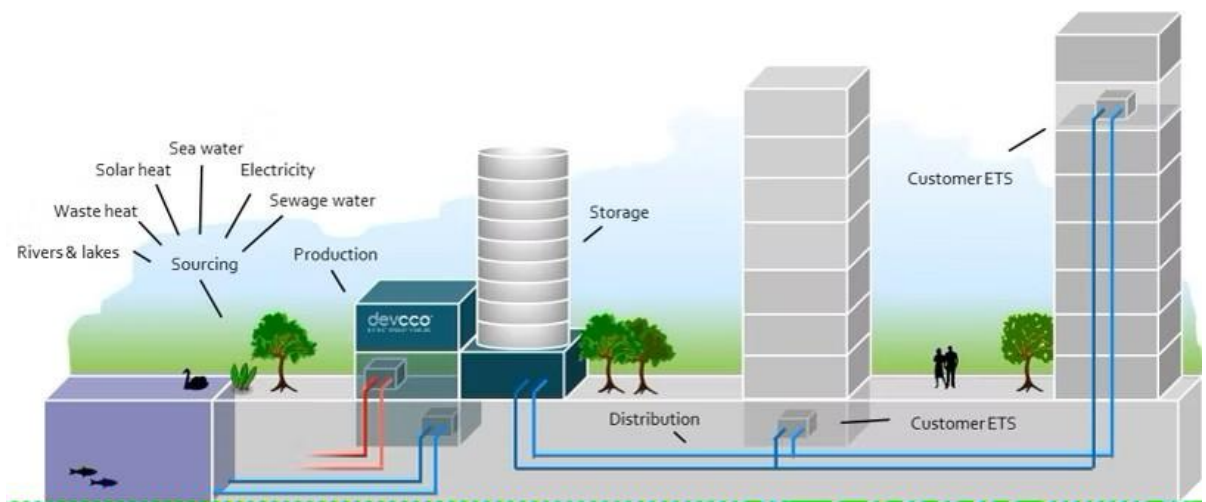
Didėjantis oro temperatūrų svyravimas ir dažnėjantys karščio bangų epizodai visame pasaulyje lemia augantį vėsinimo poreikį ne tik pietų, bet ir vidutinio klimato zonose, įskaitant Lietuvą. Pastatų

komforto užtikrinimas tampa vis aktualesnis. Įprastiniai oro kondicionieriai naudoja daug elektros energijos ir prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų. Centralizuoto vėsinimo sistemos gali pasiūlyti tvaresnę alternatyvą: jos leidžia vienoje vietoje efektyviai gaminti vėsa, naudoti energiją taupančias technologijas ir centralizuotai ją paskirstyti pastatams.

Nors centralizuoto šildymo sistemos plačiai naudojamos visame pasaulyje, centralizuoto vėsinimo sistemos rečiau taikomos vėsinimo poreikiams tenkinti. Šiuo metu jų pasaulinis metinis energijos suvartojimas siekia apie 300 petadžaulių (PJ), arba maždaug 83 TWh. Tai sudaro vos 0,048 % viso pasaulinio energijos suvartojimo [8], [9]. Vis dėlto CVT sistemos vertinamos kaip veiksmingas būdas spręsti didėjančius vėsinimo poreikius sparčiai urbanizuojamose teritorijose. Pasak [10] CVT sistemos gali naudoti iki 50 % mažiau elektros energijos nei tradiciniai pastatų oro kondicionavimo sprendimai.

Centralizuoto vėsinimo sistemos veikimo principas analogiškas centralizuotam šildymui – tik vietoje šilumos, vartotojams tiekiamas vėsa. Atvėsintas vanduo ar kita aušinimo terpė iš centrinio šaltinio perduodama keliems pastatams ar objektams tam tikroje teritorijoje [11].

Pirmoji reikšminga centralizuoto vėsinimo sistema Europoje buvo įdiegta Paryžiuje, ji aptarnauja daugelio biurų pastatų La Defense rajone. Ši sistema naudoja atšaldytą Senos upės vandenį. Kita svarbi sistema buvo integruota 1991 m. Paryžiaus centre. Sistema taip pat naudoja Senos upę kaip šilumos šalinimo įrankį ir turi didžiausią metinę šaltojo tiekimo galią tarp visų Europos centralizuoto vėsinimo sistemų – beveik 500 GWh per metus [8].



1.3 pav. Centralizuoto vėsamos tiekimo sistemos schema. Šaltinis:[12]

Centralizuoto vėsinimo sistemos gali būti pagrįstos įvairiais technologiniais sprendimais, užtikrinančiais efektyvų ir aplinkai draugišką vėsos tiekimą. Sistemos veikimas pagrįstas uždaru šalto vandens tiekimo ciklu. Pirmiausia šaltas vanduo (apie 4–7 °C) pagaminamas centrinėje vėsinimo stotyje, naudojant įvairias technologijas – kompresorinius ar absorbcinius šaldytuvus, arba pasitelkiant natūralius šaltinius, tokius kaip upių ar jūros vanduo (laisvasis vėsinimas). Šis šaltas vanduo tiekiamas į pastatus, kur atvėsina vidaus orą. Po to, kai vanduo atiduoda šaltį, jis sušyla iki 12–15 °C ir grįžta atgal į centrinę vėsinimo stotį, kur vėl atšaldomas. Be to, galima panaudoti šaldymo įrenginių perteklinę šilumą pastatams šildyti ar karštam vandeniui ruošti, taip prisidedant prie išteklių taupymo ir CO₂ emisijų mažinimo [13].

1.2. Centralizuoto tiekimo sistemos Europoje

2022 m. duomenimis apie 77,3 mln. žmonių (iš 750 mln.) Europoje naudojosi centralizuoto šildymo paslaugomis, o CŠT infrastruktūra aptarnauja apie 13 % viso šilumos poreikio Europos Sąjungoje [14]. Paminėtina, kad Švedijoje ir Danijoje šis rodiklis didesnis nei 60 %, o miestuose – siekia beveik 100 % [15].

Dauguma Europos valstybių centralizuoto šildymo ir vėsinimo sistemų plėtrą sieja su bendru energetikos sektoriaus tvarumo didinimu, pirmiausia – su augančia atsinaujinančių energijos išteklių integracija. 2020 m. duomenimis, Austrija planuoja iki 2050 m. visą šilumos tiekimą užtikrinti išskirtinai AEI pagrindu, o Lenkija ir Rumunija numato iki 2030 m. atitinkamai 21 % ir 24 % galutinio energijos suvartojimo padengti AEI. Vokietija iki 2030 m. siekia 30 % šilumos gaminti iš atliekų deginimo, Čekija iki 2040 m. planuoja 60 % šilumos poreikio padengti kogeneracijos būdu, o Suomija numato iki 2030 m. pasiekti nulinį emisijų lygį CŠT sektoriuje. Lenkijoje taip pat keliami infrastruktūros plėtros tikslai – iki 2030 m. prie centralizuoto tinklo planuojama prijungti 70 % visų namų ūkių [16].

Nepaisant ambicingų tikslų, daugelis valstybių susiduria su tam tikrais sunkumais. Vienas jų – mažėjanti šilumos paklausa, kurią lemia augantis pastatų energinis efektyvumas bei gyventojų skaičiaus mažėjimas kai kuriuose regionuose. Be to, CŠT tinklų atnaujinimas ir plėtra reikalauja didelių investicijų, kurių pritraukimą apsunkina šilumos kainų reguliavimas, pelno apribojimai bei ilgalaikio atsiperkamumo neapibrėžtumas.

Urbanistinėse zonose centralizuotas vėsinimas tampa svarbiu sprendimu, nes padeda sumažinti elektros tinklų apkrovą, kurios kyla dėl vis didėjančio oro kondicionavimo poreikio. Oro kondicionieriai paprastai sudaro 50–70% piko elektros energijos poreikio [17]. Manoma, kad beveik 20 % pasaulio elektros energijos suvartojimo skiriama vėsinimui, daugiausia naudojant oro kondicionierius ir elektrinius ventiliatorius pastatuose. Be to, prognozuojama, kad elektros energijos poreikis vėsinimui smarkiai išaugs dėl urbanizacijos, populiacijos didėjimo, klimato kaitos ir didėjančio pasaulinio pragyvenimo lygio. Prognozuojama, kad dabartinis vėsinimui skiriamas elektros energijos poreikis gali padvigubėti iki 2050 m. [18]. Centralizuotas vėsinimas leidžia sujungti kelių pastatų vėsos poreikius, pasiekiant didesnę efektyvumą ir mažinant elektros tinklo apkrovą. Tai taip pat padeda mažinti energijos išlaidas ir kuria ekonominę naudą.

Centralizuoto vėsinimo rinka auga visame pasaulyje. JAV, Persijos įlankos regione (JAE ir Saudo Arabija) ir Azijoje (Kinijoje, Singapūre, Malaizijoje ir Tailande) ši sistema sparčiai plečiasi. Net ir šaltesnėse Europos šalyse, kaip Švedija, Suomija ir Prancūzija matoma auganti plėtra, ypač viešbučiuose ir biuruose [8].

Šiaurės ir Vakarų Europos valstybės – Danija, Švedija, Suomija, Vokietija sėkmingai integruoja pažangias šildymo bei vėsinimo technologijas į miesto infrastruktūrą. Lietuva taip pat turi gerai išvystytą CŠT tinklą, tačiau centralizuoto vėsinimo sprendimai šalyje kol kas dar tik pradedami diegti – daugiausia kaip pavieniai projektai komerciniuose ar specialios paskirties pastatuose. Vis dėlto, atsižvelgiant į klimato šiltėjimo tendencijas ir didėjančią vėsinimo poreikį, tikėtina, kad ši sritis taps vis aktualesnė artimiausiais dešimtmečiais. Siekiant palyginti skirtingų valstybių patirtį centralizuoto

šildymo ir vėsinimo srityje, toliau apžvelgiami pažangiausi CŠT ir CVT pavyzdžiai keliose Europos šalyse.

1.2.1. Danijos patirtis

Danija yra viena iš pirmaujančių šalių CŠT srityje. Apie 66 % šalies namų ūkių prijungta prie CŠT sistemos [19]. 75 % šalies centralizuoto šildymo sistemos aprūpinama iš atsinaujinančių išteklių [20]. Šalies energetikos strategija siekia visiškai nepriklausomumo nuo iškastinio kuro iki 2050 m., o CŠT sistemos atlieka svarbų vaidmenį šio tikslo siekime. Vienas iš Danijos centralizuoto šildymo ypatumų – plačiai diegiamos didelės apimties saulės šilumos sistemos, derinamos su sezoniniu šilumos kaupimu.

Be sezoninio šilumos kaupimo technologijų, saulės energija paprastai patenkina apie 5–8 % metinio šilumos poreikio. Tačiau taikant paros šilumos kaupimą, šis rodiklis gali išaugti iki 20–25 %. Svarbus proveržis saulės šilumos integracijoje pasiekiamas naudojant sezonines šilumos saugyklas, kurios leidžia vasaros metu sukauptą energiją naudoti šaltuoju metų laiku. Tokiu būdu galima padidinti saulės energijos dalį CŠT sistemoje iki 30–50 % ekonomiškai pagrįstomis sąnaudomis [21]. Tokių sprendimų diegimas sudaro sąlygas reikšmingai sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro bei padidinti sistemų lankstumą. Šiuo metu pasaulyje veikia 17 centralizuotų saulės šildymo sistemų su sezoninėmis požeminėmis šilumos saugyklomis (angl. *PTES – Pit Thermal Energy Storage*): 7 iš jų yra Danijoje, 6 – Vokietijoje, o likusios – Švedijoje ir Kinijoje [22].

Danijoje centralizuoto vėsinimo sektorius yra ankstyvos plėtros stadijoje, tačiau jau veikia keli strategiškai svarbūs tinklai. Vienas jų- nuo 2009 m. šalyje veikiantis HOFOR valdomas centralizuoto vėsinimo tinklas, kurio veikimas paremtas tuo pačiu principu kaip CŠT, tačiau tiekia šaltį. Vėsinimui naudojamas jūros vanduo, kuris per uždara ciklą tiekia jūros vandenį į aušinimo sistemą, o iš jų- vartotojams. Centralizuotas vėsinimas naudojamas komerciniuose pastatuose, bankuose, viešbučiuose, muziejuose. Šiuo metu HOFOR tiekia daugiau kaip 100 MW centralizuotos vėsos, aptarnaudamas apie 3 mln. m² patalpų. Centralizuotu vėsinimu jau aprūpinami keli Kopenhagos rajonai [23].

1.2.2. Švedijos patirtis

Švedija yra išsikėlusį ambicingą tikslą – visiškai dekarbonizuoti centralizuoto šildymo sistemas iki 2030 m., o iki 2050 m. pasiekti neigiamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas [24]. Šiuo metu centralizuotas šildymas Švedijoje aprūpina 60 % bendro šilumos poreikio, o miestuose ši dalis siekia beveik 100 % [25]. 1970-aisiais Švedija buvo viena labiausiai nuo naftos priklausomų pramoninių valstybių pasaulyje. Tačiau nuo to laiko priklausomybė nuo naftos naudojimo šildymui ir elektros gamybai sumažėjo net 96,5 %. Nuo 1990 m. Švedija taiko CO₂ emisijos mokestį, kuris paskatino atsisakyti iškastinio kuro ir paspartino AEI integraciją. Tuo pat metu, nuo 1990 iki 2017 m., šalies BVP padidėjo 78 %, o šilumos sektoriaus CO₂ emisijos sumažėjo net 90 % [26].

Švedijos patirtis rodo, kad ankstyvas sprendimas investuoti į vietinius, atsinaujinančius ir efektyvius šilumos tiekimo šaltinius padėjo ne tik sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro, bet ir sukurti

ilgalaike, tvarią energetinę infrastruktūrą. Didelę Švedijos centralizuoto šildymo sistemų sėkmę lemia ne tik politiniai sprendimai ar kuro struktūra, bet ir kruopščiai apgalvotas projektavimo procesas. Sprendimų priėmimas dažnai prasideda nuo atliekamos šilumos šaltinių identifikavimo – pramonės procesų, elektros jėgainių, nuotekų vandens, sąvartynų dujų, biodujų iš nuotekų valymo įrenginių ar komunalinių atliekų. Šilumos siurbliai dažnai naudojami kaip universalus sprendimas tiek šildymui žiemą, tiek vėsinimui vasarą – tokiu būdu tas pats įrenginys išnaudojamas visus metus [26].

Energijos gamybai Švedija plačiai naudoja biomasę, geoterminę, saulės šiluminę energiją, o taip pat atliekų deginimą. Tik apie 1 % komunalinių atliekų šiuo metu patenka į sąvartynus – likusios yra perdirbamos arba naudojamos atliekų energijai gaminti [27]. Švedijoje vis dažniau taikoma trigeneracija – tai elektros, šilumos ir vėsumos gamyba vienu metu. Šis sprendimas laikomas vienu iš efektyviausių ir ekologiškiausių prieinamų energijos tiekimo būdų [28].

Centralizuotas vėsinimas Švedijoje pradėtas diegti tik 1990 m., tačiau šiuo metu jis jau veikia 42 miestuose. 2020 m. duomenimis bendras tinklų ilgis siekė 660 km, o perduodamos vėsos kiekis – 1TWh per metus. Vėsa tiekama pastatuose, prekybos centruose, taip pat duomenų centruose. Dvi didžiausios centralizuotos vėsos sistemos veikia Stokholme ir Geteborge. Stokholmo tinklas – vienas didžiausių Europoje – 2020 m. turėjo 270 MW galią, 250 km ilgio vamzdynų tinklą ir per metus patiekė 335 GWh vėsos. [24].

1.2.3. Suomijos patirtis

Suomija yra viena iš lyderiaujančių šalių Europoje, kurios anksti įgyvendino strategiją atsisakyti iškastinio kuro šilumos gamybos sektoriuje. 2025 m. šalis uždarė paskutinę veikiančią anglimi kūrenamą elektrinę, tai atspindi jos ryžtingus tikslus pereiti prie švaresnių energijos šaltinių [29].

Centralizuotas šildymas yra labiausiai paplitusi šildymo forma Suomijoje. 2020 m. duomenimis apie 46 % gyvenamųjų ir komercinių pastatų turi centralizuotą šilumos tiekimą. Miestuose – 85 % daugiabučių prijungta prie CŠT sistemos [30]. Iškastinis kuras jau kurį laiką nėra konkurencingas kuro šaltinis šilumos gamyboje. 2022 m. prasidėjusi energetikos krizė, susijusi su karo padariniais ir kuro importo iš Rusijos nutraukimu, dar labiau padidino iškastinio kuro kainas [30]. 2024 m. duomenimis, atsinaujinantys energijos šaltiniai ir atliekų šiluma sudarė 73 % visos centralizuotai tiekiamos šilumos [31]. Suomija tapo viena iš pažangiausių šalių diegiančių dekarbonizuotas šilumos gamybos technologijas centralizuoto šildymo sistemoje. Helsinkyje statomas didžiausias pasaulyje šilumos siurblys, kuris galės aprūpinti šiluma apie 30000 namų ūkių [32].

Centralizuotos vėsumos sektorius taip pat sparčiai vystosi: 2024 m. vėsos pardavimai išaugo 20 % lyginant su ankstesniais metais. Vėsos gamyboje dominavo šilumos siurbliai 67 %, vėsinimas iš natūralių šaltinių 25 % ir kompresoriniai aušintuvai 8 % [31].

1.2.4. Vokietijos patirtis

Vokietijos šildymo sektorius išgyvena struktūrinę transformaciją, kuriai įtaką daro tiek ES klimato politika, tiek ekonominiai veiksniai. 2024 m. duomenimis, daugiau nei 50 % pastatų Vokietijoje šildomi naudojant gamtines dujas, o atsinaujinančios energijos sprendimai, tokie kaip šilumos

siurbliai ar centralizuotas šildymas – sudaro mažesnę dalį [33], [34]. Centralizuotas šildymas atlieka svarbų vaidmenį Vokietijos šilumos sektoriaus transformacijoje ir pereinant prie klimatui neutralios energetikos. Nors šiuo metu tik apie 14 % visų pastatų šalyje yra prijungti prie CŠT tinklų, tačiau 30% centralizuotos šilumos pagaminama iš atsinaujinančių išteklių arba atliekinės pramonės šilumos, o bendroje šilumos rinkoje, klimato požiūriu, neutralios energijos dalis siekia tik 13 % [35].

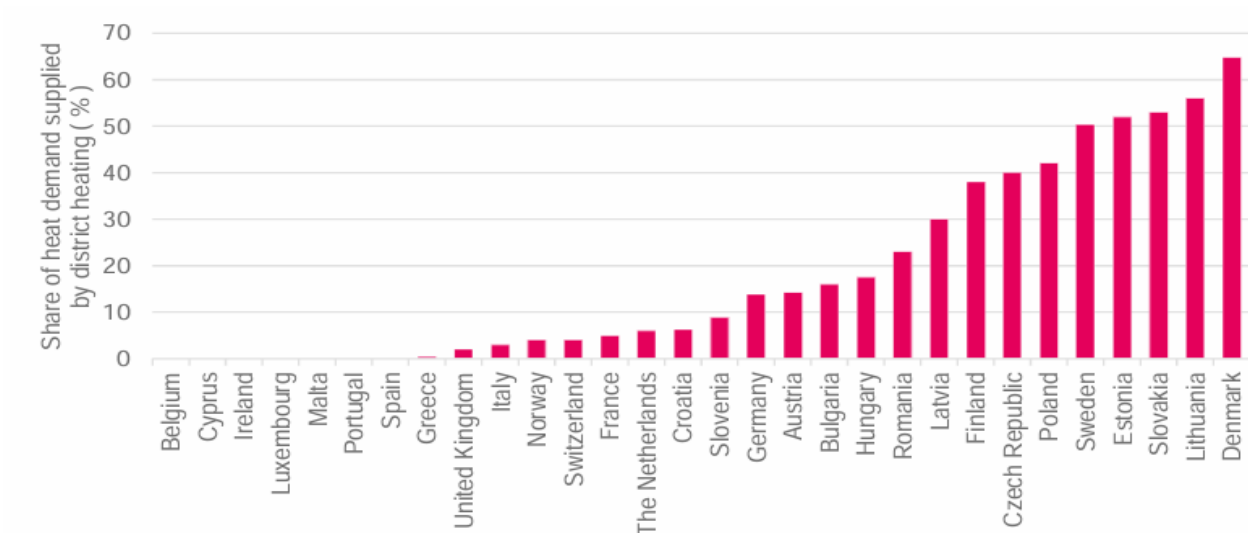
1.2.5. Ispanijos patirtis

Ispanijoje centralizuoto šildymo ir vėsinimo sistemų išvystymas šiuo metu yra labai ribotas, tačiau turi potencialą plėstis. Didžioji dalis šildymo ir vėsinimo poreikio šalyje tenkinama individualiais sprendimais, o centralizuotos sistemos sudaro tik nedidelę rinkos dalį. 2019 m. Ispanijoje buvo 426 centralizuoto šilumos/ vėsamos tiekimo tinklai, iš kurių 374 skirti tik šildymui, 36 – mišriam tiekimui (šiluma ir vėsa), 4 – tik vėsinimui. Nors CVT sudaro mažiau nei 1 % šalies vėsinimo rinkos, Barselonoje 2023 m. pradėtas įgyvendinti pasaulyje unikalus projektas, kuriame centralizuotai tiekiamą vėsa gaminama naudojant suskystintų gamtinių dujų (SGD) regazifikacijos proceso šalčio perteklių. Ši sistema, turinti 18 MW galią ir tiekianti apie 131 GWh vėsos per metus, leidžia aprūpinti apie 150 000 gyventojų bei padeda išvengti apie 32 000 tonų CO₂ emisijų. Šis projektas yra pirmasis pasaulyje, kuriame SGD regazifikacijos proceso šalčio perteklius naudojamas miesto CVT tinkle.

1.3. Lietuvos centralizuoto tiekimo sistemos Europos kontekste

Norint įvertinti Lietuvos centralizuoto šilumos ir vėsamos tiekimo sistemų išvystymo lygį, tikslinga jį palyginti su kitų Europos šalių pasiekimais. Lietuvoje CŠT sistemos yra viena svarbiausių energetikos sektoriaus dalių – šildymas centralizuotai tiekiamas apie 53 % visų šalies pastatų, o miestuose ši dalis siekia apie 76 % [7]. Tokie rodikliai rodo aukštą CŠT tinklo išvystymo lygį, ypač lyginant su kai kuriomis Vakarų Europos valstybėmis [36].

Remiantis 2.1 pav. pateiktu grafiku, galima pastebėti reikšmingus skirtumus tarp Europos šalių pagal tai, kokia dalis gyvenamojo sektoriaus šilumos poreikio tenkinama centralizuoto šildymo sistemomis. Danijoje šis rodiklis siekia apie 65 %, Lietuvoje, Slovakijoje ir Estijoje – virš 50 %. Tuo tarpu Belgijoje, Graikijoje ar Portugalijoje CŠT aprėptis yra mažesnė nei 5 %. Šie skirtumai atspindi skirtingas šalių klimatinės sąlygas, istoriškai susiformavusias energetikos strategijas, infrastruktūros išvystymo lygį bei politinius prioritetus šilumos tiekimo srityje.



1.4 pav. CŠT dalis namų ūkių sektoriaus šilumos poreikyje. Šaltinis: [16, 37]

1.4. Centralizuoto vėsinimo plėtra Lietuvoje

Nors Lietuva turi gerai išvystytą centralizuoto šildymo tinklą, centralizuoto vėsinimo tiekimo (CVT) sistemos šalyje dar tik pradeda formuotis. Tai iš dalies susiję su iki šiol buvusių nedidelių vėsinimo poreikiu bei ribotu technologiniu pasirengimu, tačiau klimato kaita ir didėjantis komforto poreikis skatina šios srities augimą. 2021 m. Vilniuje buvo įgyvendintas pirmasis pilotinis projektas – centralizuoto vėsinimo sistema, įdiegta Vilniaus šilumos tinklų iniciatyva [38]. Ši sistema naudoja absorbcinius šilumos siurblius, leidžiančius vienu metu gaminti tiek šilumą, tiek vėsą. Projektas padeda sumažinti energijos sąnaudas ir CO₂ emisijas, nes leidžia efektyviau naudoti esamą infrastruktūrą. Kaune taip pat veikia keli pavieniai centralizuoto vėsinimo sprendimai. Tarp jų – Nemuno salos Mokslo muziejus, Krepšinio namai bei daugiabutis gyvenamasis namas miesto centre. Šie objektai naudoja pažangias technologijas, atitinkančias šiuolaikinius energinio efektyvumo reikalavimus [39]. Nors šiuo metu CVT sistemų mastas Lietuvoje nedidelis, jų atsiradimas rodo, kad technologinė bazė egzistuoja, o susidomėjimas šiuo sprendimu auga – ypač verslo sektoriuje. Ateityje galima tikėtis spartesnės plėtros, ypač urbanizuotose teritorijose.

1.5. Duomenų apibendrinimas: CŠT ir CVT situacija Europoje

Ankstesniuose poskyriuose aptarta, kaip skirtingose Europos šalyse vystosi centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemos. Siekiant aiškiau palyginti pagrindinius rodiklius, žemiau pateikiama apibendrinanti lentelė. Joje nurodoma CŠT aprėptis ir CVT plėtros tikslai kiekvienoje šalyje.

1.1 lentelė. Centralizuoto šilumos ir vėsinimo tiekimo apžvalga Europos šalyse

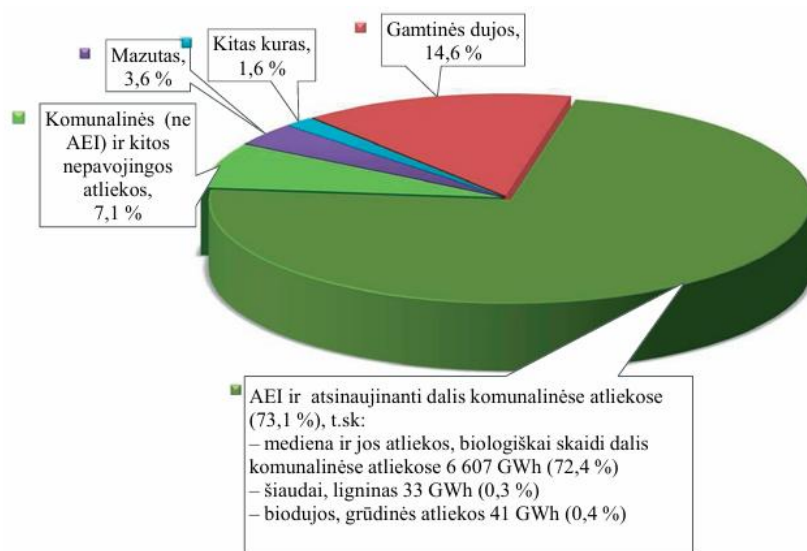
Šalis / regionas	CŠT dalis (% nuo šilumos poreikio ar namų ūkių)	CVT raida ir tikslai
Europos Sąjunga	13 % ES vidurkis šilumos poreikio [14]	Auganti plėtra

Šalis / regionas	CŠT dalis (% nuo šilumos poreikio ar namų ūkių)	CVT raida ir tikslai
Švedija	60 % šilumos poreikio (miestuose ~100 %) [22]	18.4 % 42 miestai, 1 TWh/metus, 270 MW Stokholme [23], prognozuojama CVT dalis 25% iki 2030 m. [40]
Danija	66 % namų ūkių [17]	Ankstyva stadija, HOFOR: 100 MW, 3 mln. m ² [18]
Austrija	tikslas – 100 % AEI iki 2050 m. [16]	Nedidelė dalis, bet plečiama. CVT augimas nuo 2009 m. padidėjo 7 kartus [40]
Lenkija	40 % namų ūkių prijungti prie CŠT, tikslas – 21 % AEI iki 2030 m. [16]	Nėra duomenų
Rumunija	24 % AEI iki 2030 m. [16]	Nėra duomenų
Vokietija	14 % šilumos poreikio, 30 % šilumos iš AEI / atliekinės [31]	Vystoma palaipsniui [33]
Čekija	41% namų ūkių. 60 % šilumos iš kogeneracijos iki 2040 m. [16]	Nėra duomenų
Suomija	46 % poreikio (miestuose – 85 %) [8]	14,8 % [31]
Lietuva	53 % visų pastatų (miestuose – 76 %) [41]	Pilotiniai projektai Vilniuje, Kaune; CVT verslo sektoriuje
Prancūzija	6 % šilumos poreikio, 62,6 % AEI [42]	11,2 % 0.81 TWh/metus vėsos. 1400 pastatų.
Ispanija	<5% šilumos poreikio, 80% AEI [43]	<1%, vykdoma plėtra [40]

1.6. Lietuvos centralizuoto šilumos/ vėsumos tiekimo sistemų esamos situacijos apžvalga

Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektorius yra vienas iš labiausiai išvystytų regione. Remiantis Lietuvos šilumos tiekėjų asociacijos duomenimis, centralizuoto šilumos tiekimo sistemos Lietuvoje aprūpina daugiau nei 50 % visos šilumos poreikio, o miestuose ši dalis siekia apie 76 % pastatų [41].

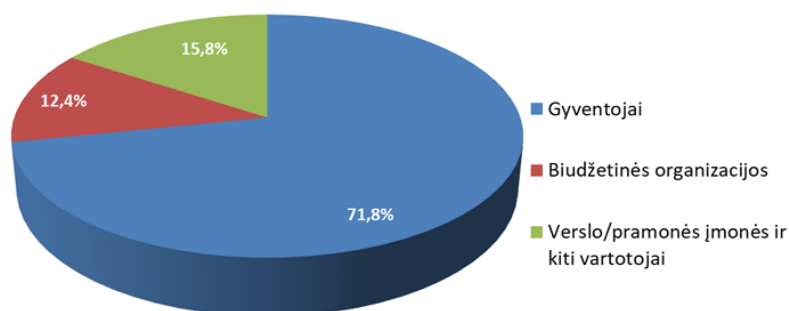
Pagal 1.5 pav. pateiktą diagramą šilumos gamyboje Lietuvoje dominuoja biokuras, kuris 2022 m. sudarė daugiau nei 70 % visos centralizuotai pagamintos šilumos. Daugiausiai- medžio skiedros ir granulės. Kadangi biokuras laikomas atsinaujinančiu šaltiniu, ši kuro struktūra atitinka Europos žaliojo kurso tikslus, tačiau kitų atsinaujinančių energijos išteklių integracija dar nėra išvystyta.



1.5 pav. Pirminio kuro sudėtis centralizuotos šilumos gamyboje. Šaltinis [41]

Šilumos tiekėjų asociacijos duomenimis 2023 m. bendras centralizuotai perduotos šilumos kiekis Lietuvoje siekė 6,7 TWh [41]. Didžiausi šilumos vartotojai yra Vilniaus ir Kauno miestai – jų bendra šilumos paklausa sudarė apie 3,88 TWh, likę miestai – 2,85 TWh. 73.1 % šilumos buvo pagaminta iš biokuro ir atsinaujinančių atliekų, 7,1 % – iš likusių komunalinių atliekų, 14,6 % – iš gamtinių dujų, 3,6 % – iš mazuto.

Maksimalus CŠT sistemų Lietuvoje galios poreikis siekė 3 020 MW žiemos metu ir 400MW vasaros sezono metu [44]. Pagrindiniai centralizuotai teikiamos šilumos vartotojai- namų ūkiai. 2021 metais namų ūkiai suvartojo 72% CŠT sistemų teikiamos šilumos, biudžetinės organizacijos – 12 %, verslo/pramonės organizacijos – 16 %.



1.6 Pav. Šilumos vartotojų struktūra. Šaltinis: [41]

Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo infrastruktūra yra kompleksinė ir apima platų šilumos gamybos, perdavimo bei kuro rūšių spektrą. Analizuojant duomenis apie Vilnių, Kauną ir kitus šalies miestus, galima išskirti kelias pagrindines technologines grupes.

Pagal 2023 metų duomenis, Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemose dominuoja biokuro ir dujų katilai. Didžiausią įrengtą šiluminę galią turi dujų/mazuto katilai – bendra jų galia siekia 2426 MW, iš jų 1690 MW Vilniuje ir Kaune. Dujiniai katilai taip pat sudaro reikšmingą dalį – 2243 MW (724 MW Vilniuje ir Kaune), bei biokuro katilai 1745 MW, iš jų 557 MW įrengti Vilniuje ir Kaune. Atliekų termofikacinių elektrinių bendra šiluminė galia siekia 225 MW, iš kurių 140 MW įrengta Vilniuje ir Kaune. Skysto kuro katilai sudaro 492 MW (10 MW Vilniuje ir Kaune), o kito kuro pagrindu veikiančių katilų galia siekia 192 MW. Be to, šalyje veikia biokuro termofikacinės elektrinės, kurių bendra įrengta šiluminė galia sudaro 326 MW, iš jų 264 MW Vilniuje ir Kaune. Vilniuje veikia ir vienintelis absorbcinis šilumos siurblys, kurio galia siekia 9 MW, tačiau kituose miestuose šis sprendimas kol kas netaikomas. Šie duomenys leidžia manyti, kad Lietuva jau turi tvirtus pagrindus CŠT sektoriaus dekarbonizacijai – didžioji dalis šilumos pagaminama iš biokuro, o augantis atliekų ir kogeneracijos įrenginių naudojimas rodo technologinę pažangą.

1.2 lentelė. Centralizuotos šilumos gamybos technologijos Lietuvoje*

Technologija	Bendra įrengta galia Lietuvoje (MW)	Iš jų Vilniuje ir Kaune (MW)	Kituose miestuose (MW)
Dujų/mazuto katilai	1923,87	1187	736,87
Dujiniai katilai	2299	780	1519
Biokuro katilai	1630,88	442,88	1188
Skysto kuro katilai	492,58	10,03	482,55
Kito kuro katilai	194	2,5	191,5
Atliekų termofikacinės elektrinės	225	140	85
Biokuro termofikacinės elektrinės	345	255	90

*Lentelėje 1.2 pateikti duomenys apie centralizuotos šilumos gamybos technologijas Lietuvoje yra autorės surinkti iš įvairių viešai prieinamų šaltinių, tokių kaip: Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos (VERT) ataskaitos, AB „Ignitis grupė“, AB „Kauno energija“, AB „Vilniaus šilumos tinklai“ ir kitų šilumos tiekėjų vieši dokumentai, Šilumos tiekėjų asociacijos ataskaitos, Energetikos ministerijos viešai pateikta informacija bei Lietuvos energetikos instituto (LEI) turimi duomenys. Duomenys buvo atrinkti, apibendrinti ir suklasifikuoti pagal technologijų tipus bei bendrą įrengtą galią Lietuvoje, išskiriant Vilniaus ir Kauno miestus. Autorė atsakingai įvertino šaltinių patikimumą siekdama, kad pateikiami skaičiai būtų kiek įmanoma tikslesni. Duomenų surinkimas - svarbi autorės darbo dalis, prisidedanti prie temos analizės pagrįstumo.

1.3 lentelėje pateikti pagrindiniai skirtingų centralizuotame tiekime naudojamų technologijų parametrai. Įtrauktos šilumos gamybos, šilumos siurblių bei šilumos energijos kaupimo technologijos. Lyginami tokie kriterijai kaip tarnavimo ir statybos laikotarpis, investicinės bei eksploatacinės išlaidos, naudingo veikimo koeficientas ir sistemos parengtis pagal laiką. Šie rodikliai yra svarbūs vertinant technologijų ekonominį efektyvumą, patikimumą bei tinkamumą įvairiems centralizuoto tiekimo plėtros scenarijams.

1.3 lentelė. Esamų šilumos gamybos technologijų techninių – ekonominių parametrų [45], [46], [47], [48] palyginimas

Technologija	Tarnavimo laikas (m.)	Statybos laikas (m.)	Investicijos (eur/kW)	Fiksuoti kaštai (eur/kW/yr)	Kintami kaštai (eur/kW/yr)	Naudingo veikimo koef. (%)		Parengties koef. pagal laiką
						Elektr.	Šil/Vės	
Biokuro TE	25	3	3500	149	42	28,2	82,7	0,93
Atliekų TE	25	2,5	10400	411	227	22,7	79,2	0,95
Biokuro katilai	25	2	450	5	1,75	-	87	0,93
Biokuro kat su ekonomazeriu	20	2	600	44	22	-	108	0,93
Dujų/mazuto katilai	25	1	120	2	2,6	-	90	0,9
Skysto kuro katilai	25	1	120	2	2,6	-	90	0,9
Dujų katilai	30	0,5	60	1	1,75	-	95	0,9
Dujų katilai su ekonomazeriu	25	0,5	130	2,5	2	-	105	0,9

Lyginant duomenis matyti, kad tradicinės termofikacinės technologijos, naudojančios biokurą ar atliekas, pasižymi ilgu tarnavimo laiku (apie 25 metus), tačiau jų investicinės sąnaudos yra gerokai didesnės, nei kitų technologijų. Dujų ar skysto kuro katilai yra greitai įrengiami, investicijos yra žymiai mažesnės, tačiau priklausomybė nuo iškastinio kuro daro juos mažiau patrauklius ilgalaikėje perspektyvoje.

1.7. Perspektyvios technologijos

2024 m. atnaujintoje Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje (NENS) iškelti ambicingi tikslai transformuoti Lietuvos energetikos sektorių į klimatui neutralią, konkurencingą ir visiškai energetiškai nepriklausomą sistemą iki 2050 metų [6]. Strategijoje numatoma, kad šalis visą reikalingą energiją pasigamins iš vietinių atsinaujinančių šaltinių, o perteklinę energiją eksportuos. Siekiama sparčiai vystyti žaliojo vandenilio pramonę, saulės ir vėjo elektrinių pajėgumus bei modernią branduolinę energetiką. Viena iš strateginių kryptių taip pat išlieka efektyvus centralizuotas šilumos tiekimas, kuriame akcentuojama aukšto naudingumo kogeneracinių jėgainių, atliekinės ir atsinaujinančios šilumos bei šilumos kaupimo technologijų plėtra. Šios kryptys sudaro pagrindą pereiti prie pažangių technologinių sprendimų, tokių kaip didelio galingumo šilumos siurbliai ir išmanūs energijos valdymo modeliai, kurie gali užtikrinti tiek šilumos tiekimo efektyvumą, tiek klimato kaitos švelninimo tikslų įgyvendinimą. Iki 2050 m. prognozuojamas reikšmingas elektros vartojimo augimas dėl visapusiškos energetikos sektoriaus elektrifikacijos.

1.7.1. Šilumos siurbliai

Vienas iš pažangiausių sprendimų centralizuoto šildymo srityje yra didelio galingumo šilumos siurbliai. Jie leidžia prijungti prie šildymo sistemos atsinaujinančius arba žemos temperatūros šilumos šaltinius. Ši technologija leidžia efektyviai panaudoti paviršinius vandenius (upes, ežerus, jūros vandenį), valymo įrenginių nuotekas bei pramonės perteklinę šilumą. Didelio galingumo

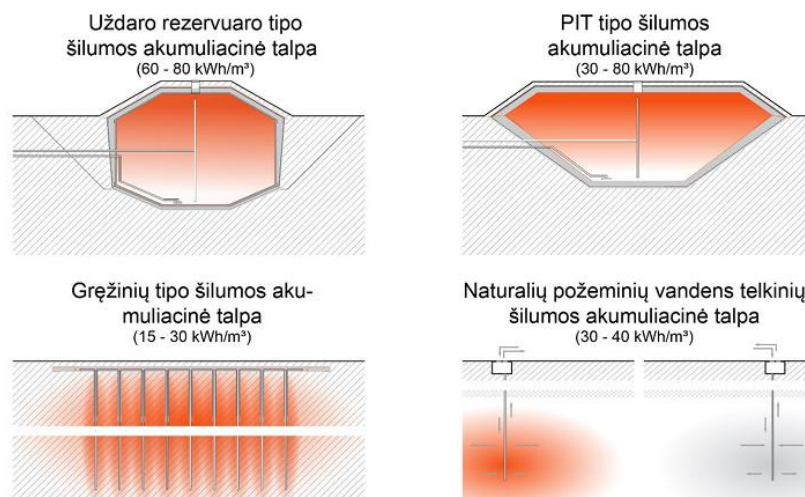
šilumos siurbliai efektyviausiai veikia derinami su šilumos kaupimo įrenginiais, kurie leidžia subalansuoti elektros tinklo apkrovas ir šilumos poreikio svyravimus. 2022 m. atliktame socioekonominiame tyrime, kuriame buvo modeliuojami trys galimi Baltijos šalių šilumos tiekimo ateities scenarijai iki 2050 metų, nustatyta, kad plačiai diegiant didelio galingumo šilumos siurblius, šilumos kaupimo įrenginiai tampa būtina sistemos dalimi, leidžiančia užtikrinti tiekimo patikimumą ir lankstumą net esant žemoms aplinkos temperatūroms [49].

1.7.2. Šilumos kaupimas

Šilumos kaupimo technologijos leidžia kaupti perteklinę šilumą, kai jos gamyba viršija poreikį, ir panaudoti ją vėliau, kai poreikis padidėja. Tai padeda subalansuoti gamybą ir vartojimą, padidina sistemos lankstumą bei leidžia integruoti daugiau atsinaujinančių energijos išteklių. Ateityje šilumos kaupimo įrenginiai gali padėti sumažinti poreikį įrengti labai galingus šilumos gamybos įrenginius, kurie reikalingi tik šildymo sezono piko metu [49]. Didelio galingumo šilumos siurbliai, naudojami kartu su šilumos kaupimo įrenginiais, yra svarbūs norint efektyviai mažinti į atmosferą išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį. Šilumos kaupimas gali būti trumpalaikis arba sezoninis.

Trumpalaikis kaupimas- nuo kelių valandų iki dienos, skirtas išlyginti paros šilumos poreikio svyravimus. Įprasti trumpalaikiai šilumos akumuliaciniai įrenginiai- gerai izoluoti vandens rezervuarai, kuriuose temperatūra paprastai neviršija 100 °C.

Sezoninis kaupimas gali kaupti perteklinę šilumą vasarą ir naudoti ją žiemos metu. Yra keturi pagrindiniai sezoninių šilumos kaupimo talpyklų tipai, kurie per pastaruosius dešimtmečius buvo sukurti ir išbandyti praktikoje.



1.7 pav. Sezoninių šilumos kaupimo talpyklų tipai. Šaltinis: [4]

Pagrindiniai sezoninio kaupimo technologiniai tipai: uždaro rezervuaro, duobinio, gręžinių ir požeminių vandens telkinių. Šie technologiniai sprendimai skiriasi savo konstrukcija, efektyvumu, įkrovimo ir iškrovimo galimybėmis. Taip pat kiekvienam technologiniam tipui keliami skirtingi reikalavimai aplinkos ir sistemos sąlygoms – pavyzdžiui, skirtingi tinkami grunto tipai ar temperatūros lygiai. Kiekvienu atveju, norint nuspręsti, kuris talpyklos tipas tinkamiausias, reikia

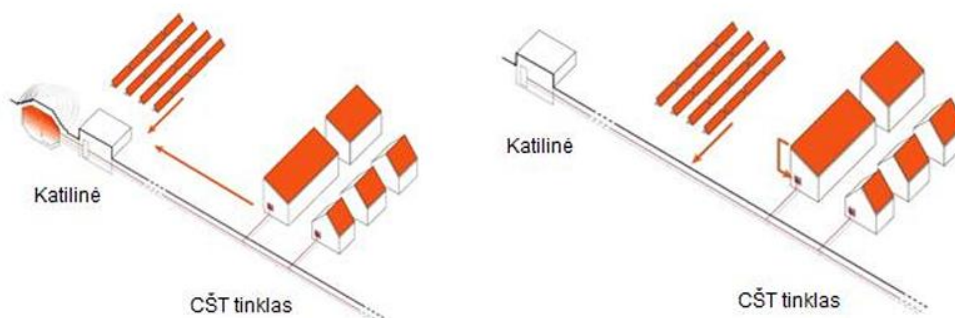
atlikti techninę ir ekonominę analizę, atsižvelgiant į konkrečios vietos sąlygas bei šilumos sistemos poreikius [4].

Vienas žymiausių sezoninio šilumos kaupimo pavyzdžių – Vojens mieste Danijoje įrengta duobinio tipo šilumos saugykla, kurios tūris siekia apie 203 000 m³, o bendra šilumos talpa viršija 10 000 MWh. Ji integruota su 37 MW galingumo saulės kolektorių lauku, kuris kartu su anksčiau veikusia 13 MW sistema sudaro vieną didžiausių pasaulyje saulės šilumos gamybos kompleksų. Sezoninė saugykla leidžia padidinti saulės šilumos dalį bendrame tiekime nuo 25 % iki 55–60 %, reikšmingai sumažinant iškastinio kuro naudojimą [50].

Nors sezoninės šilumos saugyklos teoriškai yra ypač patrauklios dėl galimybės efektyviai kaupti perteklinę šilumą vasarą ir naudoti ją žiemą, jų diegimas praktikoje išlieka labai ribotas. Vieno kW investicinės sąnaudos gali būti palyginti nedidelės, tačiau visos sistemos įrengimo kaina – reikšminga, nes norint pasiekti realų sezoninį efektą, būtina itin didelė talpa (tūkstančiai ar net dešimtys tūkstančių kWh). Be to, tokioms sistemoms reikia didelio sklypo ploto ir tinkamų geologinių sąlygų. Prie šių iššūkių prisideda ir tai, kad Lietuvoje kol kas trūksta praktinės patirties, bei kvalifikuotų specialistų, galinčių įgyvendinti tokio tipo projektus nuo projektavimo iki eksploatacijos.

1.7.3. Saulės kolektoriai

Saulės kolektoriai vis plačiau taikomi centralizuoto šildymo sistemose, nes leidžia tiekti atsinaujinančią, CO₂ emisijų nesukeliančią šilumą tiesiai į šilumos tinklus. Kolektoriai dažniausiai montuojami ant žemės ar pastatų stogų, o generuojama šiluma integruojama į tinklą centralizuotai – per katilines, arba decentralizuotai – tiesiai į šilumos tiekimo sistemą (1.8 pav.).



1.8 pav. Saulės kolektorių integracija į CŠT tinklą. Šaltinis: [4]

Saulės kolektorių sistemų pajėgumai gali siekti iki 100 MW, o tinkamai suprojektavus sistemą, jos gali pagaminti iki 20 % metinio šilumos poreikio. Naudojant sezoninius šilumos kaupimo įrenginius, ši dalis gali būti padidinta iki 50 % [4]. Saulės kolektorių gaminama šiluma yra patraukli ir aplinkai draugiška technologija, tačiau šiuo metu Lietuvoje nėra įgyvendintų veikiančių projektų, kuriuose saulės kolektoriai būtų pilnai integruoti į centralizuoto šildymo sistemą, tačiau Lietuvos energetikos strategijoje numatyta didinti atsinaujinančios energijos dalį CŠT sistemose.

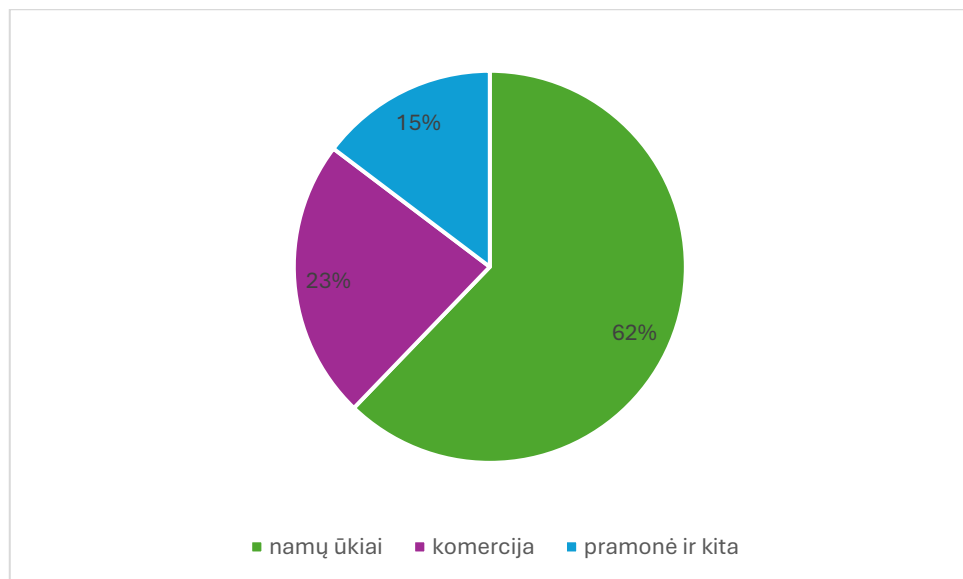
Pažangių CŠT technologijų, tokių kaip šilumos siurbliai, šilumos kaupikliai ar atsinaujinančių energijos šaltinių integracija, diegimas reikalauja didelių pradinių investicijų. Pavyzdžiui, šilumos siurbliai dažniausiai kainuoja daugiau nei tradiciniai iškastinio kuro katilai, nors jų eksploatacinės

sanaudos ilguoju laikotarpiu yra mažesnės. Vis dėlto daugelyje šalių šių investicijų atsiperkamumas yra per lėtas. Dėl to šilumos tiekėjams kyla didesnė finansinė rizika, o be papildomų paskatų ar valstybės paramos, šios technologijos dažniausiai nėra diegiamos plačiu mastu.

1.8. Šilumos/vėsumos poreikių struktūra

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemų apkrova pasižymi sezonine dinamika, kuri priklauso nuo vartotojų sektoriaus. Tipiškai skiriami trys pagrindiniai vartotojų segmentai – namų ūkiai, paslaugų/komerciniai pastatai bei pramonės objektai. Kiekviename iš jų šilumos poreikio kitimas metų bėgyje yra skirtingo pobūdžio.

Remiantis Lietuvos šilumos tiekėjų duomenimis, 2022 m. centralizuoto šilumos tiekimo sistemose vartotojai iš viso suvartojo apie 8,6 TWh šiluminės energijos. Didžiausi šios energijos vartotojai buvo namų ūkiai, kurių suvartojimas sudarė apie 62,2 % – t. y. apie 5,322 TWh. Likusią dalį sudarė komerciniai ir pramoniniai vartotojai.



1.9 Pav. CŠT energijos suvartojimas pagal sektorius. Šaltinis: [51]

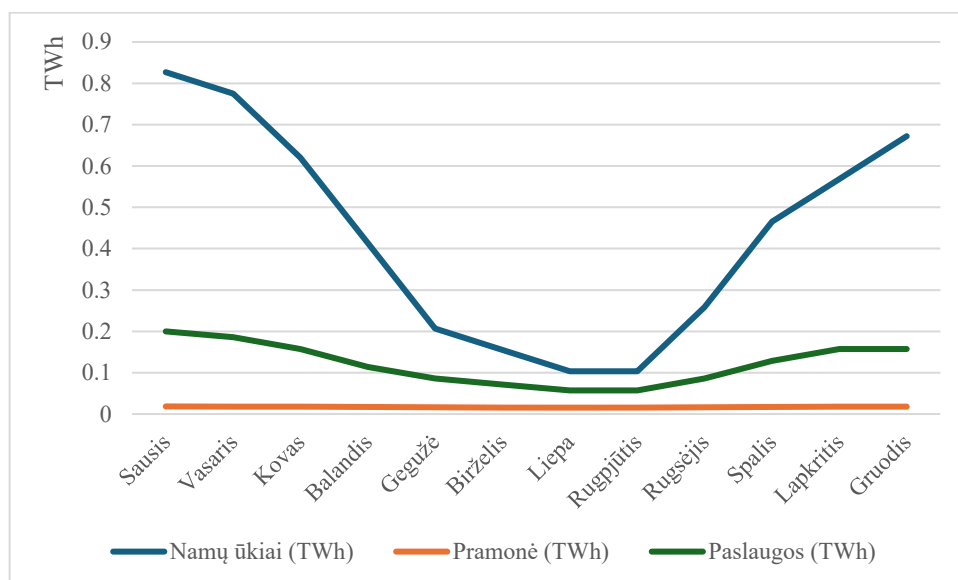
Namų ūkiai yra labiausiai sezoniškai kintanti vartotojų grupė. Žiemos mėnesiais (gruodis – vasaris) suvartojama apie 15–17 % viso metinio šilumos poreikio per mėnesį, o vasaros mėnesiais (birželis – rugpjūtis) – 2–4 % per mėnesį. Karštam buitiniam vandeniui ruošti šiluma reikalinga visus metus. Apie 10–15 % metinio namų ūkių CŠT poreikio tenka karšto vandens ruošimui. Vasarą, kai patalpų šildymas nereikalingas, karšto vandens poreikis sudaro beveik visą šilumos suvartojimą namų ūkių sektoriuje.

Komercinis/paslaugų sektorius pasižymi sezoniniu, bet švelnesniu šilumos poreikio svyravimu nei gyvenamieji pastatai. Be to, komercinių pastatų šilumos poreikis kinta priklausomai nuo darbo dienų ir savaitgalių: didžiausias poreikis būna darbo valandomis (8–18 val.), o savaitgaliais ir naktimis – reikšmingai sumažėja.

Pramonės sektoriaus šilumos poreikis paprastai yra mažiau sezoniškas. Nors dalis šilumos naudojama patalpų šildymui, didesnė dalis skiriama technologiniams procesams, kurie veikia visus metus. Todėl mėnesinis suvartojimas čia yra gan tolygus, o karšto vandens poreikis paprastai įtrauktas į bendrą procesų šilumos poreikį arba yra nereikšmingas.

1.4 lentelė. CŠT energijos suvartojimas pagal sektorius ir mėnesius*

Mėnuo	Namų ūkiai (TWh)	Pramonė (TWh)	Paslaugos (TWh)	Iš viso (TWh)
Sausis	0,8269	0,0184	0,1999	1,0452
Vasaris	0,7752	0,018	0,1856	0,9788
Kovas	0,6202	0,0175	0,1571	0,7948
Balandis	0,4134	0,0171	0,1142	0,5448
Gegužė	0,2067	0,0167	0,0857	0,3091
Birželis	0,1550	0,0159	0,0714	0,2424
Liepa	0,1034	0,0155	0,0571	0,1760
Rugpjūtis	0,1034	0,0159	0,0571	0,1764
Rugsėjis	0,2584	0,0163	0,0857	0,3604
Spalis	0,4651	0,0171	0,1285	0,6108
Lapkritis	0,5685	0,0175	0,1571	0,7431
Gruodis	0,6718	0,0180	0,1571	0,8469
Viso	5,1680	0,2039	1,4565	6,8287



1.10 Pav. CŠT sektoriaus sezoninis kitimas*

* Kadangi oficialūs mėnesiniai šilumos suvartojimo duomenys pagal sektorius Lietuvoje nėra viešai prieinami, šiame darbe (Lentelėje 1.4 ir paveiksle 1.10) naudojami autorės sudaryti supaprastinti šilumos poreikio paskirstymo koeficientai, remiantis literatūriniais šaltiniais, viešais apkrovos duomenimis ir klimato analizėmis. Paskirstymo logika paremta tipine šildymo sezono trukme Lietuvoje, dienolaipsnių šildymui dinamika, taip pat Lietuvos šilumos tiekėjų asociacijos (LŠTA) duomenimis apie apkrovos pokyčius metų bėgyje.

Pateiktoje lentelėje ir grafike parodytas supaprastintas šilumos suvartojimo metų bėgyje paskirstymas pagal sektorius – namų ūkių, paslaugų ir pramonės.

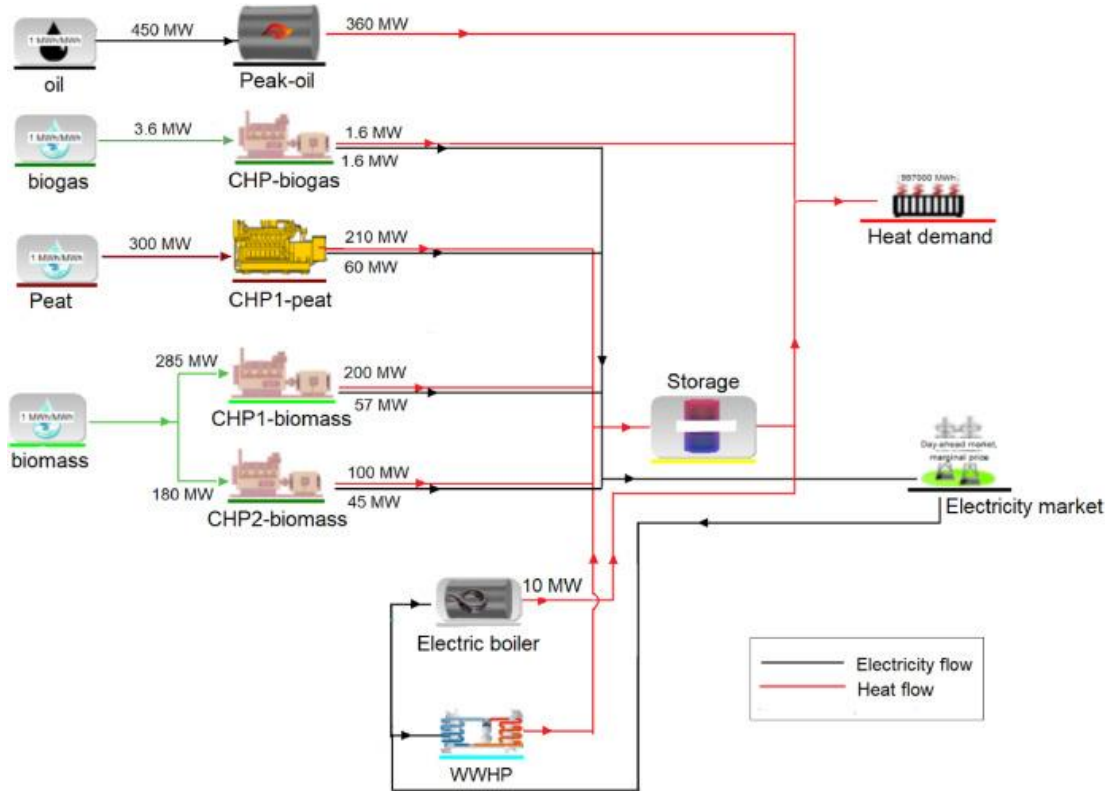
1.9. CŠT vaidmuo elektros sistemos balansavime

Mažėjantis šilumos poreikis gali padėti perorientuoti centralizuoto šilumos tiekimo tinklus, kad jie atliktų ne tik šilumos tiekimo funkciją, bet ir energetinės sistemos balansavimo funkciją. Atsižvelgiant į augantį atsinaujinančių išteklių vaidmenį energijos gamyboje ir siekį pereiti prie „žaliosios“ energetikos modelio, atsiranda problema, kaip panaudoti elektros perteklių, ypač kai generacija iš saulės ir vėjo viršija momentinį poreikį. Vienas iš sprendimų – „energija į šilumą“ technologija (angl. *power-to-heat*), kai perteklinė elektra naudojama šilumai gaminti. CŠT sistemos gali tapti šios technologijos dalimi, pavyzdžiui, naudojant didelio galingumo šilumos siurblius ar elektrinius katilus, integruotus į centralizuotus šilumos tinklus. Šis sprendimas leistų efektyviai panaudoti atsinaujinančios energijos perteklių, mažintų elektros tinklų apkrovą ir skatintų visos energetikos sistemos lankstumą bei sinergiją tarp elektros ir šilumos sektorių [52], [53].

Viena iš technologinių priemonių, didinančių centralizuoto šilumos tiekimo sistemų lankstumą, yra šilumos kaupimas. Didelio tūrio akumuliacinės talpos leidžia atskirti šilumos gamybos momentą nuo jos vartojimo, tai svarbu, nes energijos gamyba tampa vis labiau priklausoma nuo nepastovių atsinaujinančių šaltinių. Šiluma gali būti pagaminama kai elektros energijos kainos yra mažos arba kai fiksuojamas AEI perteklius elektros tinkle, o vėliau panaudojama pagal poreikį.

Šilumos kaupimo technologijos Švedijos CŠT sistemose jau plačiai naudojamos šilumos tiekimo sistemos veiklos efektyvinimui, tačiau jų potencialas padėti balansuoti elektros gamybos tinklą, vis

dar lieka neišnaudotas. Tai aktualu ir Lietuvai, kur vystantis saulės ir vėjo energetikai, šilumos kaupimo sprendimai gali tapti svarbia grandimi tarp gamybos ir paklausos.



1.11 pav. Lanksti centralizuoto šilumos tiekimo schema su *Power-to-Heat* technologijomis ir šilumos kaupikliu. Šaltinis: [54]

1.11 pav. Vaizduoja lankščią centralizuotos šilumos tiekimo sistemą, kurioje keli skirtingi šilumos šaltiniai sujungti su *Power-to-heat* technologijomis – elektriniu katilu ir šilumos siurbliu. Kai elektros kaina rinkoje žema arba atsiranda AEI generacijos perteklius, elektros energija nukreipiama į šiuos įrenginius, verčiant ją šiluma ir jei reikia, kaupiant šilumos talpykloje. Šilumos talpykla leidžia atskirti šilumos gamybos momentą nuo vartojimo ir padeda patenkinti sistemos šilumos poreikio pikus arba sumažinti apkrovas katilams. Schemoje raudonos rodyklės žymi šilumos srautus, juodos – elektros srautus. Jie gali būti valdomi pagal dienos – išankstinės rinkos signalus, taip sudarydami sąlygas CŠT tinklui teikti lankstumo paslaugas elektros sistemai.

2. Klimato kaitos scenarijai ir jų įtaka centralizuoto tiekimo sistemoms

2.1. Klimato kaitos prognozės

Klimato kaitos prognozės Lietuvai yra glaudžiai susijusios su pasaulinėmis socialinėmis ir ekonominėmis tendencijomis – šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų augimu ar mažėjimu, gyventojų skaičiaus pokyčiais, miškų ploto dinamika ir valstybių pastangomis mažinti pramoninę taršą. Lietuvoje, kaip ir visame pasaulyje, prognozėms taikomi keturi pagrindiniai RCP (angl. *Representative Concentration Pathways*) scenarijai: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 ir RCP 8.5. Šie scenarijai apibūdina galimus šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracijos pokyčius atmosferoje iki 2100 m [55].

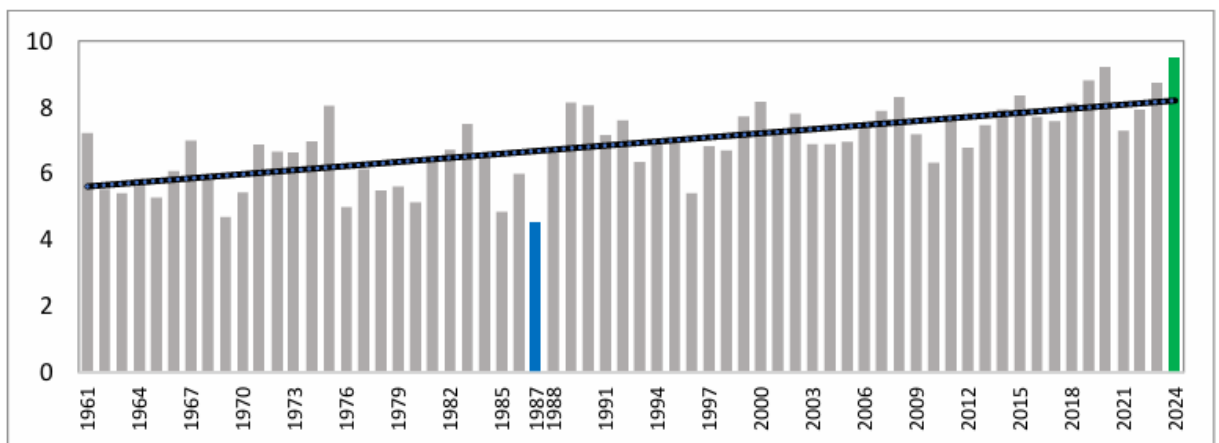
RCP 2.6 yra optimistiškiausias scenarijus, kuriame pasaulis sparčiai mažina emisijas, pereina prie švarios energetikos ir taiko anglies dioksido šalinimo technologijas. Numatomas klimato atšilimas – iki ~1,5 °C lyginant su prieš industrinio laikotarpio vidutine temperatūra, kas atitinka Paryžiaus susitarimo tikslus. Tačiau šis scenarijus laikomas mažai tikėtiniu, nes reikalauja skubių ir plataus masto pokyčių.

RCP 4.5 – tai vidutinio stabilizavimo scenarijus, kuriame emisijos pasiekia piką apie 2040 m., o vėliau mažėja dėl įgyvendinamų politikos priemonių. Šiuo atveju atšilimas siektų apie 2,5–3 °C.

RCP 6.0 – apibūdina švelnaus augimo kelią, kur emisijos mažėja lėčiau, klimato politika taikoma ribotai, o atšilimas viršija 3 °C.

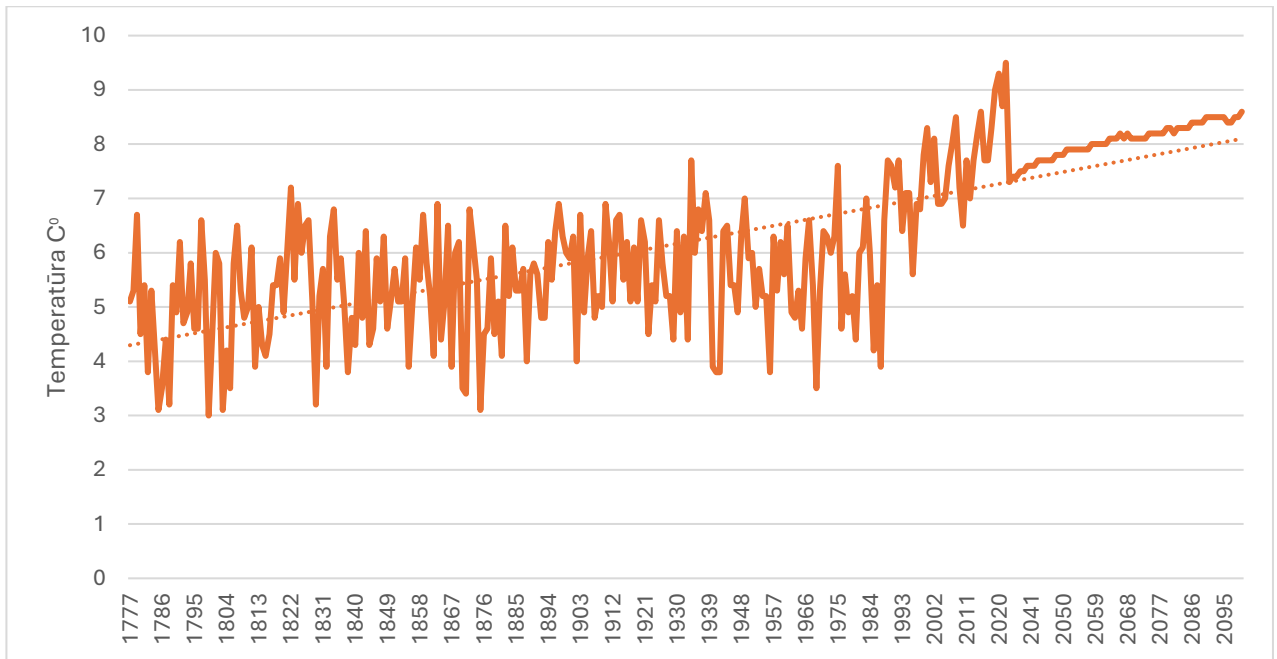
RCP 8.5 – vadinamas pesimistiniu scenarijumi, kai emisijos toliau sparčiai auga, o klimato politika yra neveiksminga. Prognozuojamas atšilimas virš 4 °C iki 2100 metų. Šis scenarijus padeda įvertinti galimus ekstremalius klimato kaitos padarinius.

Lietuvoje vidutinė metinė oro temperatūra nuo prieš industrinio laikotarpio (1850–1900 m.) iki šių dienų pakilo apie 2 °C. Pavyzdžiui, Vilniuje 1799 m. vidutinė metinė oro temperatūra buvo 3 °C, o 2020 m. siekė 9 °C . Tai rodo, kad per daugiau nei du šimtmečius temperatūra padidėjo apie 6 °C [56].



2.1 Pav. vidutinė metinė temperatūra Lietuvoje 1961 m.- 2024 m. Šaltinis: [57]

Pasauliniu mastu 2024 m. buvo šilčiausi per visą stebėjimų istoriją ir pirmą kartą perkopė 1.5 °C ribą (lyginant su prieš industriniu laikotarpiu). Nors tai vieneri metai ir formaliai dar neprieštaruoja ilgalaikiam ES tikslui, šis faktas rodo didėjančią pavojų, kad dabartinės klimato politikos ir strategijos gali būti nepakankamos ilgalaikiams tikslams pasiekti.



2.2 Pav. Lietuvos metinės oro temperatūros raida ir prognozės pagal RCP 4.5 scenarijų (1777–2100 m.)[56], [58]*

2.2 Pav. pavaizduotas ilgalaikės metinės oro temperatūros kitimo laiko atžvilgiu tendencija. Oranžinė linija pažymėti tikrieji metiniai vidutinės temperatūros duomenys, o punktyrinė linija – temperatūros ilgalaikė tendencija. Šis grafikas iliustruoja aiškų oro temperatūros augimą.

*Metiniai temperatūros duomenys nuo 1777 metų buvo gauti iš Lietuvos energetikos instituto (LEI) turimų archyvinių šaltinių bei Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos interneto svetainės. Nuo 2024 metų pateikiamos prognozuojamos temperatūros, parengtos pagal klimato kaitos scenarijų RCP 4.5, taip pat remiantis Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenimis.

2.2. Klimato kaitos poveikis šilumos ir vėsumos poreikiams

Pastaraisiais dešimtmečiais stebimas nuolatinis klimato šiltėjimas Europoje, kuris lemia ne tik aplinkos pokyčius, bet ir poveikį energijos vartojimo struktūrai. Remiantis *Copernicus* klimato kaitos tarnybos ataskaita [59], paskutiniai aštuoneri metai buvo šilčiausi per visą matavimo istoriją. Vidutinė oro temperatūra Europos žemyno šalyse kyla greičiau nei pasaulio vidurkis. Šis šiltėjimas veikia šildymo ir vėsinimo poreikių dinamiką: trumpėja šildymo sezonai, tačiau stipriai auga poreikis vėsinimui vasaros metu.

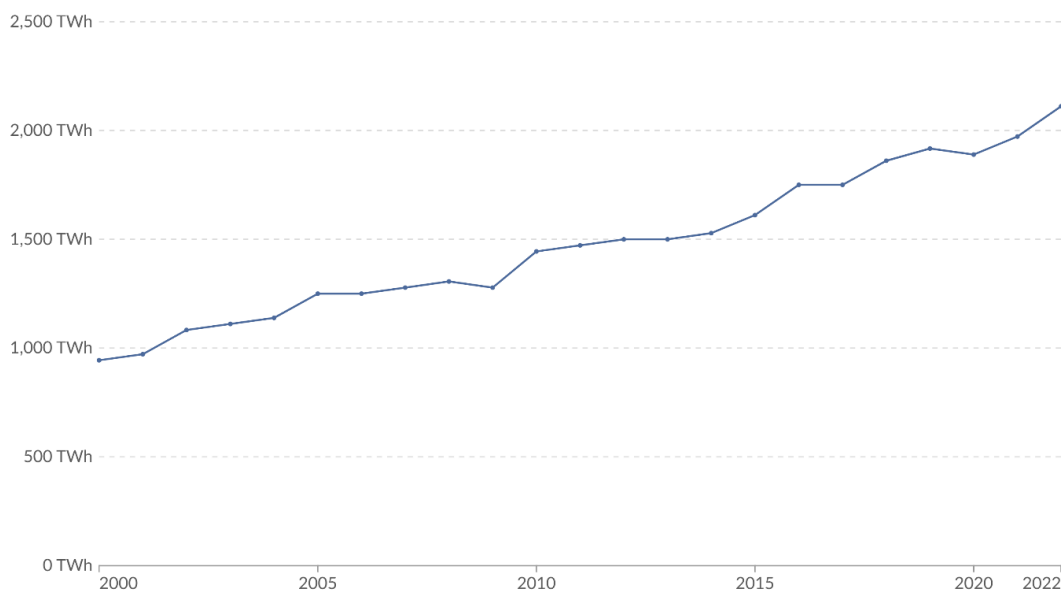
Reaguodama į šiuos pokyčius, Europos Sąjunga siekia radikaliai mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas ir stabdyti klimato kaitą. *Žaliojo kurso* tikslas – iki 2050 m. tapti klimatui neutralia ekonomika. Energetikos sektorius, kuris sudaro apie 75 % visų ES šiltnamio efektą sukeliančių emisijų, yra viena pagrindinių transformacijos sričių. Atsinaujinančių energijos išteklių diegimas, pastatų renovacija ir išmaniųjų šildymo bei vėsinimo sistemų plėtra yra pagrindinės priemonės

klimato kaitos poveikiui mažinti. Šilumos tiekimo ir vartojimo pokyčių analizė tampa svarbi ne tik energijos taupymo ar efektyvumo kontekste, bet ir kaip aplinkosaugos politikos dalis, siekiant sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro ir prisitaikyti prie besikeičiančių klimato sąlygų [59].

Klimato kaita tiesiogiai veikia pastatų šildymo ir vėsinimo poreikių struktūrą. Šiltėjantis klimatas lemia šildymo sezono trumpėjimą, tačiau tuo pačiu auga vėsinimo poreikis vasaros metu. Tai patvirtina tyrimas [60], kuriame buvo modeliuojamas A+ klasės gyvenamojo pastato energijos poreikis skirtinguose Europos miestuose, tarp jų – ir Vilniuje. Remiantis tyrimo rezultatais, prognozuojant klimato kaitos poveikį, vėsinimo poreikis Vilniuje išaugo 65 %, palyginti su dabartinėmis klimato sąlygomis, o šildymo poreikis sumažėjo nežymiai. Tai rodo, kad net vidutinio klimato zonoje esančiose šalyse, tokiose kaip Lietuva, didėja tikimybė jog pastatų vėsinimas gali tapti dominuojančiu energijos vartojimo komponentu vasaros mėnesiais. Be to, nors vėsinimui skirtas energijos kiekis šiuo metu vis dar mažesnis už šildymo poreikį, jo augimo dinamika yra ženkliai spartesnė. Toks pokytis yra svarbus planuojant tiek centralizuoto šildymo ir vėsinimo sistemų plėtrą, tiek energijos balansavimo infrastruktūrą ateityje. Tyrime taip pat pažymima, kad auganti vėsinimo paklausa gali kelti problemų elektros tinklams, ypač jei energija bus gaunama iš neatsinaujinančių šaltinių arba nebus diegiami efektyvūs ir tvarūs energijos sprendimai [60].

Šiuo metu pasaulyje naudojama apie 2 milijardus oro kondicionavimo įrenginių. Oro kondicionavimas sudaro apie 7 % pasaulio elektros energijos suvartojimo ir 3 % CO₂ emisijų. Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) duomenimis nuo 2000 m., pasaulinis elektros energijos poreikis oro kondicionavimui daugiau nei padvigubėjo per 22 metus. IEA prognozė rodo, kad iki 2050 m. šis skaičius gali beveik patrigubėti – viršyti 5,5 milijardo oro kondicionavimo įrenginių [61].

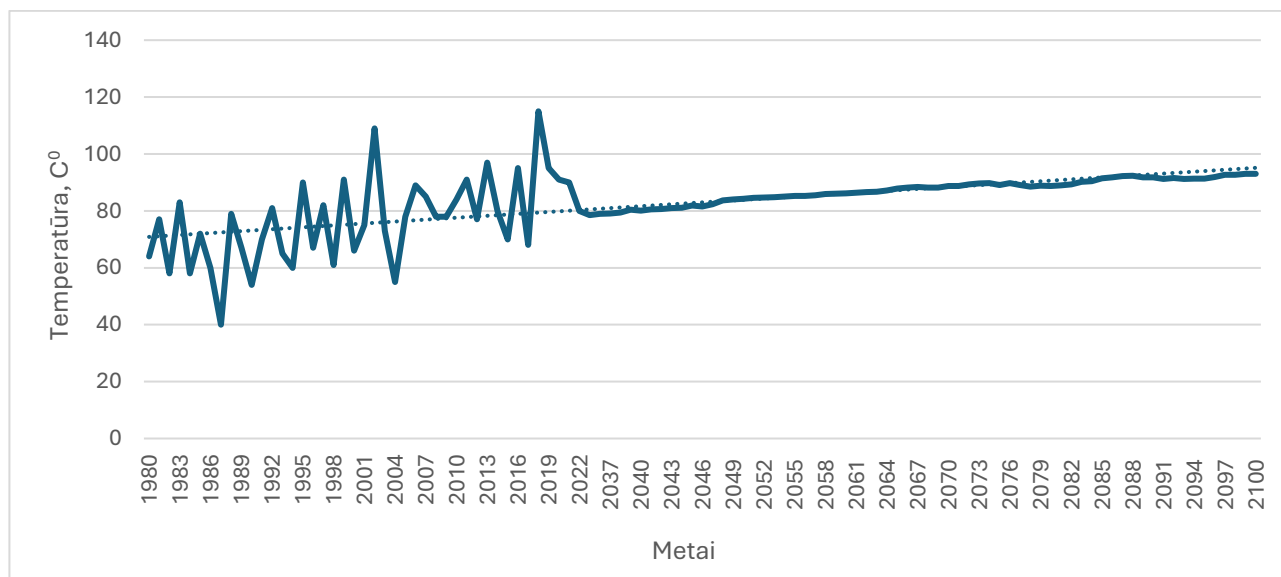
Trumpėjantis šildymo sezonas mažina metinį šilumos poreikį, ypač namų ūkių sektoriuje, kuris yra pagrindinis CŠT naudotojas. Augantis vėsinimo poreikis gali lemti naujus iššūkius vasaros metu – ypač jei naudojami individualūs kondicionieriai.



2.3 pav. Pasaulinis elektros energijos suvartojimas oro kondicionavimui. Šaltinis:[61]

Remiantis EPSO-G užsakymu DNV parengta ataskaita „Lithuania energy system transformation to 2050“ (Lietuvos energetikos sistemos transformacija iki 2050 m.) [62] faktinis energijos sunaudojimas vėsinimui 2020 m. Lietuvoje siekė 0,6–0,7 TWh per metus, naudojant decentralizuotus elektros pagrindu veikiančius įrenginius. Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje nurodoma, kad teorinis metinis vėsinimo energijos poreikis Lietuvoje gali siekti 5–6 TWh [6].

2.4 pav. grafike vaizduojamas dienų per metus skaičius, kai vidutinė oro temperatūra pasiekia ar viršija 15 °C. Istoriniai (1980–2022 m.) valandiniai oro temperatūros duomenys paimti iš šaltinio [63], o ateities prognozės – iš šaltinio [55]. „Numatomas vėsinimo dienų, kai vidutinė temperatūra viršija 15 °C, skaičiaus padidėjimas. Vidutiniškai Lietuvoje šis rodiklis iki šimtmečio pabaigos nuo dabartinių 78 dienų padidės 2–4 savaitėmis.“ [55]



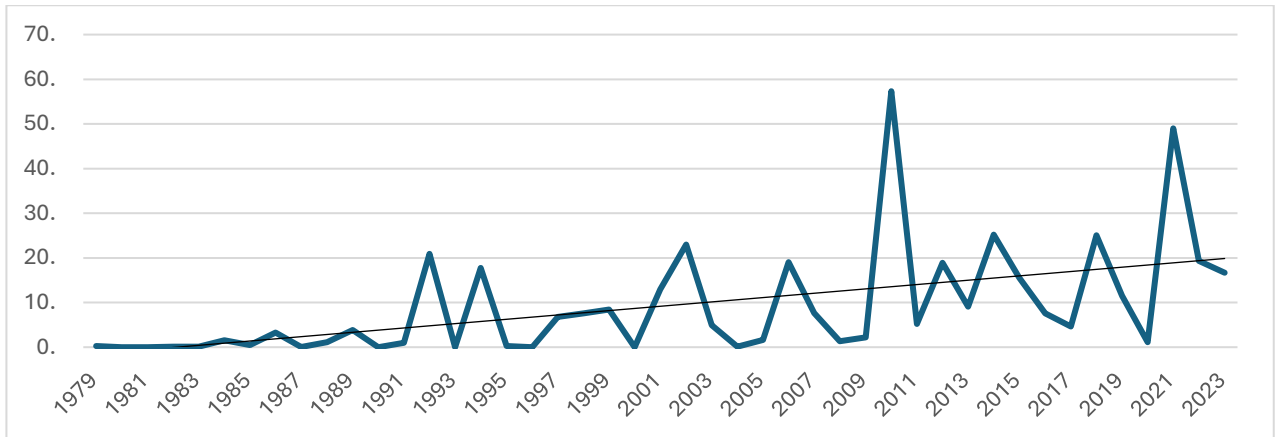
2.4 pav. Dienų per metus skaičius, kai vidutinė paros oro temperatūra pasiekia ar viršija 15 °C. Šaltinis: [55], [63]

2.1 lentelė. Vidutinis vėsinimo dienų skaičius per metus Lietuvoje skirtingais laikotarpiais pagal skirtingus klimato kaitos scenarijus [64]

	2006-2035	2021-2050	2046-2075	2071-2100
RCP 4.5	78	84	88	92
RCP 8.5	78	85	97	111

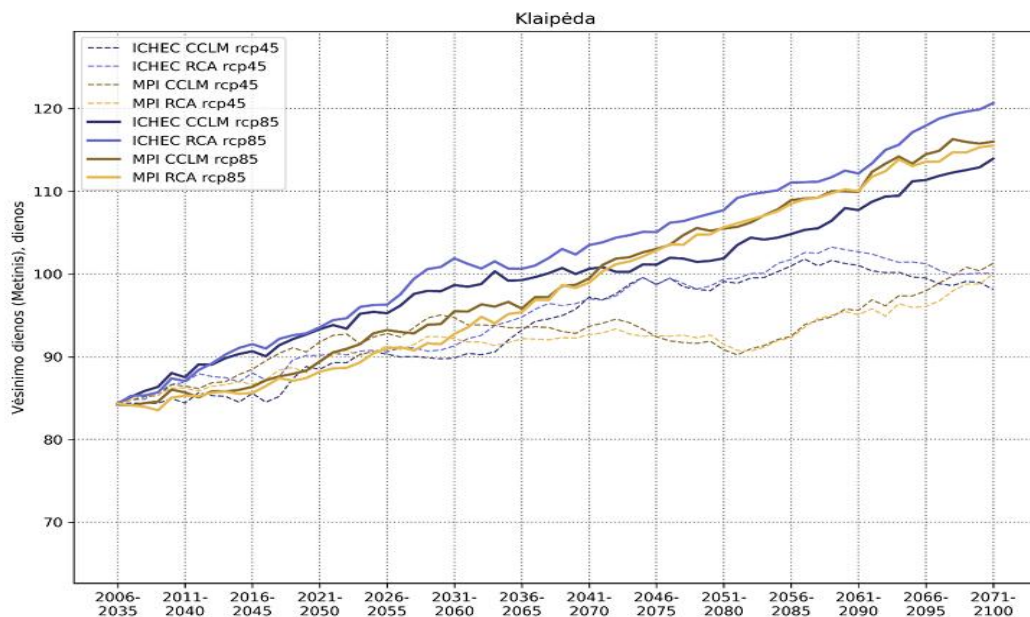
Klimato kaitos prognozės rodo reikšmingus šildymo ir vėsinimo poreikių pokyčius visoje Europoje, įskaitant ir Lietuvą. Vieni iš dažniausiai naudojamų rodiklių šiems pokyčiams įvertinti yra šildymo dienolaipsniai HDD (angl. *Heating Degree Days*) ir vėsinimo dienolaipsniai CDD (angl. *Cooling Degree Days*). Remiantis [59], [65] duomenimis vidutinė oro temperatūra Lietuvoje nuosekliai kyla, todėl prognozuojama, kad HDD reikšmės iki šio amžiaus pabaigos sumažės 17–23 %, priklausomai nuo šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų scenarijų. Tai reiškia trumpesnę ir švelnesnę šildymo sezoną. Pavyzdžiui, Lietuvoje, kur šiuo metu per metus vidutiniškai fiksuojama apie 3500–4000 HDD (esant 15 °C bazinei temperatūrai), šis rodiklis iki 2100 m. gali sumažėti 500–800 dienolaipsnių.

Dabartinis metinis CDD vidurkis Lietuvoje [66] duomenimis nepastovus, svyruoja apie 20 dienolaipsnių [64] tačiau klimato kaitos prognozės rodo spartų augimą. Pasak tyrimo [65] autoriaus, iki amžiaus pabaigos CDD (22 °C bazinė temperatūra) gali padidėti maždaug 2–3 kartus (iki 110–200 CDD, priklausomai nuo RCP scenarijaus), o nacionalinė klimato kaitos ataskaita [55], [64] rodo, kad pats vėsinimo sezonas pailgės nuo 78 iki 92–111 dienų. Skirtumus tarp skaičių lemia skirtingos bazinės temperatūros bei naudojami rodikliai (dienolaipsniai vs. dienos), tačiau visi šaltiniai sutaria dėl aiškios augimo tendencijos.



2.5 pav. Dienolaipsnių vėsinimui pokytis Lietuvoje (1979–2023 m.). Šaltinis: [66]

Šie pokyčiai rodo, kad vėsinimo poreikis taps vis reikšmingesnis, o kartu didės elektros energijos paklausa vasaros mėnesiais. Klimato kaitos kontekste labai svarbu planuoti sistemas, kurios būtų pasirengusios tiek mažėjančiam šildymo, tiek augančiam vėsinimo poreikiui. Tokiam lankstumui užtikrinti būtina diegti sprendimus, galinčius atlaikyti sezoninius svyravimus – šilumos siurblius, šilumos kaupimo technologijas ir centralizuoto vėsinimo sprendimus.

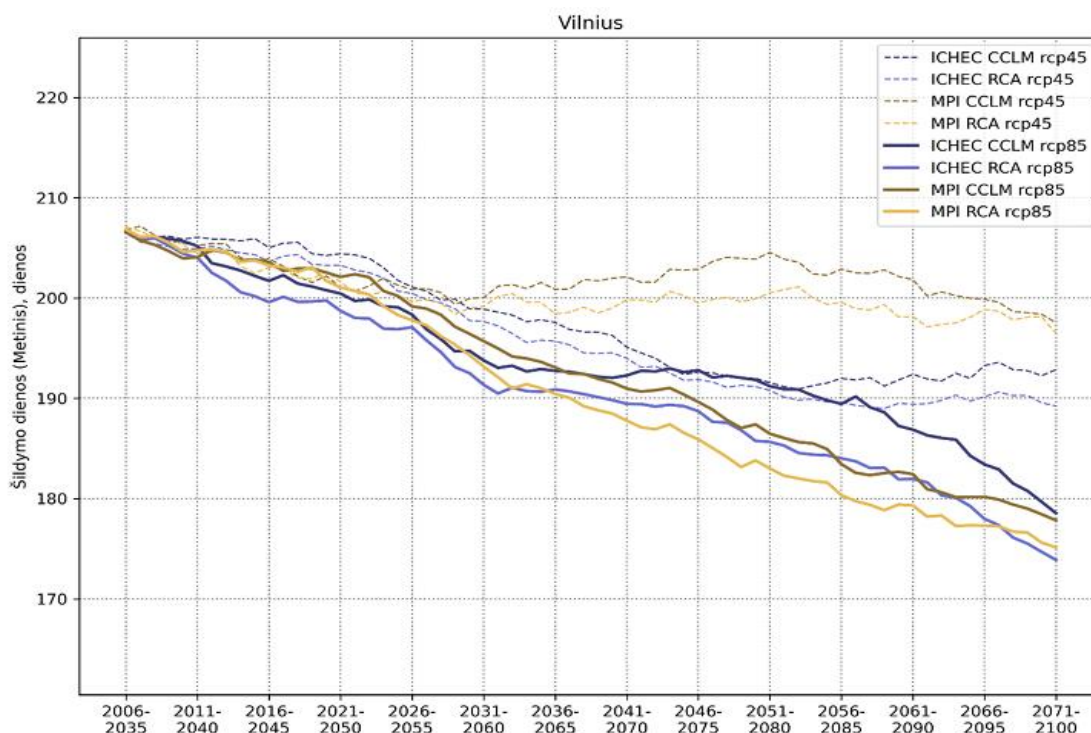


2.6 pav. Vėsinimo dienų skaičiaus prognozė Klaipėdoje skirtingais klimato kaitos scenarijais. Šaltinis: [55]

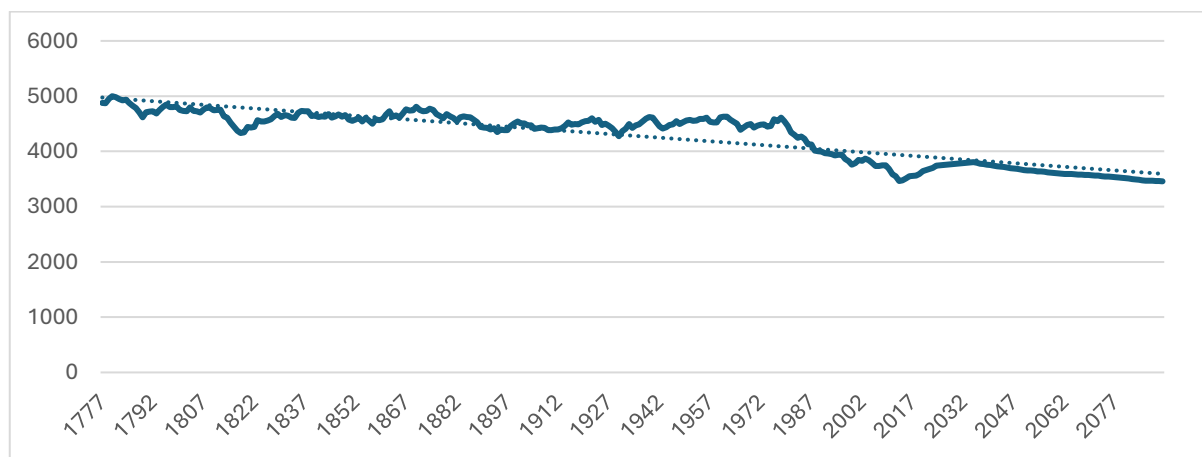
2020 m. centralizuotam šildymui namų ūkiuose Lietuvoje buvo sunaudota apie 5,87 TWh energijos, esant 3304 šildymo dienolaipsniams. Remiantis klimato kaitos prognozėmis [59], [65], iki 2100 m.

HDD skaičius gali sumažėti 17–23 %, tai reikštų ir proporcingą šildymo energijos poreikio sumažėjimą – iki 4,87–4,52 TWh per metus, arba maždaug 1,0–1,35 TWh mažiau nei 2020 m. Šis vertinimas pagrįstas tik HDD pokyčiu ir neapima kitų veiksnių, galinčių turėti įtakos šilumos poreikiui (pvz., pastatų renovacijos, vartotojų elgsenos ar technologinių pokyčių).

Remiantis klimato kaitos scenarijais ir prognozėmis [55], Lietuvoje šildymo sezono trukmė nuo dabartinių 207 dienų sumažės iki 192 dienų, esant RCP 4.5 scenarijui (2.4 pav.).



2.7 pav. Šildymo dienų skaičiaus prognozė Vilniuje skirtingais klimato kaitos scenarijais. Šaltinis: [55]



2.8 pav. Dienolaipsnių pokytis (HDD) Lietuvoje (1777–2100 m.) pagal 10 metų slankųjį vidurkį [56], [58]

3. Lietuvos centralizuotos šilumos tiekimo sistemos raidos modeliavimo metodika

Tyrimas nagrinėja, kaip klimato kaita iki 2050 m. keis Lietuvos centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo poreikius. Darbe CŠT ir CVT sistemos padalintos į dvi grupes - Vilniaus ir Kauno bei visų kitų miestų grupes. Toks skirstymas buvo pasirinktas todėl, kad Vilnius ir turi didžiausias CŠT sistemas Lietuvoje: jie aptarnauja daugiausiai vartotojų, turi didžiausius tinklus ir įvairesnes technologijas. Apie šią grupę prieinama daugiau duomenų, todėl jų modeliavimą galima atlikti tiksliau.

Šiame tyrime baziniais metais pasirinkti 2022 m., kurie naudojami kaip atskaitos laikotarpis modelio pradiniais duomenims formuoti ir analizuojamai sistemai aprašyti. Tais atvejais, kai detalesni 2022 m. duomenys nebuvo prieinami, naudoti artimiausių metų – 2020 arba 2023 m. – rodikliai.

2022 m. pasirinkti kaip baziniai metai, nes tai yra vieni naujausių metų, kuriems buvo galima surinkti pakankamai išsamius ir patikimus duomenis, leidžiančius suformuoti pradinę modelio struktūrą.

Pirmieji skaičiuojamieji metai modelyje yra 2023 m., kadangi šio darbo rengimo pradžioje tai buvo vieni naujausių metų, kuriems jau buvo prieinama statistinė informacija, leidžianti vėliau palyginti modelio rezultatus su oficialia statistika.

3.1. Modeliavimo priemonės pasirinkimas

Tyrimui pasirinkta MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) programinė įranga, skirta ilgalaikiam energijos sistemų planavimui ir optimizavimui. MESSAGE leidžia nagrinėti, kaip energetikos sistema gali keistis ateityje, atsižvelgiant į kintančius energijos poreikius, technologijų plėtrą, kuro struktūros pokyčius ir aplinkosauginius reikalavimus. Ši programinė įranga suteikia galimybę ne tik aprašyti dabartinę sistemos būklę, bet ir modeliuoti jos raidą ateityje. MESSAGE programa taip pat plačiai taikoma tarptautiniuose moksliniuose tyrimuose ir energetikos politikos analizėje. Atsižvelgiant į modelio galimybes ir tyrimo tikslus, MESSAGE pasirinkta kaip tinkamiausia programinė įranga šiam darbui atlikti [67].

Svarbus MESSAGE privalumas yra ir galimybė viename modelyje nagrinėti šilumos, elektros ir vėsumos sektorius. Tai leidžia analizuoti sektorių tarpusavio sąveiką, pavyzdžiui, kaip elektriniai šilumos siurbliai ar elektriniai katilai gali prisidėti prie elektros sistemos balansavimo arba kaip šilumos kaupimas gali padėti efektyviau išnaudoti atsinaujinančius energijos išteklius. Tokia analizė svarbi vertinant ateities centralizuoto tiekimo sistemų vaidmenį klimato neutralumo kontekste. Ši programinė įranga ypač tinkama šiam tyrimui dėl galimybės taikyti įvairius apribojimus ir tikslus, tokius kaip šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimas, atsinaujinančių energijos išteklių plėtra ar kuro naudojimo ribojimai. Tai leidžia nagrinėti skirtingus klimato kaitos ir energetikos politikos scenarijus bei palyginti jų poveikį energijos sistemos struktūrai.

MESSAGE modelyje energetikos sistema vaizduojama kaip tarpusavyje susijusių procesų visuma – nuo energijos išteklių gavybos ar išsijimo, jų konversijos į šilumą, elektrą ar vėsumą, iki galutinio energijos vartojimo. Toks požiūris leidžia vertinti visą sistemą kaip vieningą struktūrą, kurioje skirtingi sprendimai daro įtaką vieni kitiems.

Šiame darbe MESSAGE programinė įranga naudojama Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos raidai iki 2050 m. analizuoti, atsižvelgiant į klimato kaitos kontekstą. Modelis leidžia įvertinti, kaip ilgalaikėje perspektyvoje gali keistis sistemos struktūra, reaguojant į kintančius energijos poreikius, technologijų plėtrą ir griežtėjančius aplinkosauginius reikalavimus.

MESSAGE modelis šiame darbe naudojamas Lietuvos centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemos raidai modeliuoti, siekiant nustatyti ekonomiškai optimalų technologijų derinį iki 2050 m. Modelis sprendžia sąnaudų minimizavimo uždavinį, parinkdamas, kokios technologijos turėtų būti diegiamos ir kaip jos turėtų veikti skirtingais laikotarpiais, kad būtų patenkintas šilumos poreikis [68]. MESSAGE modelio tikslo funkcija supaprastintai aprašoma kaip bendrųjų diskontuotų sistemos kaštų minimizavimas. Į tikslo funkciją įtraukiami investiciniai kaštai, pastovieji eksploataciniai kaštai ir kintamieji kaštai, kurie apima technologijų eksploatacijos, kuro ir energijos sąnaudų kaštus.

$$\min Z = \sum_{t=2023}^{2050} DF_t \cdot (I_t + F_t + V_t)$$

kur:

DF_t – diskonto koeficientas;

I_t – investiciniai kaštai;

F_t – pastovūs kaštai;

V_t – kintami kaštai;

t – modeliuojamas laikotarpis.

Taikant MESSAGE programą, nagrinėjami keli galimi sistemos plėtros scenarijai, kurie leidžia palyginti skirtingus kuro struktūros, technologinių sprendimų ir investicijų derinius. Analizės metu vertinamas CO₂ emisijų mažinimo potencialas, galimos investicijų apimtys bei jų įtaka sistemos tvarumui ir konkurencingumui ateityje.

Klimato kaita šiame tyrime vertinama per jos poveikį šilumos ir vėsumos poreikiams bei per emisijų mažinimo tikslus, integruojamus į modelį kaip scenarijų prielaidas. Tai suteikia galimybę įvertinti, kaip klimato kaitos nulemti pokyčiai veikia centralizuoto tiekimo sistemos raidos kryptis ir kokie sprendimai gali būti tinkamiausi ilgalaikėje perspektyvoje.

MESSAGE modeliavimas vyksta keliais etapais.

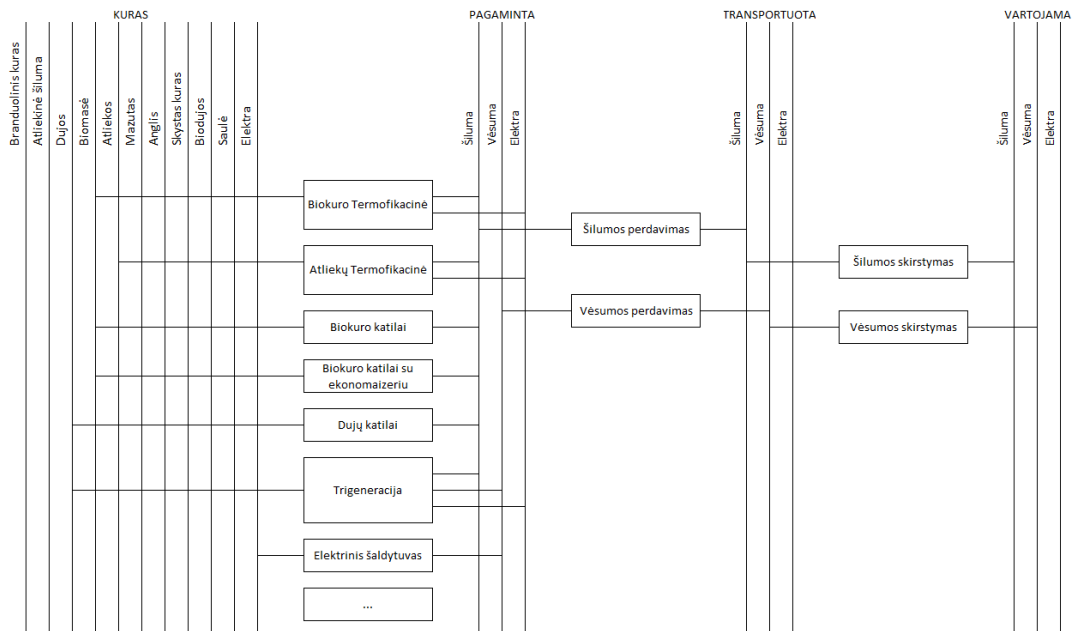
1. Pirmiausia sudaroma energijos sistemos struktūrinė schema, apimanti visą energijos grandinę – nuo pirminių energijos šaltinių iki galutinio energijos vartojimo. Šiame etape apibrėžiama, kokie energijos išteklių naudojami, kaip jie konvertuojami į šilumą, elektrą ar vėsumą bei kaip energija pasiekia galutinius vartotojus.
2. Aprašomos modelyje naudojamos energetikos technologijos, kurios sudaro analizuojamos sistemos pagrindą. Kiekvienai technologijai nurodomi energijos įėjimai ir išėjimai,

- investiciniai ir eksploataciniai kaštai, naudingumo koeficientai, instaliuotos galios, eksploataavimo trukmė bei su energijos gamyba susiję teršalų išmetimai.
3. Siekiant, kad modelis atspindėtų realią Lietuvos energetikos sistemos būklę, atliekamas modelio kalibravimas. Jo metu modelio rezultatai suderinami su istoriniais duomenimis apie energijos balansą, kuro struktūrą, naudojamas šilumos gamybos technologijas ir emisijas pasirinktais baziniais metais.
 4. Energijos paklausa modelyje aprašoma atsižvelgiant į laiko pjūvius, leidžiančius įvertinti sezoninius, paros ir valandinius poreikių svyravimus. Tai aktualu analizuojant centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemas, kurių apkrovos priklauso nuo klimato sąlygų ir metų laiko.
 5. Įvedami technologiniai, ekonominiai ir politiniai apribojimai, tokie kaip leidžiamas CO₂ emisijų kiekis, atsinaujinančių energijos išteklių plėtros tikslai, tam tikrų kuro rūšių naudojimo ribojimai ar investicijų apimčių apribojimai. Šie apribojimai formuoja skirtingus sistemos raidos scenarijus ir leidžia įvertinti klimato bei energetikos politikos sprendimų poveikį.
 6. Galiausiai modelis optimizuoja visą energetikos sistemą, parinkdamas, kokios technologijos ir kokiais mastais turėtų būti diegiamos nagrinėjamu laikotarpiu. Optimizavimo tikslas – patenkinti energijos poreikį mažiausiomis sąnaudomis, laikantis visų nustatytų techninių, ekonominių ir aplinkosauginių reikalavimų.

3.2. Energijos sistemos struktūrinė schema

Energijos sistemos schema naudojama tam, kad būtų matoma iš kur energija ateina ir kaip ji pasiekia galutinį vartotoją – nuo pirminių energijos šaltinių iki energijos vartojimo. Ji padeda suprasti, kaip atskiri energijos sistemos elementai yra susiję tarpusavyje ir kaip energija sistemoje yra gaminama, transformuojama, kaupiama bei paskirstoma.

Tokia schema suteikia vizualų pagrindą energijos sistemos analizei ir leidžia lengviau suvokti visos sistemos veikimą. 3.1 paveiksle pateikiama supaprastinta pavyzdinė energijos sistemos schema, kurioje pavaizduoti pagrindiniai energijos srautai ir jų tarpusavio ryšiai.



3.1 pav. Pavyzdinė energijos sistemos schema

Schemoje atvaizduojami skirtingi energijos lygiai, kurie parodo kaip energija keičiasi skirtinguose sistemos etapuose. Pirmajame energijos lygyje vaizduojami pirminiai energijos šaltiniai, tokie kaip biokuras, gamtinės dujos, atliekos, elektra ar kiti išteklių. Ši energija dar nėra pritaikyta tiesioginiam vartojimui ir turi būti konvertuojama į tinkamas energijos formas. Tarpiniuose energijos lygiuose pavaizduojami energijos srautai po konversijos procesų, pavyzdžiui, pagaminta šiluma ar elektra, kuri dar gali būti kaupiama, transportuojama arba toliau transformuojama. Galutiniame energijos lygyje atvaizduojamas galutinių vartotojų vartojama energija.



3.2 pav. energijos lygiai

Energijos formos schemoje nusako, koku pavidalu energija egzistuoja skirtinguose sistemos etapuose. Tai gali būti cheminė energija kuruose, elektros energija, šilumos energija ar vėsumos energija. Energijos formų išskyrimas leidžia matyti, kokie energijos virsmi vyksta sistemoje ir kokuose etapuose energija keičiama iš vienos formos į kitą.

Skirtingus energijos lygius ir energijos formas tarpusavyje jungia technologijos, kurios schemoje vaizduoja realius techninius sprendimus, naudojamus energijai gaminti, konvertuoti, transportuoti ar kaupti. Tai gali būti šilumos gamybos įrenginiai (katilai, kogeneracinės jėgainės, šilumos siurbliai),

energijos kaupimo sprendimai (šilumos kaupimo talpos), perdavimo infrastruktūra (šilumos tinklai) ar kiti technologiniai sprendimai.

Šiame darbe naudojama energijos sistemos schema pateikiama prieduose (1 priedas).

3.3. Modeliuojamų technologijų pagrindiniai rodikliai

Modeliuojant centralizuoto šildymo ir vėsinimo sistemos plėtrą, svarbu įvertinti skirtingų technologijų techninius ir ekonominius rodiklius. Šie duomenys leidžia nustatyti, kurios technologijos yra ekonomiškai pagrįstos, efektyvios ilgalaikėje perspektyvoje. Lentelėje 3.1 pateikiami svarbiausi šilumos, vėsumos gamybos ir kaupimo technologijų parametrai, naudoti šiame tyrime. Šie duomenys remiasi viešai prieinamais šaltiniais, tokiais kaip [46], [47], [69], [70], [71], [72], [73], [74]

3.1 lentelė. Technologijų rodikliai

Technologija	Tarnavimo laikas (m.)	Statybos laikas (m.)	Investicijos (eur/kW)	Fiksuoti kaštai (eur/kW/yr)	Kintami kaštai (eur/kW/yr)	Naudingo veikimo koef. (%)	
						Elektr.	Šil/Vės
Biokuro TE	25	3	3500	149	42	28,2	82,7
Atliekų TE	25	3	10400	411	227	22,7	79,2
Biokuro katilai	25	2	300	5	1,75	-	87
Biokuro kat su ekonomiaizeriu	20	2	600	9	41	-	108
Dujų/mazuto katilai	25	1	120	2	2,6	-	90
Skysto kuro katilai	25	1	120	2	2,6	-	90
Biodujų katilai	25	1	65	1,75	1,75	-	80
Dujų katilai	30	1	100	2	1,75	-	95
Dujų katilai su ekonomiaizeriu	30	1	400	8	2	-	105
Absorbciniai šilumos siurbLIAI	25	1	390	2	2,45	-	170
Kompres. šilumos siurbLIAI	20	1	660	3	15,77	-	290
Saulės kolektoriai	30	1	570	1,7	0	-	45
Ilgalaikės šilumos saugyklos	40	3	88	0,4	0	-	60

Technologija	Tarnavimo laikas (m.)	Statybos laikas (m.)	Investicijos (eur/kW)	Fiksuoti kaštai (eur/kW/yr)	Kintami kaštai (eur/kW/yr)	Naudingo veiksmo koef. (%)	
						Elektr.	Šil/Vės
Trumpalaikės šilumos saugyklos	40	1	144	0,1	0	-	98
Trigeneracija	20	2	1800	45	4	30	40/25
Elektriniai katilai	20	1	120	0,5	1,75	-	99
Elektriniai šaldytuvai	20	1	660	3	15,77	-	260
Šalčio kaupikliai	30	1	20	2	0,1	-	90
Šilumokaitis atliekinei šilumai	30	1	100	2	0	-	95
Mažoji branduolinė TE	80	5	6000	120	21	30	50

3.3.1. Kuro ir energijos kainos

3.2 lentelė. 2023 m. kuro ir energijos kainos modelyje.

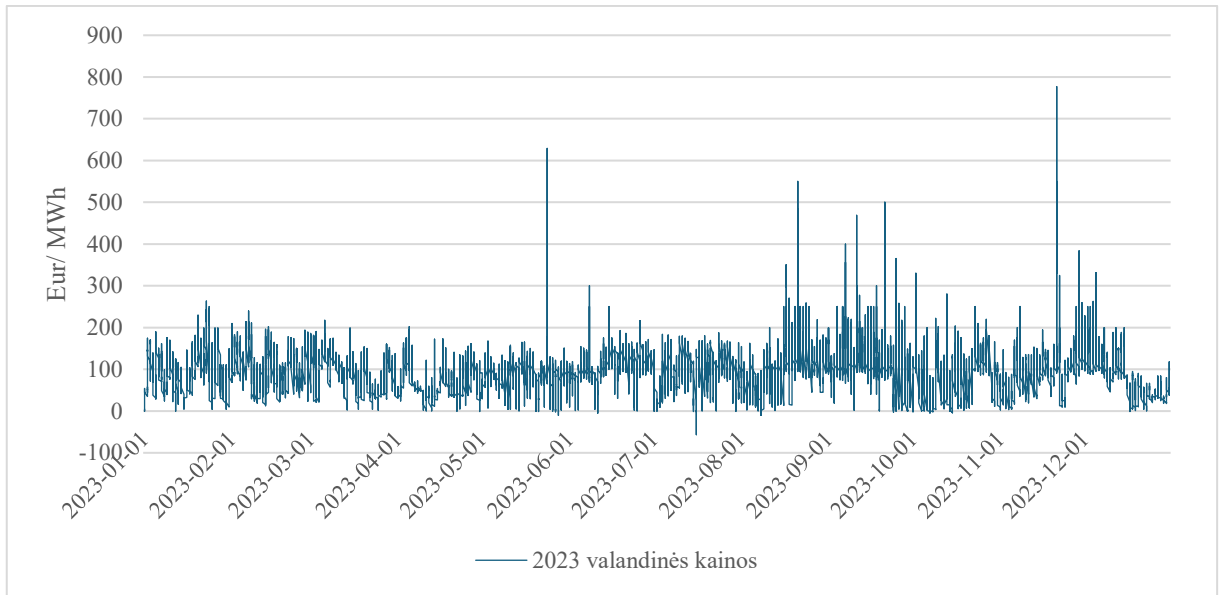
Kuro/Energijos rūšis	Eur/MWh
Biokuras	34,25
Atliekos	0
Dujos	40
Skystas kuras	79,66
Anglis	58,2
Biodujos	60
Elektra	100
Mazutas	41,29
Branduolinis kuras	9,4
Atliekinė šiluma	0

3.2 Lentelėje pateiktos MESSAGE modelyje naudojamos 2023 m. kuro ir energijos kainos. Daugumos kuro rūšių kainos parinktos remiantis Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos (VERT) viešai skelbiamais duomenimis ir atspindi tipines kuro kainas, taikomas Lietuvos energetikos sektoriuje. Šios kainos leidžia palyginti skirtingų kuro rūšių ekonominį patrauklumą energijos gamyboje. Bazinio scenarijaus atveju elektros energijos kainos modelyje nustatytos pagal realias 2023 metų valandines elektros energijos kainas, todėl atspindi faktinius kainų svyravimus rinkoje. Kitų kuro rūšių kainos laikomos pastoviomis nagrinėjamu laikotarpiu ir naudojamos kaip pradinės prielaidos technologinių sprendimų palyginimui.

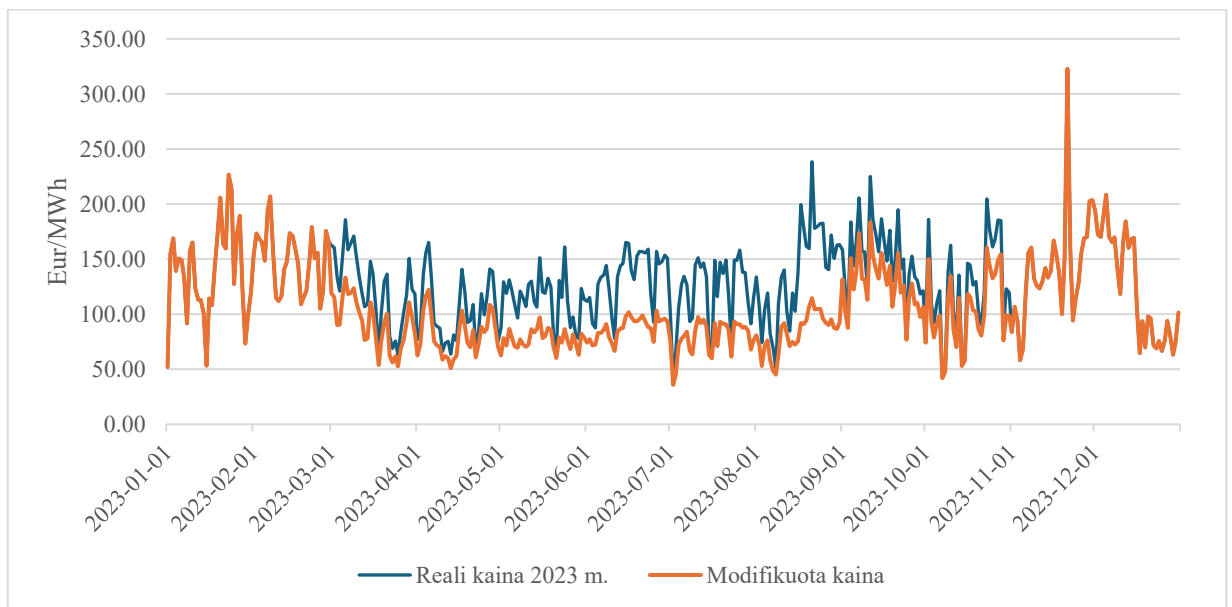
Siekiant įvertinti atsinaujinančių energijos išteklių plėtros poveikį CŠT sektoriui, darbe sudaromi du scenarijai, susiję su elektros kainų kitimu:

P1 – elektros kaina atitinkanti vidutinę AEI plėtrą (2023 m. realios kainos)

P2 – elektros kaina sumažėjusi dėl spartesnės atsinaujinančių šaltinių plėtros (modifikuota kaina).



3.3 pav. 2023 m. elektros valandinės kainos Lietuvoje. Šaltinis: [75]



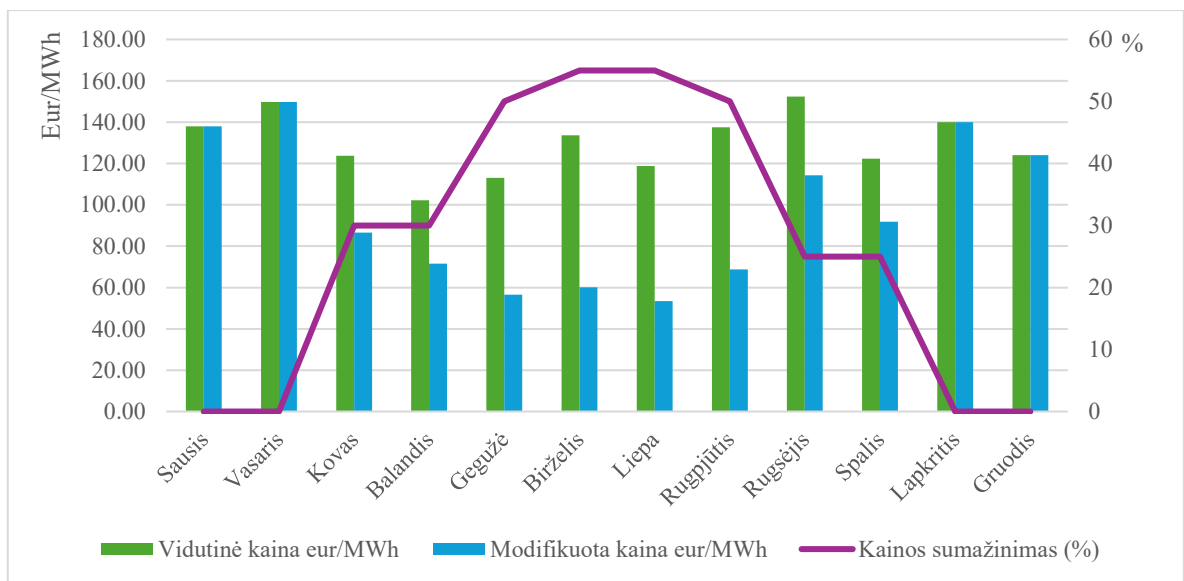
3.4 pav. 2023 m. realių ir modifikuotų dienos elektros kainų palyginimas (intensyvios saulės elektrinių plėtros scenarijus)

Grafikai (3.3 pav. ir 3.4 pav.) sudaryti remiantis 2023 m. realiomis valandinėmis elektros kainomis.

Šiame tyrime naudojami du elektros energijos kainų scenarijai - bazinis (realus) ir modifikuotas, atspindintis didelės saulės elektrinių integracijos poveikį elektros rinkai. Abu scenarijai sudaryti

remiantis 2023 m. valandinėmis elektros energijos kainomis. Baziniam scenarijui sukurti, naudotos faktinės 2023 m. didmeninės valandinės elektros kainos [75] papildomai pridedant fiksuotą 35 Eur/MWh dedamąją, reprezentuojančią tinklo mokesčius ir kitus su vartojimu susijusius kaštus.

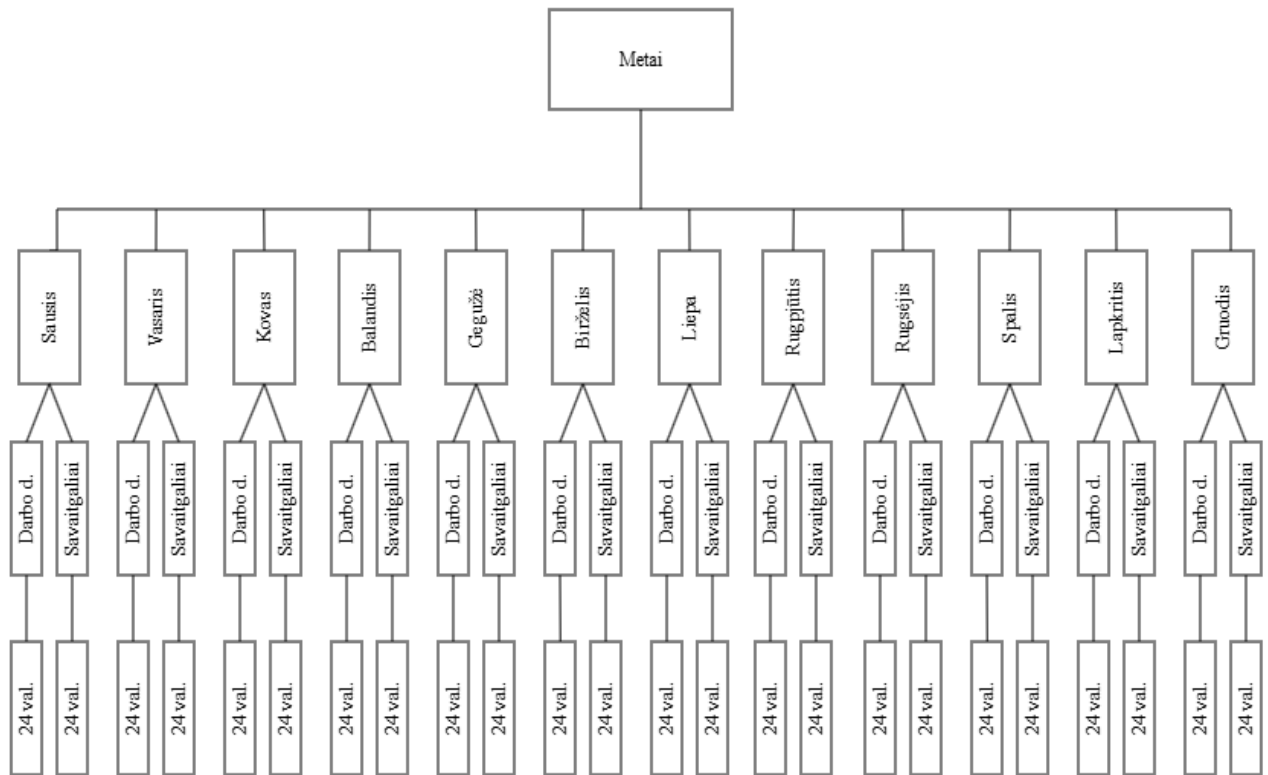
Modifikuotas scenarijus sudarytas siekiant įvertinti, kaip didelė saulės elektrinių plėtra galėtų paveikti elektros kainų lygį skirtingais metų laikotarpiais. Saulės generacija turi stiprų sezoninį poveikį, todėl kainų korekcijos taikomos nevienodai skirtingais metų laikotarpiais. Sausio – vasario bei lapkričio – gruodžio mėnesiais kainos nebuvo keičiamos, nes saulės generacija šiuo laikotarpiu minimali ir neturi reikšmingos įtakos elektros kainų formavimuisi. Kovo – balandžio mėnesiais dienos kainos sumažintos vidutiniškai 20–40 %, atspindint augančią saulės elektrinių gamybą ir dažnesnius žemų kainų laikotarpius dienos metu. Didžiausias kainų sumažinimas taikytas gegužės – rugpjūčio mėnesiais, kai saulės generacija pasiekia maksimumą – šiuo laikotarpiu dienos vidurkiai buvo sumažinti 40–60 %, atsižvelgiant į dažnai susidarantiems elektros energijos perteklius ir itin žemas ar net neigiamas kainas rinkoje. Rugsėjo – spalio mėnesiais kainos buvo mažinamos vidutiniškai 20–30 %, atspindint mažėjančią, tačiau vis dar reikšmingą saulės elektrinių generaciją.



3.5 pav. Realių ir modifikuotų 2023 m. mėnesinių elektros kainų palyginimas (intensyvios saulės elektrinių plėtros scenarijus)

3.4. Laiko segmentavimas

Modelyje taikomas išsamus laiko segmentavimas, siekiant atspindėti šilumos ir vėsumos paklausos bei energijos gamybos svyravimus per metus. Metai suskirstyti į 12 sezonų, atitinkančių kalendorinius mėnesius. Kiekvienas sezonas apima du dienų tipus – darbo ir savaitgalio dienas, siekiant įvertinti energijos vartojimo skirtumus tarp darbo ir poilsio dienų. Para suskaidyta valandomis. Toks detalumas padeda tiksliau įvertinti technologijų veikimą, energijos poreikį ir kuro sąnaudas per metus. Laiko segmentavimas taikomas siekiant sumažinti modelio skaičiavimo sudėtingumą ir užtikrinti jo praktiškumą ilgalaikiams scenarijų skaičiavimams. Visų 8760 valandų naudojimas ilgalaikiam modelyje būtų neefektyvus ir ap sunkintų scenarijų analizę.

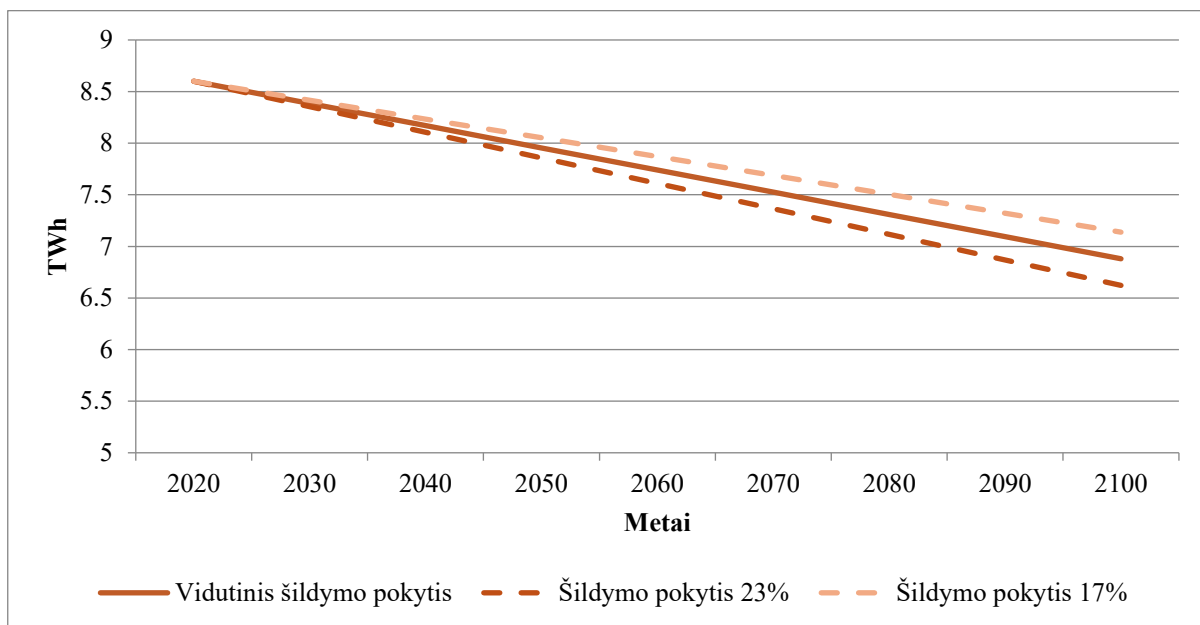


3.6 pav. Laiko segmentavimas modelyje

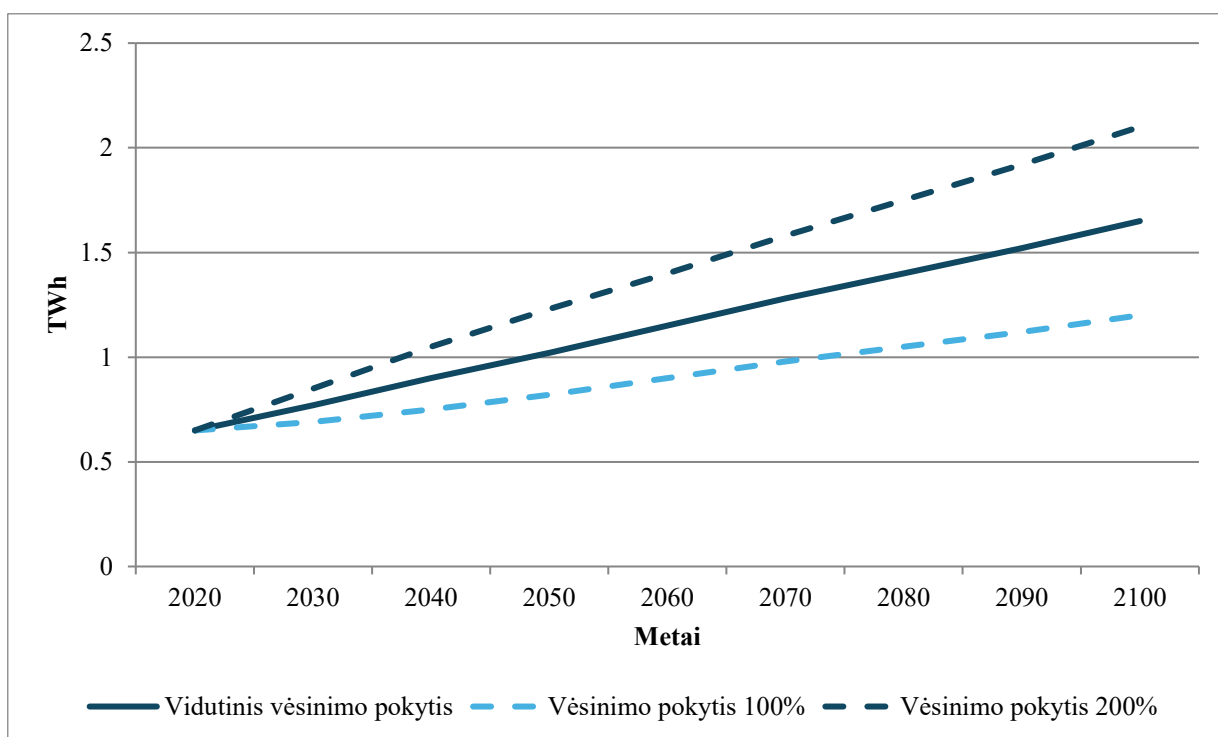
3.5. Šilumos ir vėsumos poreikių dinamika 2020–2100m.

Prognozuojama kad klimato kaitos efektas iki 2100 m. (be renovacijos ir gyventojų elgsenos pokyčių) sumažins šildymo energijos poreikį maždaug 17–23 %. Tai reiškia kritimą nuo ~8,6 TWh (2020 m.) iki ~7,14–6,6 TWh 2100 m, taikant proporciją tarp HDD ir šilumos suvartojimo [58, 64] (3.7 pav.).

Dėl didėjančių CDD ir ilgesnio vėsavimo sezono, faktinis elektros poreikis vėsavimui, esant decentralizuotam kondicionavimui, gali padvigubėti – patrigubėti nuo ~0,6–0,7 TWh (2020 m.) iki ~1,2–2,1 TWh (2100 m.) (3.8 pav) [60, 61]. Tai reiškia, kad bendra galutinė energija gali mažėti nedaug arba stabilizuotis, tačiau vasaros pikai ir elektros poreikis augs, todėl didėja centralizuoto vėsavimo svarba.

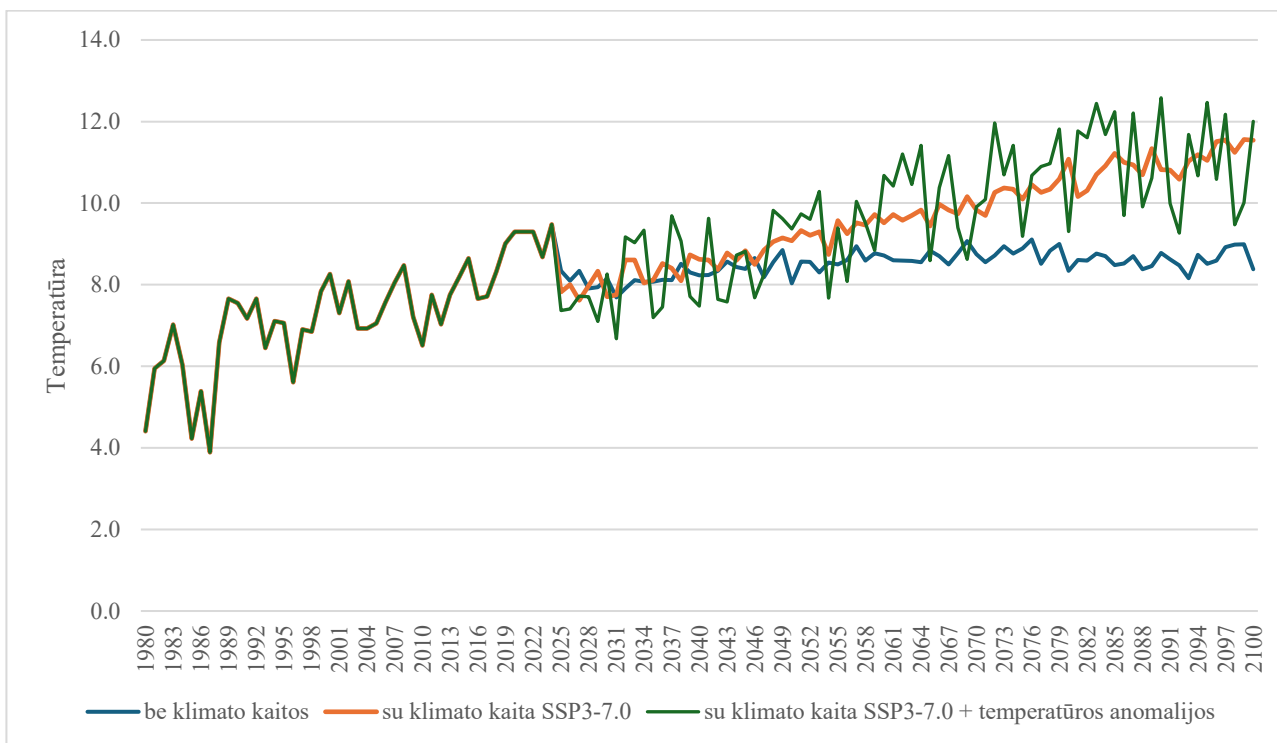


3.7 pav. Šildymo poreikio prognozė Lietuvoje iki 2100 m. [58, 64]



3.8 pav. Vėsinimo poreikio prognozė Lietuvoje iki 2100 m. [60, 61]

Šiame darbe bus nagrinėjami keli ateities scenarijai, įvertinant klimato kaitos poveikį šilumos ir vėsumos poreikiams Lietuvoje. Vienas iš pagrindinių analizės aspektų yra temperatūros pokyčiai ir jų ilgalaikės tendencijos, kurios daro tiesioginę įtaką energijos poreikiui.

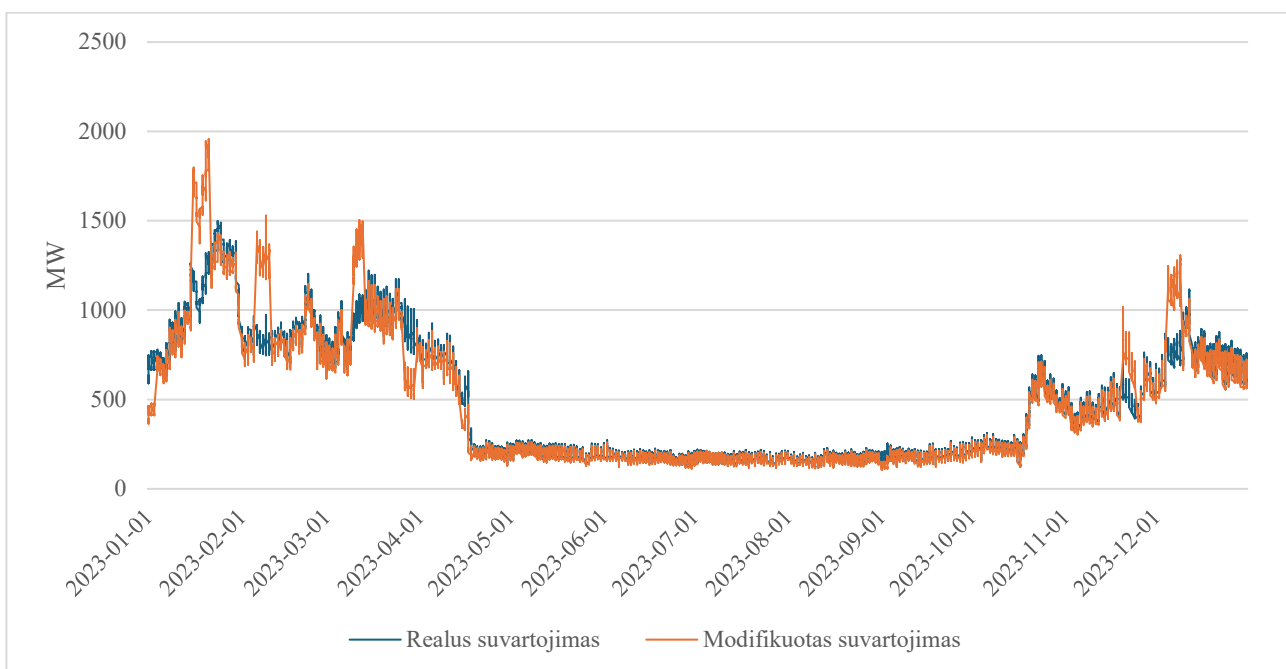


3.9 pav. Vidutinės metinės oro temperatūros pokyčiai Lietuvoje pagal klimato kaitos scenarijus (1980–2100 m.) Šaltinis: [76], [77]

Grafike (3.4 pav.) pateikti trys temperatūros raidos scenarijai:

1. Be klimato kaitos – bazinis scenarijus, kai laikoma, kad vidutinė oro temperatūra išlieka stabili, o klimato pokyčiai neturi įtakos šildymo ar vėsinimo poreikiams.
2. Su klimato kaita (SSP3-7.0) – scenarijus, atspindintis vidutinį klimato atšilimą pagal [76] prognozes, kai temperatūra palaipsniui kyla iki 2100 m.
3. Su klimato kaita ir dideliais temperatūros svyravimais – scenarijus, rodantis ne tik bendrą atšilimo tendenciją, bet ir didesnę vidutinių metinių temperatūrų kintamumą, t. y. dažnesnius šiltus ir šaltus metus.

Siekiant įvertinti energetikos sistemos jautrumą didesniems temperatūros ir šilumos poreikio svyravimams, sudarytas „ekstremalesnių metų“ scenarijus, paremtas realiais 2021 m. valandiniais šilumos vartojimo duomenimis.



3.10 pav. Šilumos vartojimo vienu metų dinamika: realus ir modifikuotas scenarijai¹

3.3 lentelė. Prognozuojamas šilumos ir vėsumos pokytis Lietuvoje 2020 m. – 2100 m.

	2020 m.	2100 m.	Pokytis proc.
Vėsumos poreikis, TWh	0,65	1,63	+150%
Šilumos poreikis I TWh	8,6	8,31	-3,4%
Šilumos poreikis II TWh	8,6	5,96	-30,7%
Šilumos poreikis III TWh	8,6	5,53	-35,7%

3.6. Šilumos paklausos nustatymas MESSAGE modeliui

2023 m. Lietuvoje prie CŠT prijungtų vartotojų suvartojama energija sudarė apie 8,2 TWh. Iš jų 63 % (5,2 TWh) suvartoja namų ūkiai [78]. Pagal Lietuvos šilumos tiekėjų asociacijos duomenis, 2023 m. Vilniaus ir Kauno centralizuoto šilumos tiekimo tinkluose namų ūkiuose bendrai suvartota šiluminė energija siekė 2,78 TWh, o visuose kituose šalies miestuose – 2,55 TWh. Tai atitinka 52,2 % (Vilniaus ir Kauno dalis) ir 47,8 % (kitų miestų dalis) visos CŠT namų ūkiuose suvartojamos energijos [79].

2022 m. suvartojimo duomenys paskirstyti pagal 2023 m. proporcijas, darant prielaidą, kad miestų grupių santykis per vienerius metus reikšmingai nesikeitė.

3.4 lentelė. CŠT energijos suvartojimo namų ūkiuose pasiskirstymas pagal miestus 2023 m.

¹ Tam tikrais žiemos, pavasario ir rudens laikotarpiais šilumos poreikis buvo padidintas arba sumažintas apie 25–65 %, imituojant stiprias šalčio ir karščio bangas (3.10 pav.). Po šių modifikacijų ekstremalaus scenarijaus metinė šilumos energija normalizuota iki 8,2 TWh, kad būtų galima palyginti scenarijus esant tam pačiam metiniam energijos kiekiui, bet skirtingam valandiniam pasiskirstymui.

Miestų grupė	Suvargota energija 2023 m. TWh	Proc.
(DM) Vilnius + Kaunas	2,74	52,2
(KM) Kiti miestai	2,52	47,8
Iš viso	5,26	100

Neturint CŠT sektorių pasiskirstymo pagal miestų grupes duomenų, daroma prielaida, kad visi sektoriai (namų ūkiai, paslaugos, pramonė ir kt.) pagal miestų grupes pasiskirsto taip pat, kaip namų ūkiai. Todėl bendras 2023 m. CŠT suvartojimas (8,2 TWh) paskirstomas proporcingai namų ūkių dalims: Vilnius + Kaunas – 52,2 % (\approx 4,28 TWh), kiti miestai – 47,8 % (\approx 3,92 TWh).

Suvargota energija išreiškiama megavatmečiais (MWyr), nes MESSAGE modelyje paklausa apibrėžiama šiuo skaičiavimo vienetu.

3.5 lentelė. Bendras CŠT energijos suvartojimas 2023 m. skirtingais matavimo vienetais

Miestų grupė	Suvargota energija, TWh	Suvargota energija, MWyr
(DM) Vilnius + Kaunas	4,28	488
(KM) Kiti miestai	3,92	447
Iš viso	8,2	936

3.7. Vėsumos paklausos nustatymas MESSAGE modeliui

Remiantis EPSO-G užsakymu DNV parengta ataskaita „Lithuania energy system transformation to 2050“ (Lietuvos energetikos sistemos transformacija iki 2050 m.)[61] faktinis patalpų vėsinimo energijos vartojimas 2020 m. Lietuvoje siekė 0,6–0,7 TWh per metus. O pagal Nacionalinę energetinės nepriklausomybės strategiją (NENS) [80] teorinis metinis poreikis vertinamas 5–6 TWh.

Kadangi Lietuvoje nėra detalių duomenų apie vėsinimo energijos suvartojimo pasiskirstymą pagal miestus, šiame darbe daroma prielaida, kad vėsinimo paklausa tarp Vilniaus ir Kauno bei kitų miestų pasiskirsto taip pat, kaip šilumos suvartojimas centralizuotose sistemose.

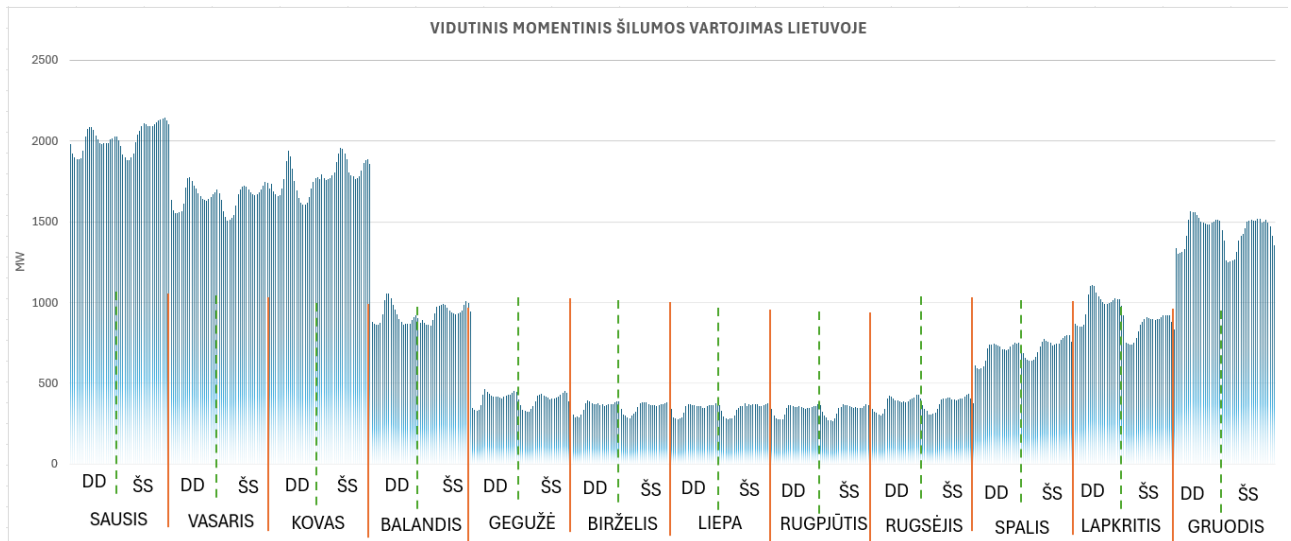
3.6 lentelė. CVT energijos suvartojimo namų ūkiuose pasiskirstymas pagal miestus

Miestų grupė	Proc.	TWh
(DM) Vilnius + Kaunas	52,2	0,34
(KM) Kiti miestai	47,8	0,31
Iš viso	100	0,65

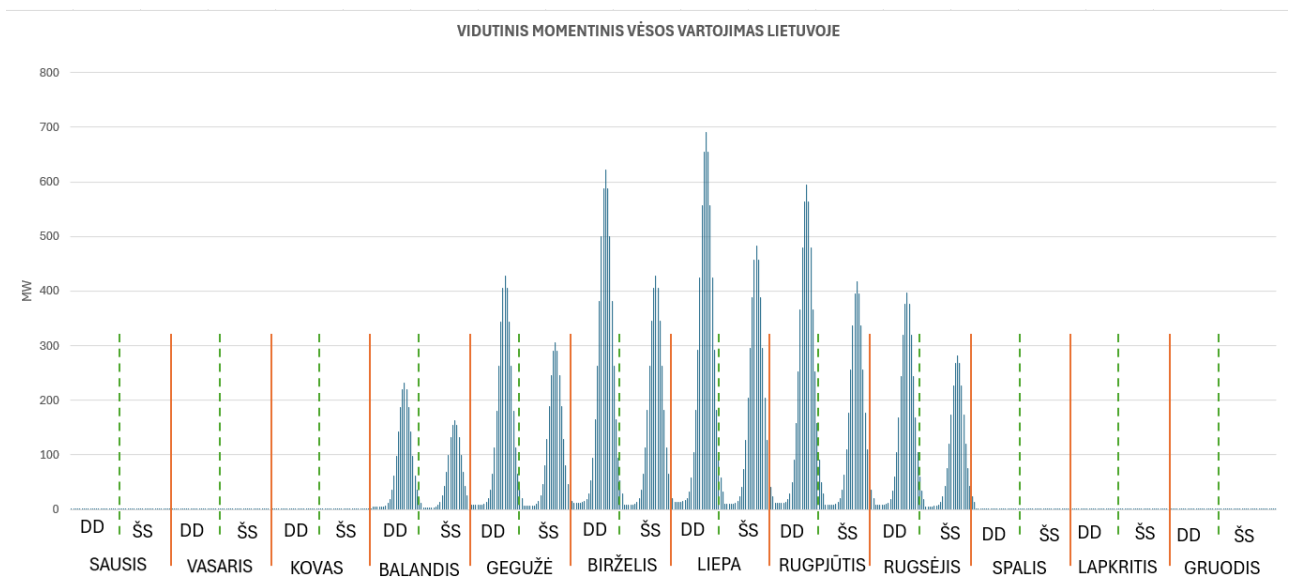
3.7 lentelė. Bendras CVT energijos suvartojimas 2023 skirtingais matavimo vienetais

Miestų grupė	Suvargota energija, TWh	Suvargota energija, MWyr
(DM) Vilnius + Kaunas	0,34	38,8
(KM) Kiti miestai	0,31	35,4
Iš viso	0,65	74,2

Poreikių kreivės parengtos remiantis istoriniais duomenimis ir klimato kaitos prognozėmis, paskirstytomis pagal mėnesius, siekiant įvertinti klimato kaitos įtaką šilumos ir vėsumos poreikių struktūros pokyčiams.



3.13 pav. 2023 m. vidutinis momentinis šilumos vartojimas CŠT tinkluose Lietuvoje pagal mėnesius ir dienos tipą.



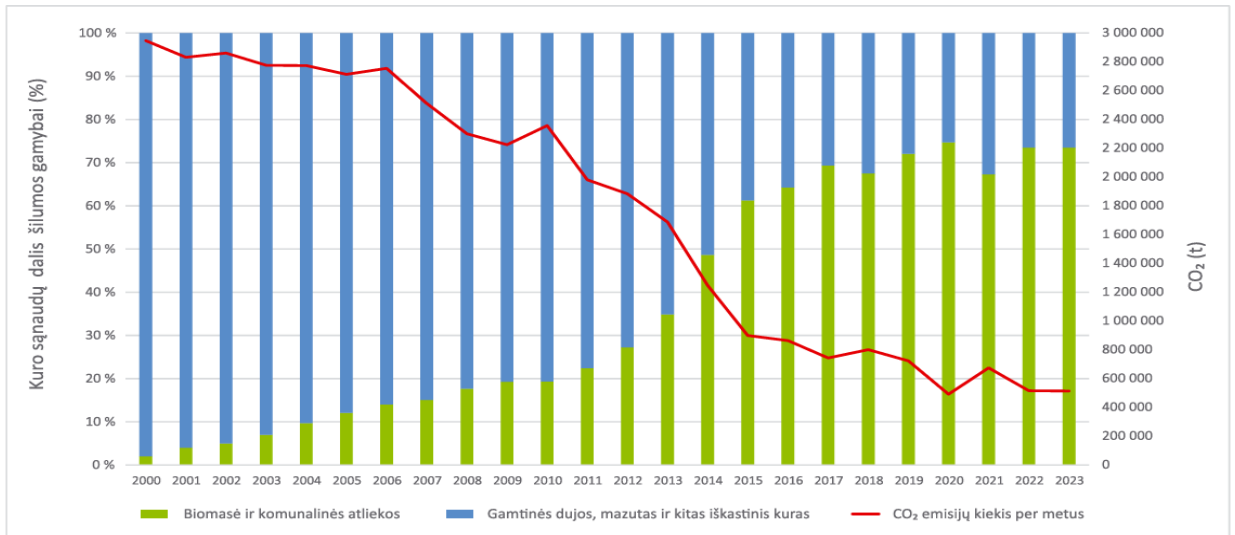
3.14 pav. Vidutinis momentinis vėsos (decentralizuotos) vartojimas Lietuvoje pagal mėnesius ir dienos tipą.

Atliekinės šilumos srauto kreivė modelyje aprašoma kaip pastovus šaltinis visus metus, kadangi atliekinės šilumos srautas praktiškai nepriklauso nuo oro temperatūros.

Toks apkrovų ir išteklių kreivių taikymas leidžia baziniam scenarijui realistiškai atspindėti dabartinės energijos sistemos veikimą ir sudaro pagrindą tolesnei ateities scenarijų analizei.

3.9. CO₂ emisijų ribojimai

Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje per pastaruosius du dešimtmečius iš esmės pasikeitė kuro struktūra ir ženkliai sumažėjo CO₂ emisijos. 2000 m. šilumos gamybai pagrinde buvo naudojamos gamtinės dujos ir mazutas, o 2023 m. daugiau kaip 80 % sudarė biokuras ir komunalinės atliekos. Dėl šio pokyčio metinės CO₂ emisijos sumažėjo nuo daugiau nei 2,5 mln. t CO₂ 2000 m. iki 0,5 mln. t 2023 m., o emisijų intensyvumas siekė apie 60 t CO₂/GWh pagamintos šilumos [41]. Pagal nacionalinius energetikos ir klimato tikslus iki 2030 m. planuojama, kad daugiau kaip 90 % šilumos bus gaminama iš atsinaujinančių išteklių, o iki 2050 m. sektorius turėtų pasiekti neutralumą.



3.15 pav. CO₂ emisijų kitimas Lietuvos CŠT sektoriuje. Šaltinis: [81]

Modeliuojant CŠT sistemą, kiekvienai kuro rūšiai buvo taikomi specifiniai CO₂ emisijų koeficientai, reiškiantys išmetamą CO₂ kiekį sunaudotos energijos vienetui. Šie koeficientai nustatyti remiantis [82].

3.8 lentelė. Pagrindiniai taikyti dydžiai:

Kuro rūšis	t CO ₂ /MWh	t CO ₂ / kWyr
Gamtinės dujos	0,202	1,769169
Biomasė	0	0
Nerūšiuotos komunalinės atliekos	0,330	2,891851
atliekos esant 40% iškastinės kilmės daliai (2023 m.)	0,132	1,156740
atliekos esant 35% iškastinės kilmės daliai (2030 m.)	0,116	1,012148
atliekos esant 30% iškastinės kilmės daliai (2035 m.)	0,099	0,867555
atliekos esant 25% iškastinės kilmės daliai (2040 m.)	0,083	0,722963
atliekos esant 15% iškastinės kilmės daliai (2050 m.)	0,049	0,433778
Mazutas	0,279	2,440886
Akmens anglis	0,354	3,099988
Dyzelinas /skystas kuras	0,267	2,336817
Biodujos (kitos)	0	0

Atliekų deginimo įrenginių išmetamų CO₂ kiekis tiesiogiai priklauso nuo deginamų atliekų sudėties – ypač nuo jose esančios iškastinės kilmės dalies. Lietuvoje deginamų atliekų sudėtyje yra reikšminga biogeninė dalis, todėl jų emisijų intensyvumas yra mažesnis nei nerūšiuotų komunalinių atliekų. 2022 m. Europoje vidutiniškai apie 40% atliekų buvo iškastinės kilmės, likusi dalis – biogeninės kilmės [83], todėl atliekoms taikomas CO₂ koeficientas mažesnis nei nerūšiuotų atliekų.

Europos Sąjungos teisės aktai [84], [85] numato priemones, mažinančias iškastinės kilmės atliekų (ypač plastiko) – kiekį komunalinių atliekų sraute. Šių teisės aktų įgyvendinimas palaipsniui mažina plastiko bei kitų iškastinės kilmės komponentų kiekį mišrių komunalinių atliekų sraute. Dėl to modeliuojant daroma prielaida, kad atliekų deginimo įrenginiuose išmetamo CO₂ kiekis mažėja (3.8 lentelė).

2023 m. centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje buvo pagaminta 8,2 TWh šilumos energijos, o bendras CO₂ išmetimų kiekis siekė apie 508 tūkst. tonų (vidutiniškai 62 t CO₂/GWh).

Modelyje nustatytas CO₂ emisijų mažinimo tikslas – palaipsniui sumažinti išmetimus nuo 510 tūkst. tonų 2023 m. iki visiško neutralumo 2050 m. (3.9 lentelė).

3.9 lentelė. CO₂ emisijų mažinimo tikslai modelyje.

Metai	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Metinis CO ₂ kiekis, tūkst. t	510	480	385	288	192	96	0

3.10. Modeliuojami scenarijai

Šiame tyrime Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos raida analizuojama taikant skirtingus scenarijus. Scenarijai sudaryti siekiant įvertinti, kaip skirtingi klimatiniai, technologiniai ir politiniai veiksniai gali paveikti šilumos gamybos struktūrą ir technologijų pasirinkimą ilgalaikėje perspektyvoje. Tai leidžia nagrinėti kelias galimas raidos kryptis, o ne vieną konkrečią prognozę.

Scenarijai formuojami derinant kelias pagrindines dimensijas: klimato kaitos poveikį šilumos poreikiams, ekstremalių temperatūrų įtaką, elektros kainų pokyčius, šilumos kaupimo technologijų plėtrą ir klimato politikos griežtumą.

Pirmoji scenarijų grupė susijusi su klimato kaitos poveikiu. Baziniame scenarijuje daroma prielaida, kad klimato kaitą pavyko stabilizuoti, todėl šilumos poreikis išlieka stabilus ir panašus į istorinį. Šis scenarijus naudojamas kaip atskaitos taškas kitų scenarijų palyginimui. Alternatyviuose scenarijuose nagrinėjama klimato kaita, kai dėl šiltesnių žiemų bendras šilumos poreikis mažėja. Taip pat atskirai vertinamas ekstremalių temperatūrų poveikis, kai galimi didesni šilumos poreikio svyravimai trumpais laikotarpiais (3.9 pav.).

Antroji scenarijų grupė apima elektros kainų raidą. Viena scenarijuje laikoma, kad saulės elektrinių plėtra yra ribota, todėl elektros kainos išlieka panašios į 2023 m. realias kainas. Kitame scenarijuje daroma prielaida, kad saulės generacija ženkliai didėja, todėl pavasario – vasaros laikotarpio dienomis elektros kainos mažėja. Šiam poveikiui įvertinti buvo pakoreguoti elektros kainų profiliai, sumažinant kainas dieninėmis valandomis šiltuoju metų laikotarpiu. Kainos kituose laikotarpiuose nepakeistos (3.4 pav. ir 3.5 pav.). Šie scenarijai leidžia įvertinti elektrinių šilumos technologijų, tokių kaip šilumos siurbliai ar elektriniai katilai, vaidmenį šilumos tiekimo sistemoje.

Trečioji scenarijų grupė susijusi su šilumos kaupimo technologijų plėtra. Viename scenarijuje šių technologijų duomenys nėra keičiami, todėl modelis pats parenka ekonomiškai optimalų šilumos saugyklų kiekį. Kitame scenarijuje daroma prielaida, kad šilumos kaupimo technologijų kainos mažės, siekiant įvertinti, ar tai lemia didesnę jų ekonominę patrauklumą ir diegimą sistemoje.

Paskutinė scenarijų grupė susijusi su klimato politikos tikslais. Viename scenarijuje numatomas visiškas CO₂ neutralumo pasiekimas, kai šilumos sektorius veikia be iškastinio kuro. Kitame scenarijuje nagrinėjamas dalinis emisijų mažinimas, kai CO₂ emisijos sumažinamos apie 70 %. Šie scenarijai leidžia įvertinti, kaip skirtingas klimato politikos griežtumas veikia technologijų pasirinkimą.

Parengti scenarijai leidžia įvertinti galimas Lietuvos CŠT sistemos raidos kryptis klimato kaitos kontekste ir nustatyti svarbiausius veiksnius, darančius įtaką sistemos pokyčiams.

3.10 lentelė. Energetikos sistemos modeliavimo scenarijų charakteristikos ir prielaidos.

Scenarijų grupė	Kodas	Klimato kaita ir temperatūrų ekstremumai	Elektros kaina	Šilumos saugyklų raida	CO ₂ neutralumo tikslas
Bazinis	1A	Be klimato kaitos ir ekstremumų	Standartinė kaina	Neribojama	Pilnas (100%)
	1B	Be klimato kaitos ir ekstremumų	Modifikuota kaina	Neribojama	Pilnas (100%)
Šilumos poreikių įtaka	2A	Su klimato kaita (be ekstremumų)	Standartinė kaina	Neribojama	Pilnas (100%)
	2B	Su klimato kaita (be ekstremumų)	Modifikuota kaina	Neribojama	Pilnas (100%)
Ekstremalių temperatūrų poveikis	3A	Su klimato kaita ir ekstremumais	Standartinė kaina	Neribojama	Pilnas (100%)
	3B	Su klimato kaita ir ekstremumais	Modifikuota kaina	Neribojama	Pilnas (100%)
Šilumos saugyklų plėtros įtaka	4A	Su klimato kaita ir ekstremumais	Modifikuota kaina	Lėtesnė raida	Pilnas (100%)
	4B	Su klimato kaita ir ekstremumais	Modifikuota kaina	Pigesnės saugyklos	Pilnas (100%)
CO ₂ tikslų įtaka	5A	Su klimato kaita ir ekstremumais	Modifikuota kaina	Neribojama	Dalinis (-70%)
	5B	Su klimato kaita ir ekstremumais	Modifikuota kaina	Lėtesnė raida	Dalinis (-70%)
	5C	Su klimato kaita ir ekstremumais	Modifikuota kaina	Pigesnės saugyklos	Dalinis (-70%)

4. Tyrimo rezultatai

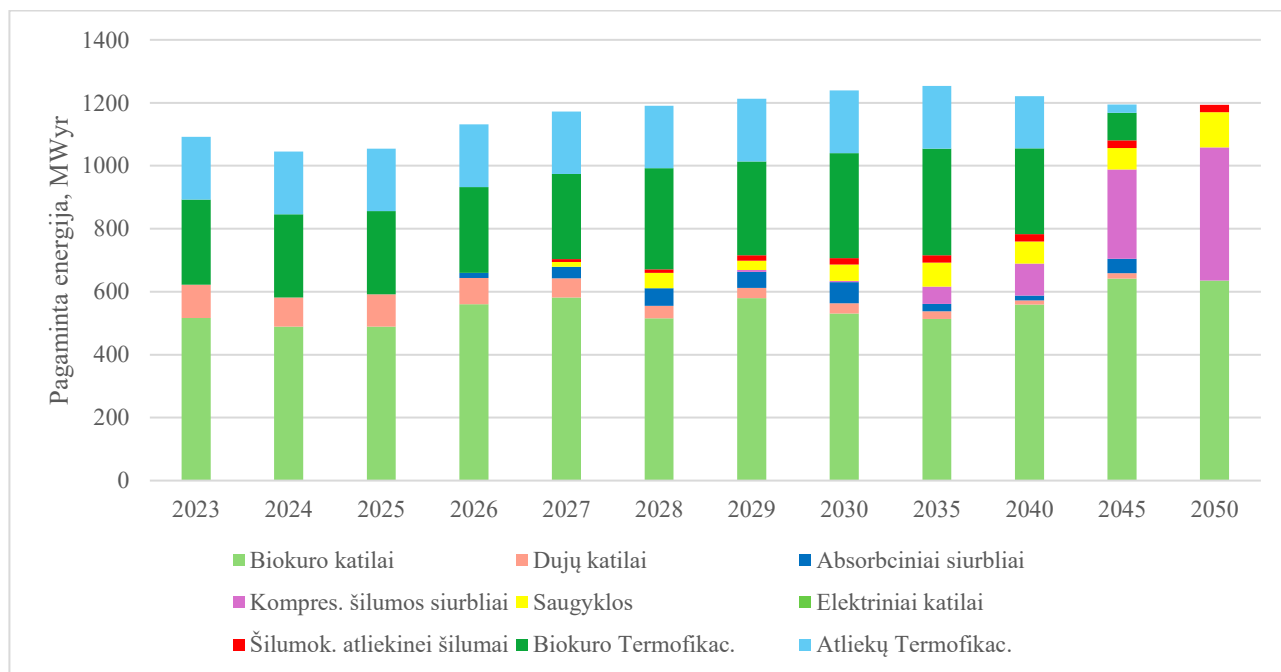
Šiame skyriuje analizuojami energetikos sistemos modeliavimo rezultatai, apimantys 11 skirtingų scenarijų, suskirstytų į penkias pagrindines grupes. Vertinama, kaip iki 2050 m. kinta šilumos gamybos technologijų struktūra, kuro naudojimas ir šilumos saugyklų poreikis. Analizuojant šilumos gamybos struktūrą, į vertinimą įtraukiamos ir šilumos saugyklos, nors jos tiesiogiai šilumos negamina, tačiau dalyvauja šilumos tiekimo procese.

4.1. Techninė scenarijų analizė

Šiame poskyryje pateikiama atskirų scenarijų grupių analizė, leidžianti įvertinti skirtingų prielaidų įtaką šilumos sektoriaus raidai.

4.1.1. 1-osios scenarijų grupės rezultatų analizė

Baziniuose scenarijuose 1A ir 1B nagrinėjama sistemos raida esant įprastoms sąlygoms, nevertinant klimato kaitos poveikio. Jie naudojami kaip atskaitos taškas tolimesniems palyginimams, leidžiantis įvertinti, kaip elektros kainos pokyčiai veikia technologijų pasirinkimą ir visos sistemos plėtrą. Paveiksle 4.1 vaizduojami šilumos gamybos kiekiai pagal technologijas nagrinėjamu laikotarpiu. Bendras šilumos gamybos kiekis išlieka gana stabilus, tačiau laikui bėgant kinta atskirų technologijų indėlis. Didėja kompresorinių šilumos siurblių kiekis, o tradicinių technologijų vaidmuo palaipsniui mažėja.

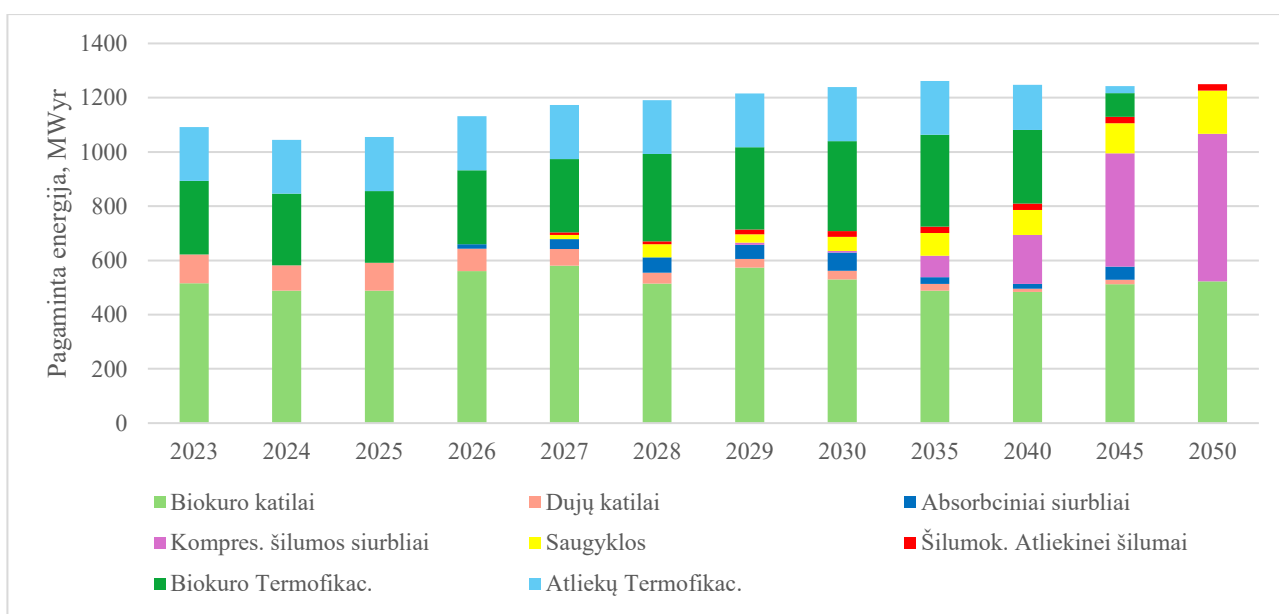


4.1 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 1A scenarijuje.

Toliau analizuojama procentinė šilumos gamybos struktūra, parodanti atskirų technologijų dalį bendroje CŠT šilumos gamyboje. (lentelės 4.1 - 4.11)

4.1 lentelė. ČST šilumos gamybos struktūra 1A scenarijuje 2023–2050 m.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	43%	41%	46%	54%	53%
Dujų katilai	10%	3%	2%	1%	2%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	5%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	0%	4%	8%	24%	35%
Saugyklos	0%	4%	6%	6%	6%	9%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro Termofikac.	25%	27%	27%	22%	7%	0%
Atliekų Termofikac.	18%	16%	16%	14%	2%	0%



4.2 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 1B scenarijuje.

4.2 lentelė. ČST šilumos gamybos struktūra 1B scenarijuje 2023–2050 m.

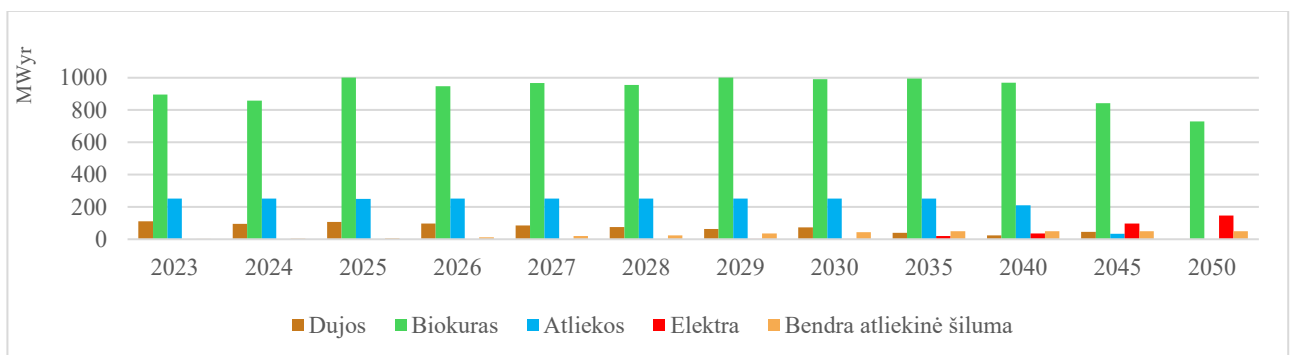
Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	43%	39%	39%	41%	42%
Dujų katilai	10%	3%	2%	1%	1%	0%
Saulės kolektoriai	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	5%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	0%	6%	14%	34%	44%
Saugyklos	0%	4%	7%	7%	9%	13%
Elektriniai katilai	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Šilumok. Atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro Termofikac.	25%	27%	27%	22%	7%	0%
Atliekų Termofikac.	18%	16%	16%	13%	2%	0%

Abiejuose scenarijuose matyti panaši bendra kryptis – sistema tolsta nuo tradicinių šilumos gamybos technologijų ir palaipsniui pereina prie elektrifikacijos. Pradžioje dominuoja biokuro katilai ir termofikacinės elektrinės, o jų dalis išlieka gana stabili iki 2035m. Dujų katilai palaipsniui beveik išnyksta.

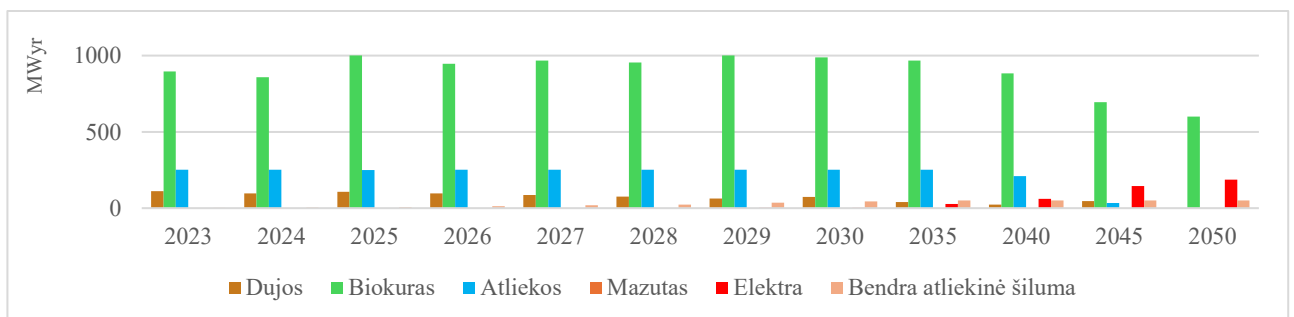
Vėlesniu laikotarpiu išauga kompresorinių šilumos siurblių reikšmė. Nuo 2040 m. jie tampa viena pagrindinių technologijų. Kartu didėja ir šilumos saugyklų vaidmuo, kurios padeda subalansuoti sistemą ir leidžia efektyviau išnaudoti elektrines technologijas. Absorbaciniai šilumos siurbliai turi tarpinį vaidmenį – jų svarba išauga apie 2030 m., tačiau vėliau sumažėja.

Pagrindinis skirtumas tarp 1A ir 1B scenarijų yra elektrifikacijos mastas. 1B scenarijuje dėl palankesnės elektros kainos, elektrinės technologijos diegiamos sparčiau, todėl sistema greičiau pereina prie elektrifikacijos, o priklausomybė nuo biokuro mažėja.

Technologijų pasirinkimas tiesiogiai atsispindi ir energijos išteklių naudojime (paveikslai 4.3 ir 4.4) – didėjant elektrifikacijai, auga elektros energijos poreikis, o tradicinių kuro rūšių reikšmė mažėja.



4.3 pav. Energijos išteklių sunaudojimas šilumos gamybai 1A scenarijuje



4.4 pav. Energijos išteklių sunaudojimas šilumos gamybai 1B scenarijuje

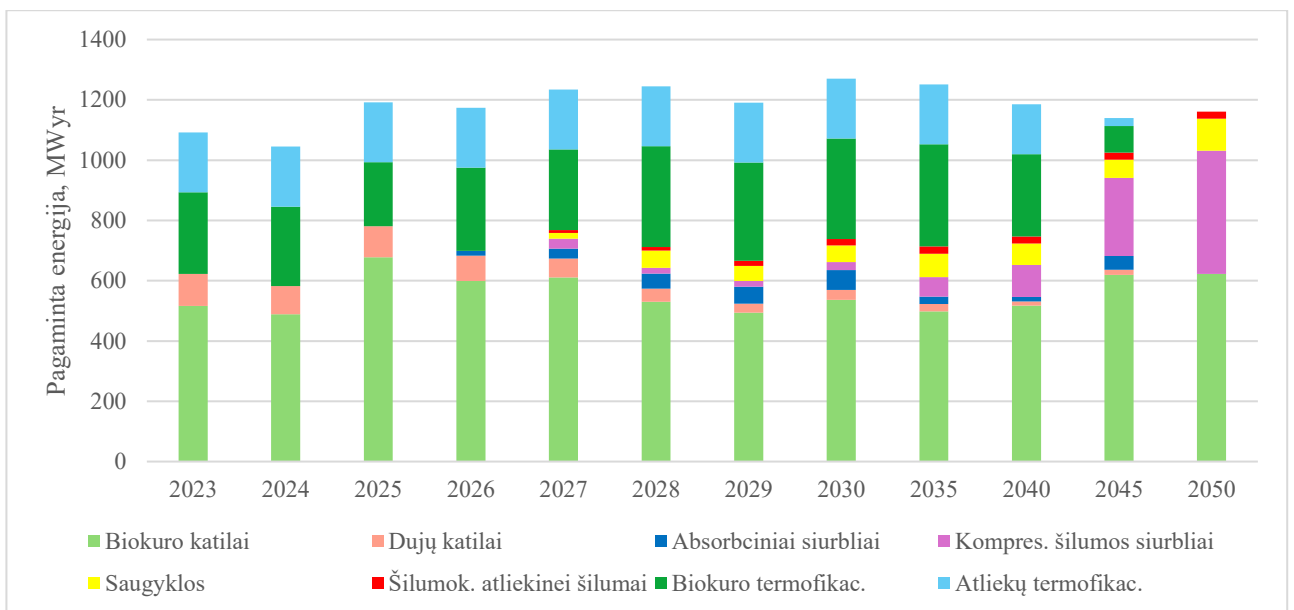
Nors 1B scenarijuje dėl palankesnės elektros kainos spartėja elektrifikacija ir anksčiau pradeda mažėti biokuro naudojimas (4.4 pav.), bendras energijos išteklių pasiskirstymas išlieka panašus kaip ir 1A scenarijuje (4.3 pav.). Abiem atvejais biokuras išlieka pagrindiniu šilumos gamybos šaltiniu iki

pat 2040–2045 m., dujų naudojimas nuosekliai mažėja ir išnyksta, o elektra reikšmingesnę vaidmenį įgauna tik laikotarpio pabaigoje.

Tai rodo, kad vien elektros kainos pokytis, esant nepakitusioms kitoms sąlygoms, nėra pakankamas iš esmės pakeisti šilumos sektoriaus struktūrą – jis labiau paspartina jau vykstančias tendencijas, bet jų krypties nekeičia.

4.1.2. 2-osios scenarijų grupės rezultatų analizė

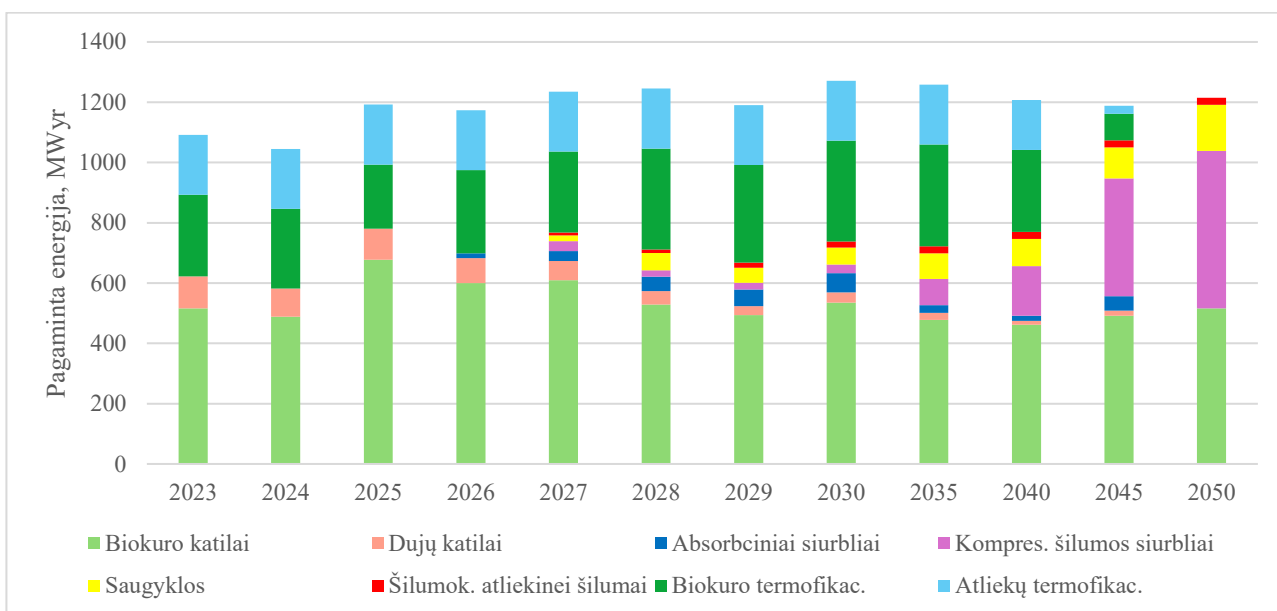
Antrosios grupės scenarijuose 2A ir 2B vertinama, kaip šilumos sektoriaus raida keičiasi įtraukus klimato kaitos poveikį šilumos poreikiui. Šiuose scenarijuose analizuojami tiek standartinės, tiek modifikuotos elektros kainos atvejai, siekiant įvertinti, kaip paklausos pokyčiai kartu su elektros kainų dinamika veikia technologijų pasirinkimą, kuro struktūrą ir sistemos transformacijos tempą. Pagrindinis dėmesys skiriamas išsiaiškinti, ar mažėjantis šilumos poreikis ir sezoniskumo pokyčiai keičia elektrifikacijos mastą bei biokuro vaidmenį sistemoje.



4.5 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2A scenarijuje.

4.3 lentelė Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2A scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	42%	40%	44%	54%	54%
Dujų katilai	10%	3%	2%	1%	2%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	5%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	5%	9%	23%	35%
Saugyklos	0%	4%	6%	6%	5%	9%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	25%	26%	27%	23%	8%	0%
Atliekų termofikac.	18%	16%	16%	14%	2%	0%



4.6 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2B scenarijuje.

4.4 lentelė Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 2B scenarijuje.

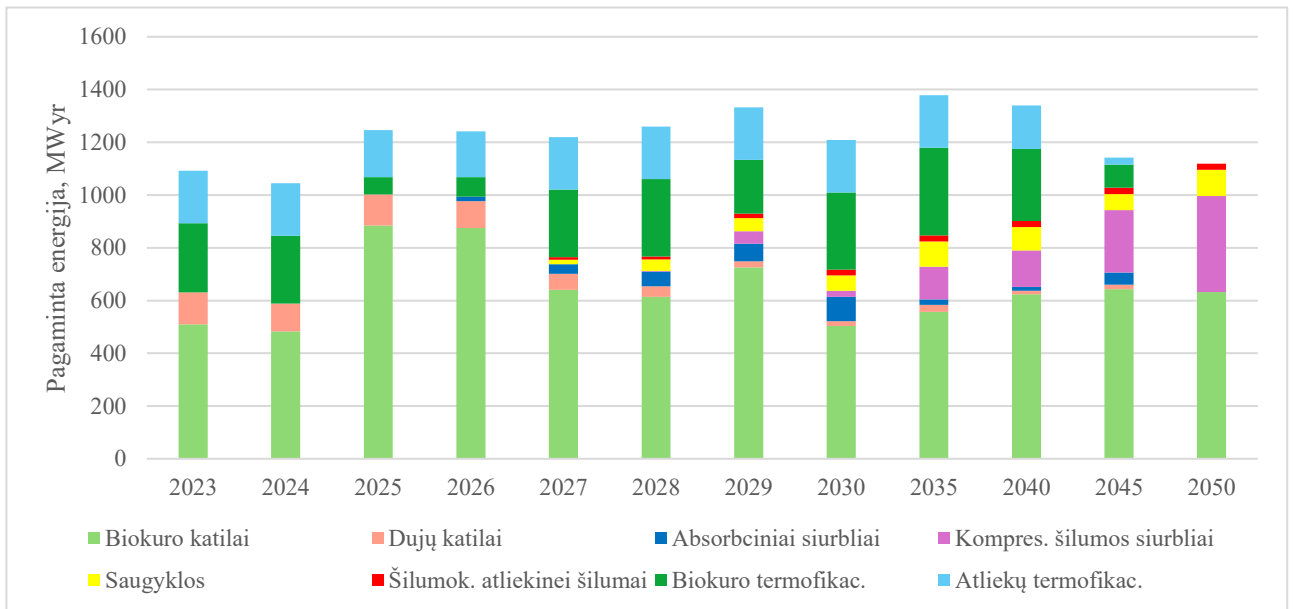
	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	42%	38%	38%	41%	42%
Dujų katilai	10%	3%	2%	1%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	5%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	7%	14%	33%	43%
Saugyklos	0%	4%	7%	7%	9%	13%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	25%	26%	27%	23%	7%	0%
Atliekų termofikac.	18%	16%	16%	14%	2%	0%

2A ir 2B scenarijuose matyti panašios tendencijos kaip ir pirmoje scenarijų grupėje. Abiem atvejais biokuro vaidmuo ilgą laiką išlieka dominuojantis, tačiau palaipsniui mažėja, ypač po 2040 m. Tuo pat metu didėja elektrinių šilumos siurblių svarba, o jų plėtra 2B scenarijuje vyksta sparčiau dėl palankesnės elektros kainos. Saugyklų vaidmuo taip pat nuosekliai auga.

Dujų naudojimas abiejuose scenarijuose mažėja ir laikotarpio pabaigoje beveik išnyksta, o atliekų ir biokuro kogeneracijos reikšmė mažėja. Lyginant tarpusavyje, 2B scenarijuje aiškiau matoma perėjimo link elektrifikacijos kryptis – didesnė šilumos dalis gaminama naudojant elektrą, o priklausomybė nuo biokuro mažėja greičiau nei 2A scenarijuje. Tačiau bendra sistemos struktūra išlieka panaši, todėl galima teigti, kad klimato kaitos poveikis kartu su elektros kainos pokyčiais labiau keičia transformacijos tempą, o ne pačią kryptį.

4.1.3. 3-osios scenarijų grupės rezultatų analizė

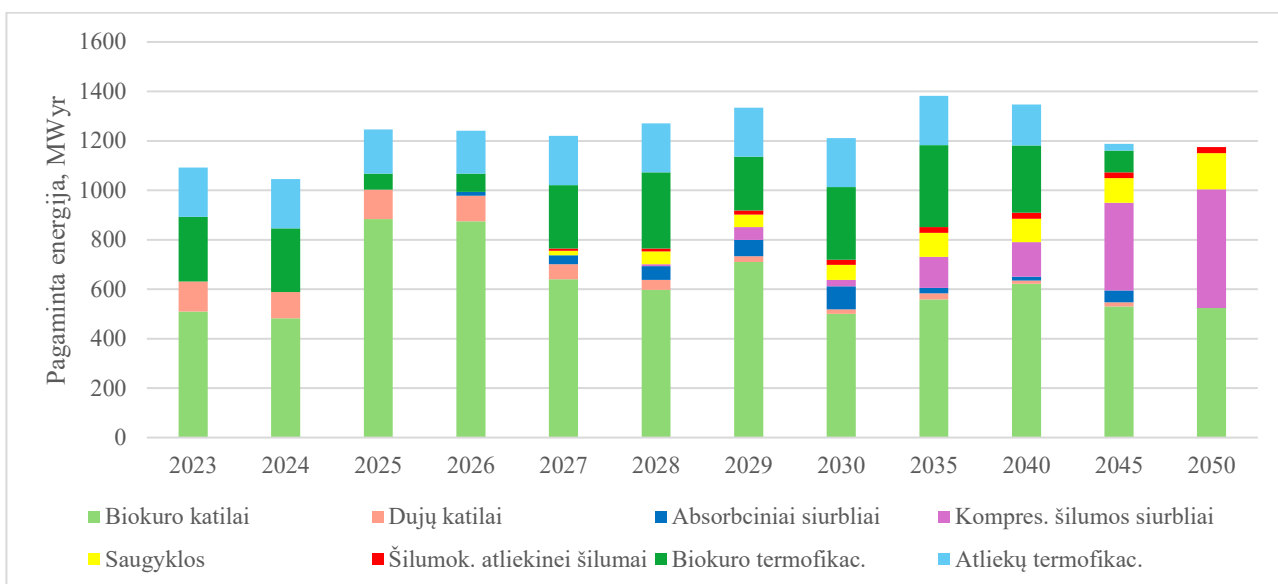
Trečiojoje scenarijų grupėje 3A ir 3B analizuojamas klimato kaitos poveikis šilumos sistemai, įtraukiant ekstremalius temperatūrų svyravimus. Šiuose scenarijuose vertinama, kaip dažnesni ir intensyvesni šalčio bei šilumos pikai keičia šilumos gamybos struktūrą, technologijų pasirinkimą ir sistemos lankstumo poreikį. Taip pat, kaip ir ankstesnėse grupėse, lyginami variantai su skirtingomis elektros kainomis, siekiant įvertinti, ar ekstremalios sąlygos sustiprina elektrifikacijos procesus.



4.7 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3A scenarijuje.

4.5 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3A scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	42%	40%	47%	56%	56%
Dujų katilai	11%	1%	2%	1%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	9%	10%	21%	33%
Saugyklos	0%	5%	7%	7%	5%	9%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	24%	24%	20%	8%	0%
Atliekų termofikac.	18%	16%	14%	12%	2%	0%



4.8 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3B scenarijuje.

4.6 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 3B scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	41%	40%	46%	45%	45%
Dujų katilai	11%	1%	2%	1%	1%	0%
Saulės kolektoriai	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	9%	10%	30%	41%
Saugyklos	0%	5%	7%	7%	8%	12%
Elektriniai katilai	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	24%	24%	20%	7%	0%
Atliekų termofikac.	18%	16%	14%	12%	2%	0%

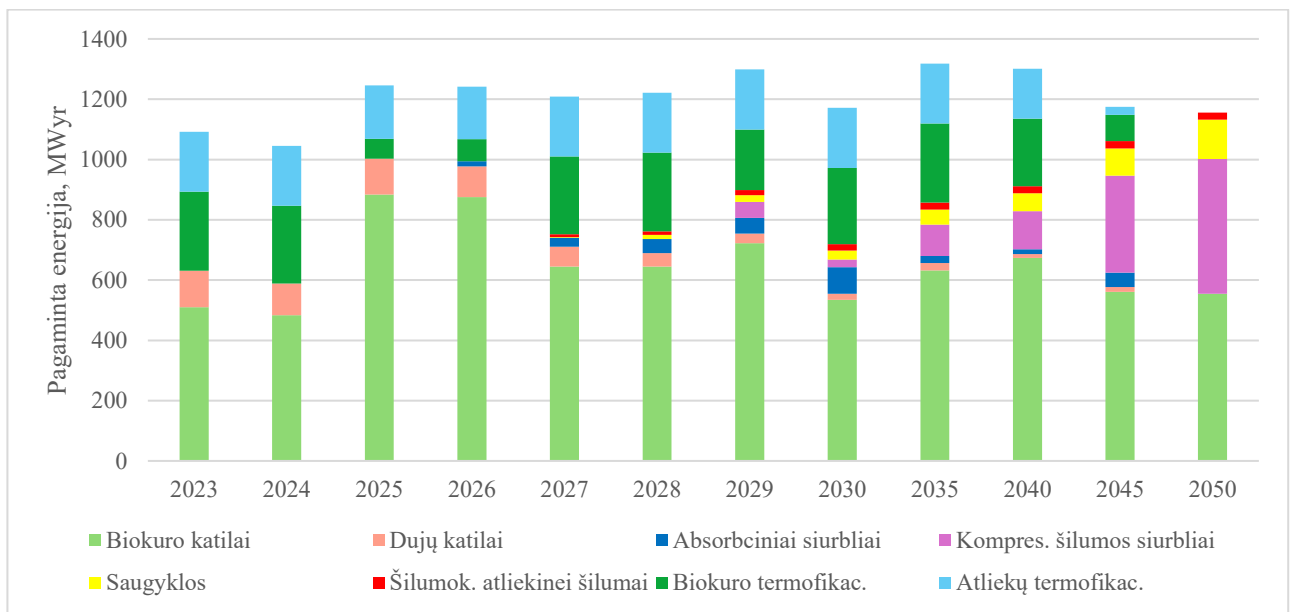
3A scenarijuje didžiąją laikotarpio dalį šilumos gamyboje dominuoja biokuro katilai, kurių dalis ypač išauga ankstyvaisiais metais, tačiau vėliau palaipsniui mažėja ir stabilizuojasi. Biokuro kogeneracija ir atliekų deginimas išlieka reikšmingi iki maždaug 2040 m., tačiau jų svarba ilgainiui mažėja. Dujų katilai nuosekliai mažėja ir laikotarpio pabaigoje visiškai išnyksta. Nuo 2030 m. pradeda ryškėti naujų technologijų reikšmė – didėja absorbcinių ir elektrinių šilumos siurblių dalis bei atsiranda saugyklos, kurios tampa vis svarbesnės sistemos lankstumui. 2050 m. jau matomas aiškesnis perėjimas prie elektrifikacijos, tačiau biokuras vis dar išlaiko dominuojančią poziciją.

3B scenarijuje išlaikomos panašios tendencijos, tačiau pokyčiai vyksta intensyviau. Biokuro katilų dalis mažėja sparčiau, o elektrinių šilumos siurblių plėtra yra ženkliai didesnė, ypač po 2040 m., kai jie tampa viena pagrindinių technologijų. Taip pat labiau išauga saugyklų vaidmuo. Kaip ir 3A scenarijuje, dujų naudojimas visiškai išnyksta, o kogeneracijos reikšmė mažėja. Lyginant su 3A,

šiuo scenarijuje aiškiau matoma kryptis link elektros pagrindu veikiančios šilumos gamybos sistemos.

4.1.4. 4-osios scenarijų grupės rezultatų analizė

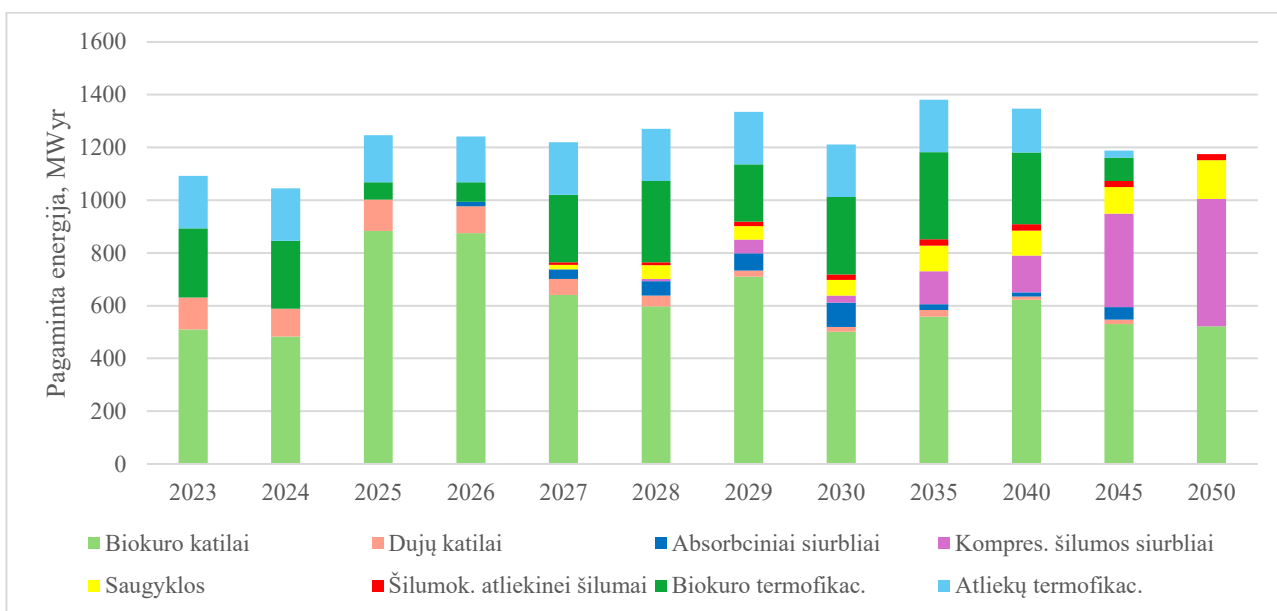
Ketvirtojoje scenarijų grupėje analizuojamas šilumos saugyklų vaidmuo sistemos transformacijoje. Šiuose scenarijuose vertinama, kaip skirtingos saugyklų plėtros prielaidos – jų diegimo tempas ar prieinamumas – veikia šilumos gamybos struktūrą, technologijų pasirinkimą ir sistemos lankstumą. Taip pat, kaip ir ankstesnėse grupėse, lyginami variantai su skirtingomis elektros kainomis, siekiant įvertinti, ar saugyklų integracija sustiprina elektrifikacijos procesus ir leidžia efektyviau išnaudoti elektros energiją šilumos gamybai.



4.9 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4A scenarijuje.

4.7 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4A scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	46%	48%	52%	48%	48%
Dujų katilai	11%	2%	2%	1%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	8%	10%	27%	39%
Saugyklos	0%	3%	4%	5%	8%	11%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	22%	20%	17%	7%	0%
Atliekų termofikac.	18%	17%	15%	13%	2%	0%



4.10 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4B scenarijuje.

4.8 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 4B scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	41%	40%	46%	45%	44%
Dujų katilai	11%	1%	2%	1%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	2%	1%	4%	0%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	9%	10%	30%	41%
Saugyklos	0%	5%	7%	7%	8%	13%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	24%	24%	20%	7%	0%
Atliekų termofikac.	18%	16%	14%	12%	2%	0%

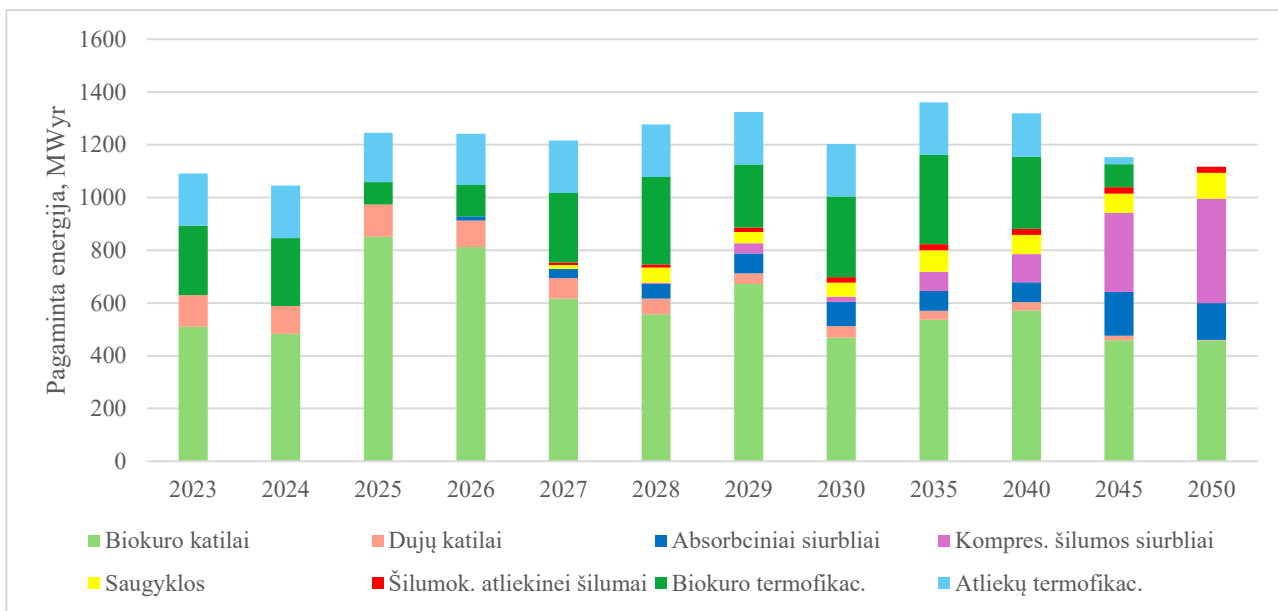
4A scenarijuje šilumos gamyboje dominuoja biokuro katilai, kurių dalis išlieka aukšta visame laikotarpyje. Kogeneracinės technologijos palaipsniui mažėja, o dujų katilai nuosekliai išnyksta. Nuo maždaug 2030 m. pradeda didėti saugyklų ir šilumos siurblių reikšmė, tačiau jų plėtra yra nuosaiki. Net ir 2050 m. biokuras išlieka pagrindiniu energijos šaltiniu, o elektrifikacija vyksta, bet nėra dominuojanti.

4B scenarijuje pokyčiai ryškesni. Nors pradžioje struktūra panaši kaip 4A, vėlesniais metais sparčiau auga elektrinių šilumos siurblių dalis ir didesnę reikšmę įgauna saugyklos. Biokuro katilų dalis mažėja labiau nei 4A scenarijuje, o sistema labiau orientuojasi į elektros pagrindu veikiančias technologijas.

Saugyklų investicinių kaštų sumažinimas 4B scenarijuje neturėjo reikšmingos įtakos jų plėtros mastui – jų dalis sistemoje išlieka panaši kaip ir kituose scenarijuose. Tai rodo, kad saugyklų diegimą lemia ne vien kaina, o pirmiausia realus sistemos lankstumo poreikis bei kitų technologijų konkurencingumas.

4.1.5. 5-osios scenarijų grupės rezultatų analizė

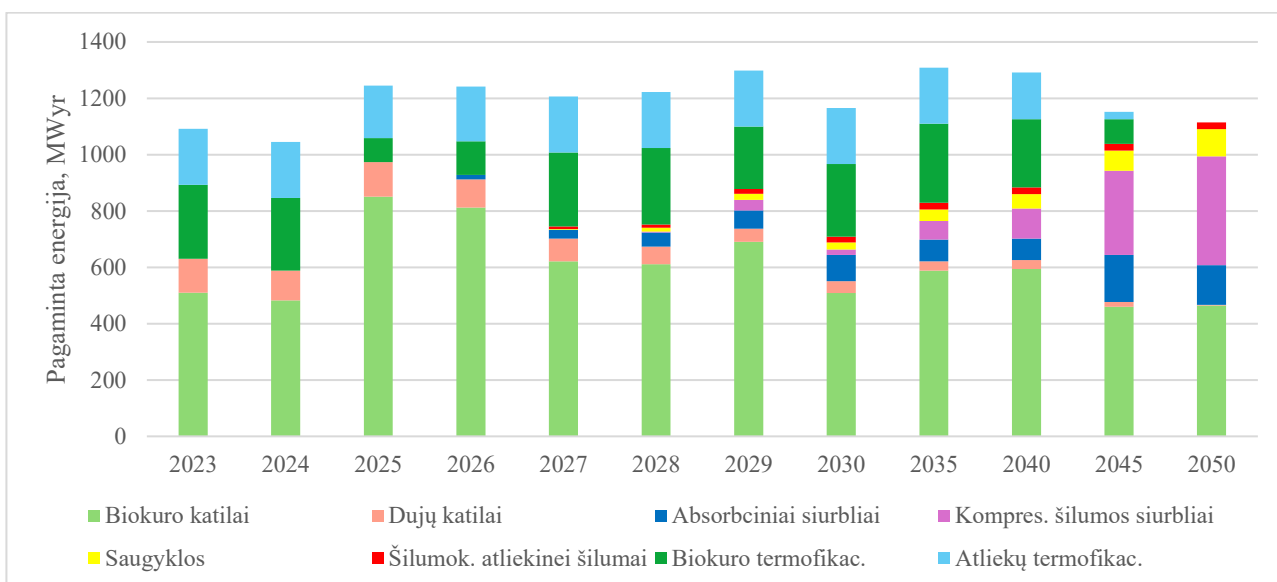
Penktosios scenarijų grupės analizėje vertinama kaip mažesnis CO₂ emisijų mažinimo ambicingumas keičia technologijų pasirinkimą, energijos šaltinių struktūrą ir transformacijos tempą. Šie scenarijai leidžia nustatyti, ar lėtesnė dekarbonizacija išlaiko didesnę priklausomybę nuo tradicinių technologijų, ar vis tiek vyksta reikšminga sistemos elektrifikacija bei atsinaujinančių energijos išteklių plėtra.



4.11 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5A scenarijuje.

4.9 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5A scenarijuje.

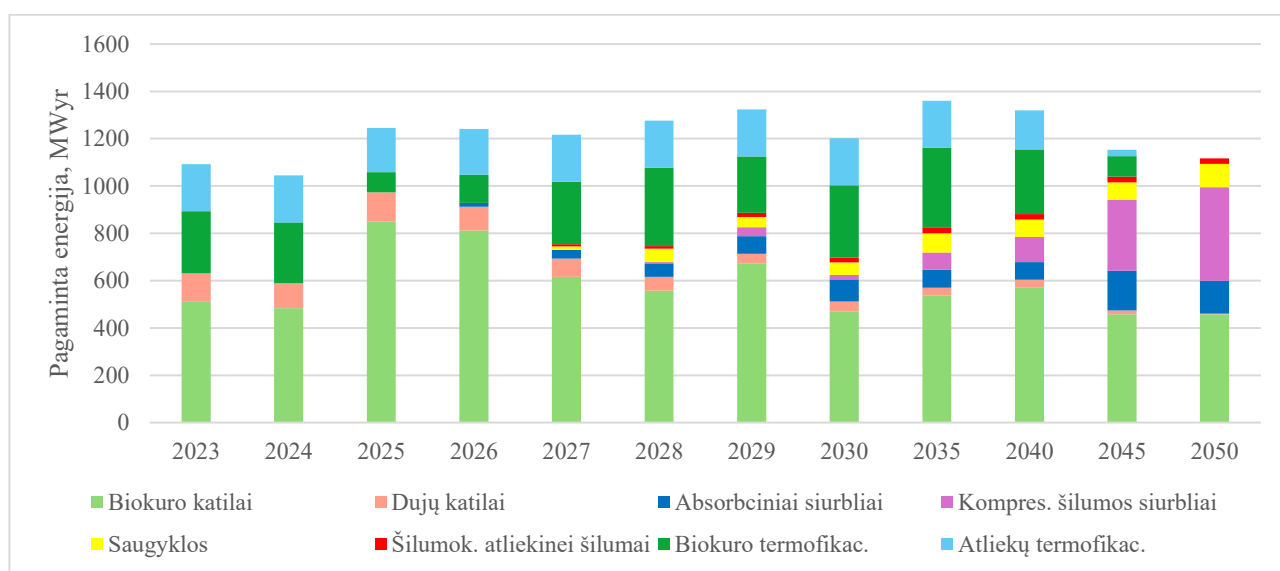
Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	39%	39%	43%	40%	41%
Dujų katilai	11%	4%	2%	2%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	6%	6%	14%	13%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	5%	8%	26%	35%
Saugyklos	0%	4%	6%	6%	6%	9%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	25%	25%	21%	8%	0%
Atliekų termofikac.	18%	17%	15%	13%	2%	0%



4.12 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5B scenarijuje.

4.10 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5B scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	44%	45%	46%	40%	42%
Dujų katilai	11%	4%	3%	2%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	6%	6%	14%	13%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	5%	8%	26%	35%
Saugyklos	0%	2%	3%	4%	6%	9%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	22%	21%	19%	8%	0%
Atliekų termofikac.	18%	17%	15%	13%	2%	0%



4.13 pav. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5C scenarijuje.

4.11 lentelė. Šilumos gamybos technologijų pasiskirstymas 5C scenarijuje.

Technologija	2023	2030	2035	2040	2045	2050
Biokuro katilai	47%	39%	39%	43%	40%	41%
Dujų katilai	11%	4%	2%	2%	1%	0%
Absorbciniai siurbliai	0%	8%	6%	6%	14%	13%
Kompres. šilumos siurbliai	0%	2%	5%	8%	26%	35%
Saugyklos	0%	4%	6%	6%	6%	9%
Šilumok. atliekinei šilumai	0%	2%	2%	2%	2%	2%
Biokuro termofikac.	24%	25%	25%	21%	8%	0%
Atliekų termofikac.	18%	17%	15%	13%	2%	0%

Apibendrinant 5-osios scenarijų grupės rezultatus, matyti, kad nuosaikesni dekarbonizacijos tikslai lemia lėtesnę šilumos sektoriaus transformaciją. Visuose scenarijuose išlieka didelė biokuro katilų dalis, kuri svyruoja apie 45–65 % ir net laikotarpio pabaigoje sudaro reikšmingą šilumos gamybos struktūros dalį. Tuo tarpu elektrinių šilumos siurblių plėtra, nors ir vyksta, yra mažiau intensyvi – jų dalis paprastai pasiekia apie 20–35 %, kai tuo tarpu griežtesnių CO₂ tikslų scenarijuose gali siekti iki 40–45 %.

Dujų naudojimas palaipsniui mažėja nuo maždaug 10 % iki 0–3 %, tačiau, esant mažesniai dekarbonizacijos poreikiui, jis išlieka ilgiau, o tai rodo lėtesnį iškastinio kuro atsisakymą. Šilumos saugyklų plėtra taip pat yra nuosaikesnė – jų dalis dažniausiai neviršija 5–10 %, todėl jos atlieka pagalbinį, o ne dominuojantį vaidmenį.

Apibendrinant visų scenarijų rezultatus, matyti, kad visais atvejais išlaikoma reikšminga biokuro svarba – jo dalis dažniausiai siekia apie 40–70 %, todėl jis išlieka pagrindiniu šilumos gamybos šaltiniu net ir ilgalaikėje perspektyvoje.

Elektrifikacija stipriausiai pasireiškia scenarijuose su griežtesniais dekarbonizacijos tikslais ir palankiomis elektros kainomis – tokiais atvejais elektrinių technologijų dalis gali išaugti iki 35–45 %, ypač po 2035–2040 m. Tuo tarpu esant mažesniai reikalavimui mažinti emisijas, elektrifikacijos mastas apsiriboja apie 20–30 %.

Dujų naudojimas visuose scenarijuose mažėja, tačiau jo atsisakymo tempas priklauso nuo klimato politikos griežtumo – ambicingesniuose scenarijuose dujų dalis sumažėja iki beveik 0 % anksčiau. Šilumos saugyklų plėtra didina sistemos lankstumą, tačiau net ir esant mažesnėms sąnaudoms jų dalis išlieka ribota ir nesukelia reikšmingo proveržio.

Taip pat matyti, kad klimato kaitos ir ekstremalių sąlygų įtraukimas iš esmės nekeičia bendros struktūros – pagrindinių technologijų pasiskirstymas išlieka panašus, nors gali padidėti lankstumo poreikis.

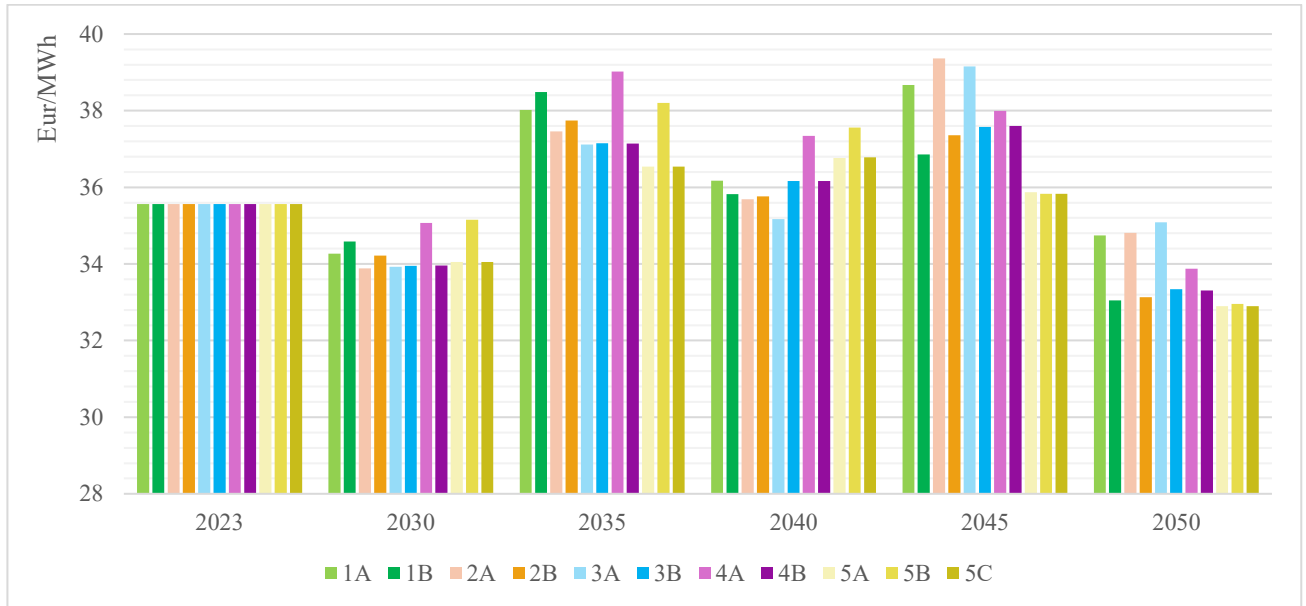
Bendrai galima teigti, kad šilumos sektoriaus transformacija vyksta visais nagrinėtais atvejais, tačiau jos tempas priklauso nuo politinių tikslų ir ekonominių prielaidų: kuo ambicingesni CO₂ mažinimo tikslai ir palankesnės sąlygos elektrifikacijai, tuo spartesnis perėjimas prie mažai anglies dioksido išskiriančių technologijų.

4.2. Ekonominė scenarijų analizė

Šiame poskyryje analizuojami skirtingų scenarijų ekonominiai rodikliai, vertinant investicinius ir veiklos kaštus bei jų pokyčius nagrinėjamu laikotarpiu. Analizė leidžia įvertinti, kaip skirtingos technologinės ir politinės prielaidos veikia bendras sistemos sąnaudas.

4.2.1. Bendri sistemos kaštai

Bendri sistemos kaštai apima investicinius, fiksuotus, kintamuosius ir kuro kaštus. Remiantis šiais kaštais ir pagamintu šilumos kiekiu apskaičiuojama šilumos gamybos savikaina Eur/MWh (4.14 pav.).



4.14 pav. Šilumos gamybos savikaina

Šilumos gamybos savikainos analizė rodo, kad nors technologinė struktūra kinta gana reikšmingai, bendras kainų lygis išlieka panašus. Tai susiję su tuo, kad mažėjant vieniems kaštams, tuo pačiu metu didėja kiti.

Grafike (4.14 pav.) pateikiama šilumos gamybos savikainos kaita 2023–2050 m. skirtinguose scenarijuose. Matyti, kad visų scenarijų savikaina išlieka gana panaši viso nagrinėjamo laikotarpio metu, o skirtumai tarp jų yra santykinai nedideli ir dažniausiai neviršija kelių eurų už MWh. Pradiniu laikotarpiu (2023 m.) visų scenarijų savikaina siekia apie 35–36 Eur/MWh. Iki 2030 m. stebimas nežymus savikainos sumažėjimas, kuris gali būti siejamas su esamos infrastruktūros išnaudojimu ir palyginti nedideliu investicijų poreikiu.

Vėlesniu laikotarpiu mažėjant dujų naudojimui ir iš dalies mažėjant bendram kuro poreikiui, kuro kaštai palaipsniui mažėja. Tačiau šis mažėjimas nėra tiesiogiai matomas bendroje savikainoje, nes tuo pačiu metu didėja investiciniai kaštai bei elektros sąnaudos. Dėl to bendras savikainos lygis išlieka gana stabilus.

Laikotarpiu nuo 2035 iki 2045 m. daugelyje scenarijų fiksuojamas savikainos padidėjimas, kai kuriais atvejais siekiantis beveik 39 Eur/MWh. Šis padidėjimas sutampa su intensyvesniu investicijų

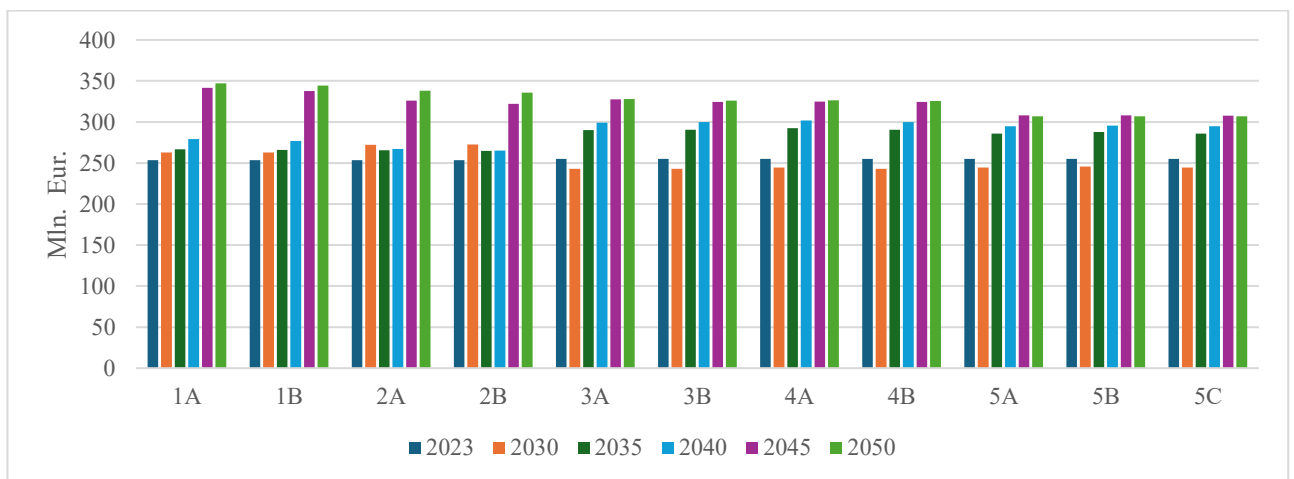
etapu ir ryškesniais technologinės struktūros pokyčiais, pereinant prie mažiau iškastiniu kuru paremtų sprendimų ir didinant elektrifikacijos lygį. Tai rodo, kad pereinamasis laikotarpis į labiau dekarbonizuotą sistemą gali būti susijęs su laikinu sąnaudų augimu.

Artėjant prie 2050 m., savikaina daugelyje scenarijų vėl mažėja iki 33–35 Eur/MWh ribos, kas rodo, kad sistema prisitaiko prie naujos technologinės struktūros ir investicijos pradeda atsipirkti.

Lyginant scenarijų grupes, matyti, kad scenarijai su modifikuota elektros kaina (B) dažniausiai pasižymi šiek tiek mažesne savikaina vėlesniais laikotarpiais, ypač po 2040 m. Tai rodo, kad pigesnė elektros energija sudaro palankesnes sąlygas efektyviau išnaudoti elektrines technologijas. Tuo tarpu 5 grupės scenarijuose, kuriuose numatytas mažesnis dekarbonizacijos siekis, tam tikrais laikotarpiais stebima kiek didesnė savikaina, ypač apie 2045 m., nors 2050 m. skirtumai tarp scenarijų vėl sumažėja.

Apibendrinant galima teigti, kad nors skirtingos prielaidos lemia technologinės struktūros pokyčius, bendras šilumos gamybos savikainos lygis išlieka panašus. Tai rodo sistemos gebėjimą prisitaikyti prie skirtingų sąlygų išlaikant panašų ekonominį efektyvumą.

4.2.2. Kuro/energijos kaštų dinamika



4.15 pav. Kuro/energijos kaštai šilumos gamyboje

Grafike pateikiama kuro ir elektros kaštų kaita skirtinguose scenarijuose 2023–2050 m. laikotarpiu. Matyti, kad kuro kaštai visuose scenarijuose išlieka gana panašaus lygio – 2023 m. jie siekia apie 250 mln. Eur, o skirtumai tarp scenarijų yra minimalūs.

Iki 2030 m. kuro/energijos kaštų dinamika skiriasi priklausomai nuo scenarijų grupės. 1 ir 2 grupės scenarijuose jie išauga iki 260–270 mln. Eur. Tuo tarpu 3–5 scenarijuose stebimas nedidelis mažėjimas. Vėlesniu laikotarpiu 2035–2040 m. kuro kaštai visose scenarijų grupėse padidėja iki 300–340 mln. Eur. Nors šiame laikotarpyje mažėja iškastinio kuro naudojimas, bendras energijos poreikis išlieka didelis. Didelę dalį šilumos gamybos ir toliau sudaro biokuras, o kartu sparčiai didėja elektros energijos naudojimas dėl elektrinių šilumos siurblių plėtros.

Ši dinamika rodo, kad nors sistemoje didėja elektrifikacijos mastas, reikšminga biokuro dalis išlieka viso laikotarpio metu (apie 40–55 %), todėl kuro poreikis nemažėja tiek, kad turėtų esminį poveikį bendram kaštų lygiui.

Lyginant scenarijus tarpusavyje, matyti, kad skirtumai tarp A ir B scenarijų nėra ryškūs – energijos kaštai išlieka panašūs, nepaisant skirtingų elektros kainų prielaidų. Tai rodo, kad bendrą kaštų lygį lemia ne tik kainos, bet ir bendras energijos poreikis bei jo struktūra.

Apibendrinant galima teigti, kad nors keičiasi energijos šaltinių struktūra – mažėja iškastinio kuro dalis ir didėja elektros energijos naudojimas – bendras energijos kaštų lygis išlieka panašus. Tai rodo, kad vyksta ne tiek kaštų mažėjimas, kiek jų persiskirstymas tarp skirtingų energijos rūšių.

Ekonominė analizė rodo, kad skirtingos šilumos sektoriaus raidos trajektorijos nesukuria esminių skirtumų kaštuose. Visuose nagrinėtuose scenarijuose šilumos gamybos savikaina išlieka panaši – dažniausiai svyruoja apie 33–39 Eur/MWh, o skirtumai tarp scenarijų yra nedideli. Vis dėlto galima pastebėti tam tikras tendencijas. Scenarijai su palankesnėmis elektros kainomis (B grupė) ilgalaikėje perspektyvoje dažniau pasižymi šiek tiek mažesne savikaina, ypač po 2040 m., kas rodo elektrifikacijos ekonominį potencialą. Ekonomiškai panašūs rezultatai suteikia daugiau lankstumo sprendimų priėmimui, nes leidžia rinktis kryptį pagal strateginius prioritetus, o ne vien tik kaštų minimizavimą.

4.2.3. Dekarbonizacijos poveikis kaštams ir kuro struktūrai

Pagal scenarijų lentelę, 1–4 grupių scenarijuose numatytas 100 % dekarbonizacijos lygis, tuo tarpu 5 grupės scenarijuose dekarbonizacijos tikslas yra mažesnis – apie 70 %. Tai leidžia įvertinti, kaip skirtingi dekarbonizacijos tikslai veikia ir kuro/energijos kaštus, ir bendrą šilumos gamybos savikainą.

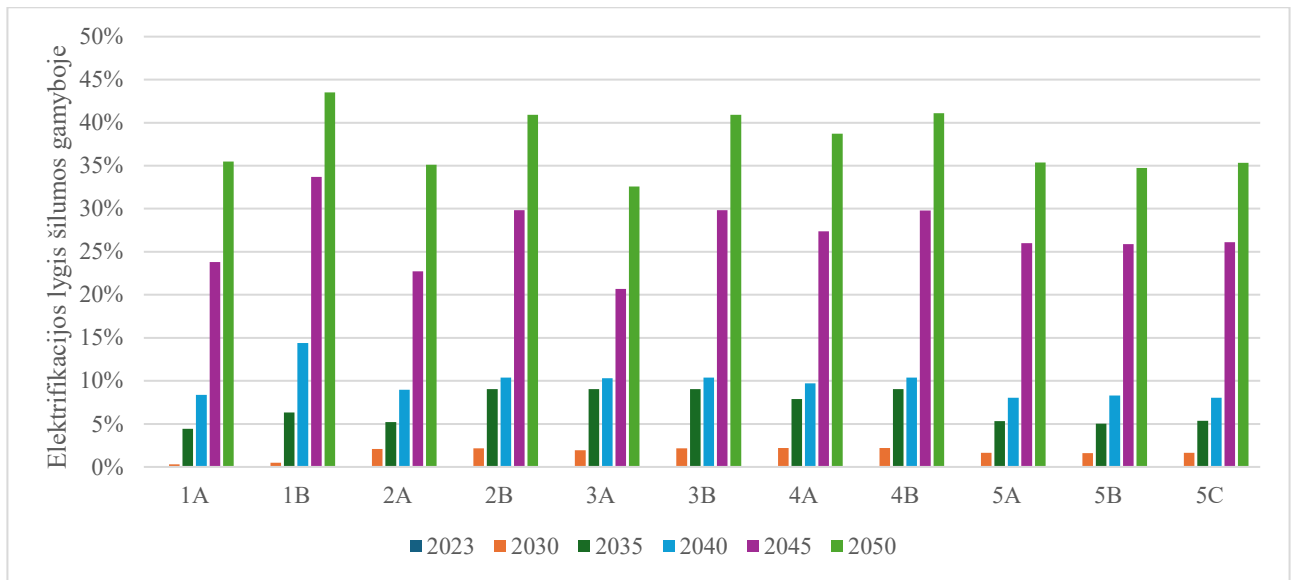
Lyginant aukštesnio dekarbonizacijos lygio scenarijų 4A su mažesnio dekarbonizacijos siekio scenarijumi 5A, matyti, kad pagrindiniai skirtumai atsiskleidžia technologinėje struktūroje. 4A scenarijuje iki 2050 m. elektrinių šilumos siurblių dalis išauga iki 39 %, tuo tarpu 5A scenarijuje – iki maždaug 35 %. Tai rodo spartesnę elektrifikaciją aukštesnio dekarbonizacijos lygio scenarijuose.

Tuo tarpu 5A scenarijuje didesnę reikšmę išlaiko absorbciniai šilumos siurbliai – jų dalis 2050 m. siekia apie 13 %, kai 4A scenarijuje ji yra artima nuliui. Tai leidžia teigti, kad mažesnio dekarbonizacijos lygio scenarijuose išlaikomas didesnis kuro naudojimas, o elektrifikacija vyksta lėčiau.

Nepaisant šių skirtumų, abiejuose scenarijuose išlieka didelė biokuro svarba – biokuro katilų dalis 2050 m. siekia 48 % 4A scenarijuje ir apie 41 % 5A scenarijuje. Tai rodo, kad net ir esant skirtingam dekarbonizacijos lygiui, sistema išlieka reikšmingai priklausoma nuo biokuro.

Šie struktūriniai skirtumai paaiškina, kodėl energijos/kuro kaštai ir šilumos gamybos savikaina tarp scenarijų išlieka panašūs. Aukštesnio dekarbonizacijos lygio scenarijuje didesnė elektrifikacija mažina kuro naudojimą, tačiau didina elektros energijos sąnaudas. Tuo tarpu 5 grupės scenarijuose didesnis absorbcinių siurblių naudojimas leidžia efektyviau panaudoti kurą, tačiau išlaiko didesnę priklausomybę nuo jo. Dėl to galutinis kaštų lygis abiem atvejais išlieka panašus.

Apibendrinant galima teigti, kad didesnis dekarbonizacijos lygis leidžia mažinti priklausomybę nuo išskastinio kuro, tačiau neturi esminės įtakos galutinei šilumos gamybos savikainai. Tai rodo, kad emisijų mažinimo tikslai gali būti įgyvendinami be reikšmingos papildomos ekonominės naštos.



4.16 pav. Elektrinių technologijų dalis šilumos gamyboje CŠT tinkle 2023–2050 m. skirtinguose scenarijuose

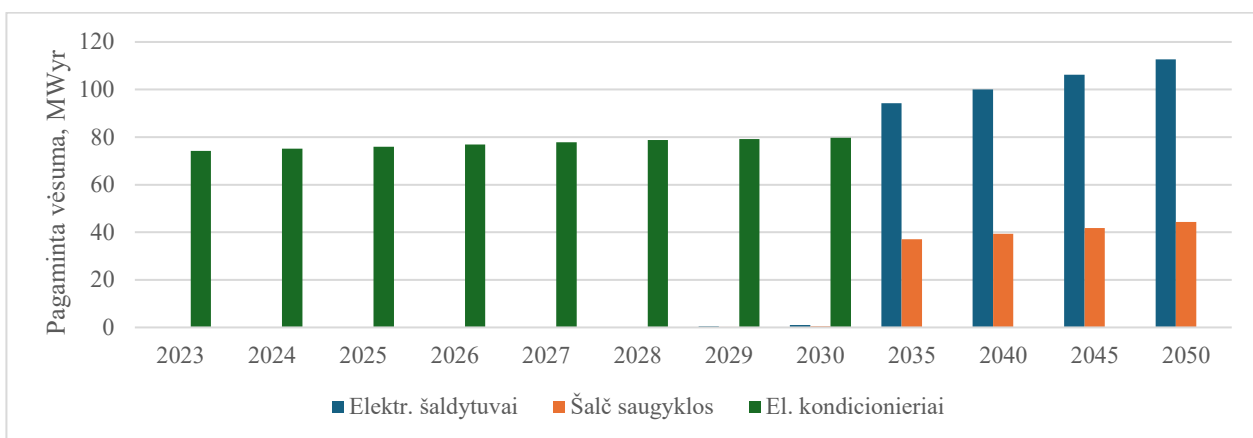
Grafike (paveikslas 4.16) pateikiama elektrifikacijos lygio kaita skirtinguose scenarijuose 2023–2050 m. laikotarpiu. Matyti, kad visais atvejais elektrifikacija didėja palaipsniui – nuo 0 % 2023 m. iki 30–44 % 2050 m.

Didžiausias elektrifikacijos mastas pasiekiamas 1–4 grupės scenarijuose, ypač B alternatyvose, kur 2050 m. elektrifikacija siekia apie 41–44 %. Tuo tarpu 5 grupės scenarijuose, kai dekarbonizacijos lygis mažesnis, elektrifikacija mažesnė – apie 35 %.

Tai rodo, kad net ir esant aukštam dekarbonizacijos lygiui, sistema nėra pilnai elektrifikuojama, o reikšminga dalis energijos poreikio ir toliau tenkinama kuro pagrindu veikiančiomis technologijomis.

4.2.4. CVT sistemos rezultatų apžvalga

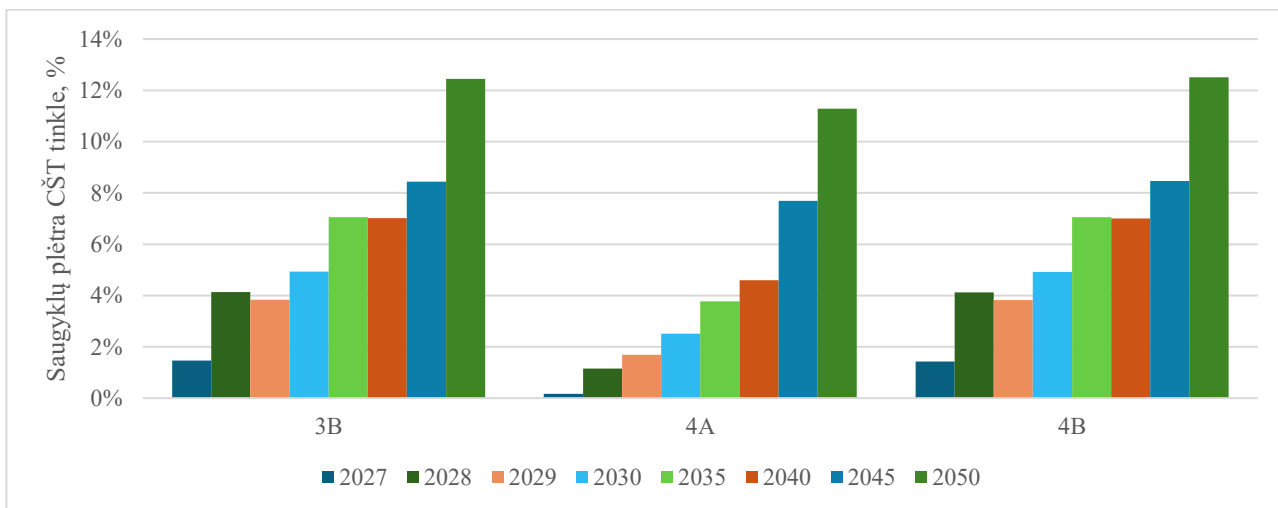
Vėsos gamyba analizuojama apibendrintai, kadangi jos poreikis modelyje laikomas pastoviu ir scenarijuose nekinta. Dėl to pateikiami tik apibendrinti kaštai ir technologinė struktūra, o detalesnė scenarijų analizė nėra atliekama.



4.17 pav. Vėsumos gamybos struktūra Lietuvoje 2023-2050 m.

Grafike 4.17 matyti, kad iki 2028 m. vėsos poreikis tenkinamas naudojant decentralizuotus sprendimus – elektrinius kondicionierius. Nuo 2028 m. sistemoje atsiranda elektriniai šaldytuvai, o nuo 2029 m. – ir šalčio saugyklos. Šiuo laikotarpiu prasideda perėjimas nuo decentralizuotos prie centralizuotos vėsos gamybos. Tarp 2031 ir 2035 m. modelyje kondicionierių vaidmuo visiškai išnyksta, o vėsos gamyba perkeliama į centralizuotą sistemą. Vėlesniais metais dominuoja elektriniai šaldytuvai, kurių pagaminamas vėsos kiekis didėja nuo 0,75 TWh per metus 2035 m. iki daugiau nei 0,9 TWh per metus 2050 m., saugyklų kiekis nuosekliai auga.

4.3. Šilumos saugyklų reikšmė sistemoje



4.18 pav. Šilumos saugyklų plėtra CŠT tinkle.

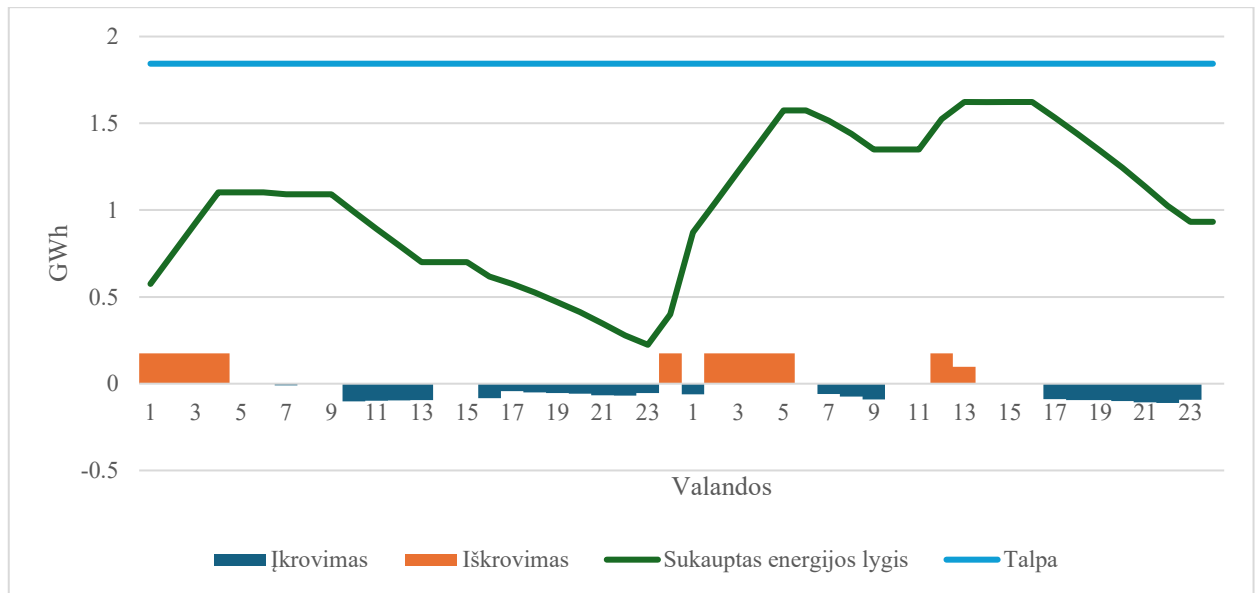
Paveiksle 4.18 pateiktas šilumos saugyklų dalies kitimas 3B, 4A ir 4B scenarijuose. 3B ir 4B scenarijuose saugyklos pradeda atsirasti tuo pačiu metu – apie 2027 m., kai jų dalis siekia apie 1 %, ir toliau auga gana panašiu tempu.

Tuo tarpu 4A scenarijuje saugyklų plėtra prasideda vėliau – tik apie 2028 m., o jų dalis visą laikotarpį išlieka mažesnė nei kituose scenarijuose.

Iki 2040 m. 3B ir 4B scenarijai praktiškai sutampa, tačiau vėlesniu laikotarpiu 4B scenarijuje stebimas šiek tiek didesnis augimas, o 2050 m. saugyklų dalis pasiekia apie 13 %, palyginti su 12 % 3B ir 11 % 4A scenarijuose.

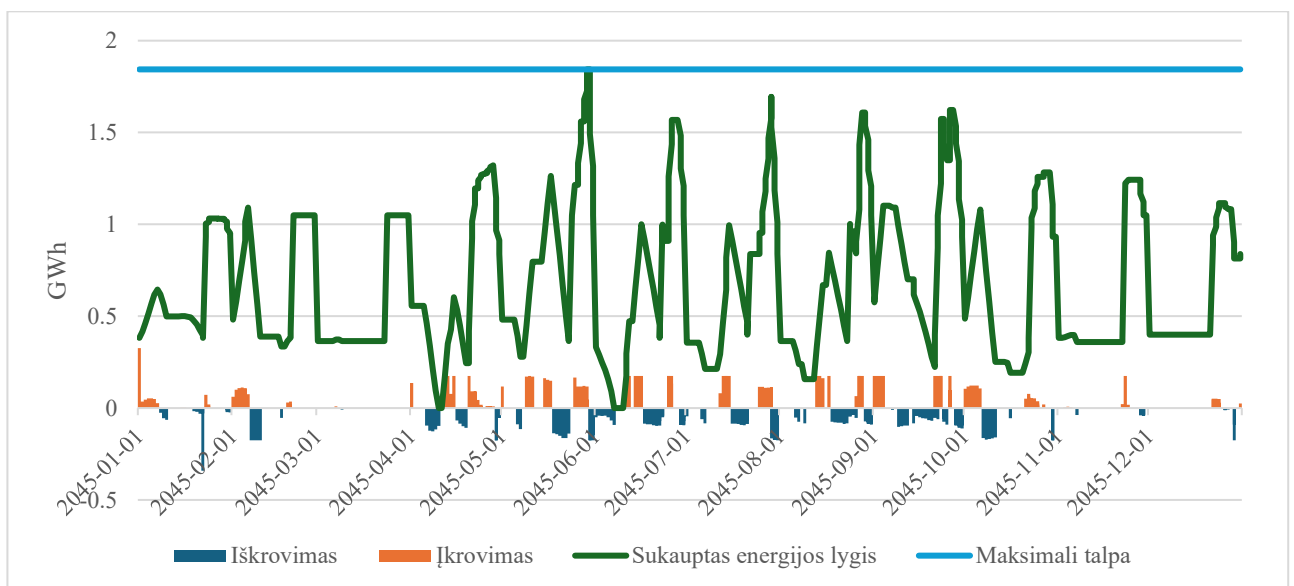
4B scenarijuje saugyklų plėtra spartesnė dėl nuosekliai mažinamų jų kaštų, tačiau galutinė saugyklų dalis sistemoje išlieka panaši kaip ir 4A scenarijuje.

4.3.1. Šilumos saugyklų darbas



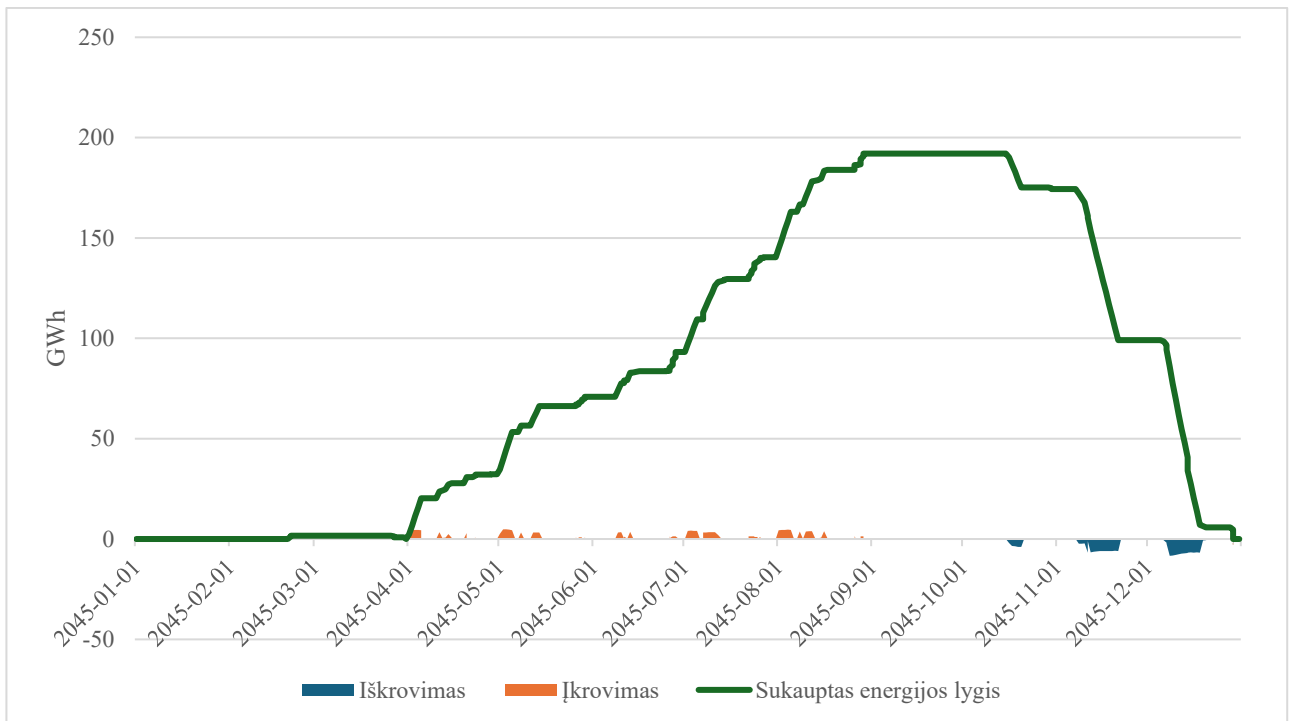
4.19 pav. Dieninės šilumos saugyklos veikimas ir energijos lygis 2045 m. rugsėjo mėn.

Grafike 4.19 pateiktas dienos šilumos saugyklos veikimas 2045 m. rugsėjo mėn. tipinę darbo dieną ir tipinę savaitgalio dieną. Jame parodyti įkrovimo ir iškrovimo srantai, sukauptos energijos lygis bei maksimali saugyklos talpa.



4.20 pav. Dieninės šilumos saugyklos veikimas ir energijos lygis 2045 m.

Grafikas 4.20 parodo dienos šilumos saugyklos naudojimą 2045 m., įkrovimo ir iškrovimo epizodus bei sukauptos energijos kiekio kitimą metų eigoje. Matyti, kad saugyklos užpildymo lygis didžiąją metų dalį svyruoja žemiau maksimalios talpos, tačiau birželio mėn. ši riba trumpam pasiekama. Dieninė saugykla modelyje aktyviai naudojama trumpalaikiam šilumos sistemos balansavimui, o atskirais laikotarpiais išnaudojama beveik visa jos talpa.



4.21 pav. Sezoninės šilumos saugyklos veikimas ir energijos lygis 2045 m.

2045 m. sezoninėje saugykloje sukauptos energijos kiekis didėja nuo pavasario iki rudens, o maksimalus lygis siekia apie 192 GWh. Vėliau, prasidėjus šildymo sezonui, sukaupta energija palaipsniui išnaudojama. Sezoninė saugykla modelyje atlieka ilgalaikio šilumos kaupimo funkciją ir leidžia perkelti šilumos perteklių iš šiltojo metų laikotarpio į didesnio šilumos poreikio mėnesius.

Atlikta analizė parodė, kad šilumos saugyklos didina sistemos lankstumą ir leidžia efektyviau valdyti šilumos gamybos bei vartojimo netolygumus. Paros saugyklos svarbios trumpalaikiam balansavimui, o sezoninės – ilgalaikiam šilumos kaupimui ir panaudojimui šildymo sezono metu.

Išvados

1. Išnagrinėjus centralizuotos šilumos ir vėsumos tiekimo sistemų raidos tendencijas nustatyta, kad Lietuvos centralizuoto šildymo sektoriuje dominuoja biokuras (daugiau nei 70 % kuro balanso). Atliekų deginimo ir kogeneracijos technologijos sudaro reikšmingą sistemos dalį. Vis dėlto didžioji tinklų tebėra antros ir trečios kartos, kuriems būdinga aukšta tiekimo temperatūra ir ribotos skaitmeninės valdymo galimybės. Europos praktika rodo perėjimą prie ketvirtos kartos centralizuoto šilumos tiekimo sistemų, paremtų žematemperatūriais (apie 50–70 °C) tinklais, atsinaujinančių ir atliekinės šilumos integracija bei didelio tūrio šilumos kaupimu. Tokia modernizacija ne tik didina energetinį efektyvumą ir mažina CO₂ emisijas, bet ir leidžia CŠT/CVT tinklams teikti lankstumo paslaugas elektros rinkai taikant „power-to-heat“ sprendimus, tokius kaip šilumos siurbliai ir elektriniai katilai.
2. Įvertinus klimato kaitos scenarijus (RCP 4.5–RCP 8.5) nustatyta, kad iki 2100 m. Lietuvoje šildymo dienolaipsnių skaičius gali sumažėti apie 25–35 %, o vėsinimo dienolaipsnių – padidėti 150–200 %. Tai rodo mažėjantį šilumos ir sparčiai augantį vėsinimo poreikį bei didesnius elektros apkrovos pikus vasarą. Įdiegus didelio galingumo šilumos siurblius ir akumuliacines talpas, CŠT/CVT tinklai galėtų tapti viena svarbiausių sistemos lankstumo priemonių – panaudoti perteklinę AEI elektrą, subalansuoti šalies elektros sistemą ir sumažinti brangaus „pikinio“ generavimo poreikį.
3. Sukurta tyrimo metodika, paremta optimizaciniu energetikos sistemos modeliavimu naudojant MESSAGE modelį, leido įvertinti Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos raidą iki 2050 m., įtraukiant skirtingus klimato, elektros kainų, dekarbonizacijos ir technologinės plėtros scenarijus. Modelyje įvertintos pagrindinės šilumos gamybos technologijos, šilumos saugyklos, kuro rūšys, CO₂ ribojimai ir sistemos sąnaudų struktūra, taip pat iš dalies atsižvelgta į vėsumos poreikį.
4. Atlikta scenarijų analizė parodė, kad visuose nagrinėtuose scenarijuose sistema nuosekliai juda dekarbonizacijos ir elektrifikacijos kryptimi, tačiau biokuras išlieka reikšmingas šilumos gamybos šaltinis visą laikotarpį. Dujų naudojimas palaipsniui mažėja ir laikotarpio pabaigoje tampa minimalus, o elektrinių šilumos siurblių ir šilumos saugyklų reikšmė ypač išauga po 2035–2040 m. Analizės rezultatai rodo, kad saulės kolektorių, mažųjų branduolinių elektrinių, trigeneracijos ir elektrinių katilų technologijos nagrinėtomis sąlygomis nebuvo konkurencingos, todėl jų plėtra sistemoje nebuvo pagrįsta.
5. Palyginus scenarijus nustatyta, kad skirtingos prielaidos labiau keičia CŠT technologinę struktūrą negu šilumos gamybos savikainą. Palankesnė elektros kaina spartina elektrifikaciją, aukštesni dekarbonizacijos tikslai mažina iškastinio kuro naudojimą, o šilumos saugyklos didina sistemos lankstumą. 2050 m. kompresoriniai šilumos siurbliai sudaro apie 33–35 %, o palankesnės elektros kainos scenarijuose 41–45 % CŠT struktūros. Šilumos saugyklos padengia 9–13 % šilumos poreikio, o dujų katilų ir termofikacinių elektrinių dalis daugumoje scenarijų sumažėja iki 0 %. Nepaisant šių technologinių pokyčių, 2050 m. šilumos gamybos savikaina išlieka panaši – 33–35 Eur/MWh. Vėsos gamyba analizėje vertinama kaip pastovi dedamoji, todėl reikšmingos įtakos scenarijų skirtumams neturi.

Literatūros sąrašas

- [1] S. Frederiksen, District heating and cooling, 1. ed. Lund: Studentlitteratur, 2013.
- [2] Wikipedia, „District heating“. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/District_heating [žiūrėta 2025-05-23].
- [3] International District Energy Association, „District Energy in Cities“. Prieiga per internetą: <https://www.districtenergy.org/topics/district-energy-cities> [žiūrėta 2025-04-24].
- [4] Dominik Rutz, Carlo Winterscheid, Thomas Pauschinger, Sebastian Grimm, Tobias Roth, Borna Doračić, Gillian Dyer, ir Thomas A. Østergaard, Reto Hummelshøj, „Centralizuoto šilumos tiekimo tinklų tobulinimas“. Prieiga per internetą: https://www.upgrade-dh.eu/images/Publications%20and%20Reports/D2.5_2019-07-02_Upgrade-DH_Handbook_EN.pdf [žiūrėta 2025-05-07].
- [5] H. Lund ir kt „4th Generation District Heating (4GDH)“, Energy, t. 68, p. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089 [žiūrėta 2025-05-08].
- [6] Lietuvos Respublikos Seimas, Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija. 2024. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/rs/legalact/TAD/42fa9900352b11efb121d2fe3a0eff27> [žiūrėta 2025-05-15].
- [7] Lietuvos energetikos ministerija, „District Heating in Lithuania: Overview of the Sector“, Lithuanian District Heating Association. Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/en/sectoral-policy/heating-sector/sector-activity/> [žiūrėta 2025-05-07].
- [8] DBDH – Danish Board of District Heating, „All About District Cooling“. Prieiga per internetą: <https://dbdh.org/all-about-district-energy/cooling/> [žiūrėta 2025-04-24].
- [9] Energy Institute, „Statistical Review of World Energy – Data Downloads“. Prieiga per internetą: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads> [žiūrėta 2025-04-24].
- [10] Maiden Capital, „District Cooling: Efficient, but Sustainable?“. Prieiga per internetą: <https://www.maidencap.com/insights/district-cooling-efficient-but-sustainable>.
- [11] „All About District Cooling“. Prieiga per internetą: <https://dbdh.org/all-about-district-energy/cooling/> [žiūrėta 2025-05-08].
- [12] IEA, „district cooling“. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/articles/the-go-to-guide-for-sustainable-district-cooling> [žiūrėta 2025-05-23].
- [13] Alfa Laval, „District cooling“, alfalaval.com. Prieiga per internetą: <https://www.alfalaval.com/industries/hvac/district-cooling/> [žiūrėta 2025-04-25].
- [14] „Euroheat & Power – District Energy Association“. Prieiga per internetą: <https://www.euroheat.org/> [žiūrėta 2025-05-07].
- [15] Euroheat & Power, „Final Market Outlook 2024“, Euroheat & Power, 2024. Prieiga per internetą: https://api.euroheat.org/uploads/Final_Market_Outlook_2024_0efcdb4b7e.pdf [žiūrėta 2025-05-07].

- [16] RAMBOLL, „District Heating and Cooling Stock at EU level“, 2020, doi: 10.5281/ZENODO.6611107 [žiūrėta 2025-05-23].
- [17] International District Energy Association (IDEA), „District Cooling“. Prieiga per internetą: <https://www.districtenergy.org/topics/district-cooling> [žiūrėta 2025-04-24].
- [18] Danish Board of District Heating (DBDH), „The Challenge of District Cooling: Turning Vision into Reality“. Prieiga per internetą: <https://dbdh.org/the-challenge-of-district-cooling-turning-vision-into-reality> [žiūrėta 2025-04-24].
- [19] Danish Board of District Heating (DBDH), „District Heating in Denmark“. Prieiga per internetą: <https://dbdh.org/all-about-district-energy/district-heating-in-denmark> [žiūrėta 2025-04-24].
- [20] pv Europe editorial team, „Heat transition in Denmark: More PV in district heating“. Prieiga per internetą: <https://www.pveurope.eu/power2heat/heat-transition-denmark-more-pv-district-heating> [žiūrėta 2025-04-24].
- [21] Z. Tian ir kt., „Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends“, Energy Convers. Manag., t. 189, p. 67–80, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.071 [žiūrėta 2025-04-24].
- [22] M. Gao ir kt., „Validation and optimization of a solar district heating system with large scale heat storage“, J. Clean. Prod., t. 484, p. 144360, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.144360 [žiūrėta 2025-04-24].
- [23] Danish Board of District Heating (DBDH), „District cooling to major customers in Copenhagen“. Prieiga per internetą: <https://dbdh.org/district-cooling-to-major-customers-in-copenhagen/> [žiūrėta 2025-04-24].
- [24] M. Abugabbara ir kt., „How to develop fifth-generation district heating and cooling in Sweden?“, Energy Rep., t. 9, p. 4971–4983, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.04.048 [žiūrėta 2025-04-24].
- [25] SweHeat & Cooling, „Swedish District Energy – a success story“. Prieiga per internetą: <https://www.sweheat.com/se-success/> [žiūrėta 2025-04-25].
- [26] SweHeat & Cooling, „Best Practice Guide: District Energy by Sweden“. Prieiga per internetą: https://www.shcbysweden.se/wp-content/uploads/2019/11/Best-Practice-Guide_District-Energy-by-Sweden-EN.pdf [žiūrėta 2025-04-25].
- [27] Avfall Sverige, „Swedish Waste Management 2023“. Prieiga per internetą: https://www.avfallsverige.se/media/cwibhsx2/svensk_avfallshantering_2023_en.pdf [žiūrėta 2025-04-25].
- [28] International Institute for Energy Conservation (IIEC), „Tri-generation – Integrated Cooling, Heating and Power“. Prieiga per internetą: https://www.iiec.org/sdc/SDC_Tri-generation_factsheet.pdf [žiūrėta 2025-04-25].

- [29] Anne Kauranen, „Finland’s last active coal-fired power, heat plant shuts down“, Reuters, 2025-04-01. Prieiga per internetą: <https://www.reuters.com/business/energy/finlands-last-active-coal-fired-power-heat-plant-shuts-down-2025-04-01/> [žiūrėta 2025-04-28].
- [30] T. Ranta ir kt., „The effect of fuels and other variables on the price of district heating in Finland“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, t. 209, p. 115086, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.115086 [žiūrėta 2025-04-25].
- [31] Finnish Energy, „Energy Year 2024: District Heating (preliminary graphs)“. Prieiga per internetą: <https://energia.fi/en/publications/> [žiūrėta 2025-04-25].
- [32] Rosie Frost, „Helsinki is building the world’s largest heat pump to keep its homes warm“, *Euronews Green*, 2024-08-29. Prieiga per internetą: <https://www.euronews.com/green/2024/08/29/helsinki-is-building-the-worlds-largest-heat-pump-to-keep-its-homes-warm> [žiūrėta 2025-04-30].
- [33] AlixPartners, „The future of Germany’s heating industry: Charting a path forward“, 2024. Prieiga per internetą: <https://www.alixpartners.com/insights/102jzbd/the-future-of-germanys-heating-industry-charting-a-path-forward/> [žiūrėta 2025-04-30].
- [34] Aquatherm GmbH, „With district heating towards the heat transition“. Prieiga per internetą: <https://blog.aquatherm.de/en/with-district-heating-towards-the-heat-transition> [žiūrėta 2025-04-30].
- [35] Bayern Innovativ GmbH, „German district heating: 30 percent climate-neutral“. Prieiga per internetą: <https://www.bayern-innovativ.de/en/emagazine/detail/en/page/german-district-heating-30-percent-climate-neutral> [žiūrėta 2025-04-30].
- [36] R. Jonynas ir kt., „Renewables for district heating: The case of Lithuania“, *Energy*, t. 211, p. 119064, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.119064 [žiūrėta 2025-04-24].
- [37] A. Veuillet ir kt., „District Heating and Cooling stock at EU level“, 2020. Prieiga per internetą: https://www.wedistrict.eu/wp-content/uploads/2020/11/WEDISTRICT_WP2_D2.3-District-Heating-and-Cooling-stock-at-EU-level.pdf [žiūrėta 2025-05-08].
- [38] CHC.lt redakcija, „Vilniuje dygs pirmieji namai, kuriuose centralizuotai bus tiekiamas ne tik šildymas, bet ir vėsinimas“. Prieiga per internetą: <https://chc.lt/2022/10/vilniuje-dygs-pirmieji-namai-kuriuose-centralizuotai-bus-tiekiamas-ne-tik-sildymas-bet-ir-vesinimas/> [žiūrėta 2025-05-08].
- [39] Kauno energija, „Centralizuotai tiekiamą vėsumą – efektyviausias sprendimas verslui“. Prieiga per internetą: <https://www.kaunoenergija.lt/naujienos/centralizuotai-tiekiamas-vesuma-efektyviausias-sprendimas-verslui> [žiūrėta 2025-05-08].
- [40] International Institute of Refrigeration, „State of play of district heating and cooling in Europe“. Prieiga per internetą: <https://iifir.org/en/news/state-of-play-of-district-heating-and-cooling-in-europe> [žiūrėta 2025-05-26].
- [41] Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija, „Centralizuoto šilumos tiekimo sektoriaus apžvalga 2023 m.“ Prieiga per internetą: <https://lsta.lt/wp-content/uploads/2023/12/LSTA-Silumine-technika-2023-Nr-2-88.pdf> [žiūrėta 2025-05-09].

- [42] Cerema, „District Heating and Cooling in France“. Prieiga per internetą: <https://reseaux-chaleur.cerema.fr/espace-documentaire/district-heating-and-cooling-france> [žiūrėta 2025-05-26].
- [43] M. Balboa-Fernández ir kt., „Analysis of District Heating and Cooling systems in Spain“, Energy Rep., t. 6, p. 532–537, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.202 [žiūrėta 2025-05-26].
- [44] Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija, „LIETUVOS CENTRALIZUOTO ŠILUMOS TIEKIMO SEKTORIAUS 2021 METŲ APŽVALGA“, 2022. Prieiga per internetą: https://lsta.lt/wp-content/uploads/2022/10/2021_CST_apzvalga_Final_RG.pdf [žiūrėta 2025-05-12].
- [45] Technology data for energy plants, Energistyrelsen, 2012. Prieiga per internetą: <https://ens.dk/technologydata> [žiūrėta 2025-05-29].
- [46] Danish Energy Agency, „Technology Data Catalogue for Energy Storage“, 2018. Prieiga per internetą: <https://ens.dk/technologydata> [žiūrėta 2025-05-29].
- [47] Danish Energy Agency, „Technology Data for Energy Plants for Electricity and District Heating Generation“, 2024. Prieiga per internetą: <https://ens.dk/technologydata> [žiūrėta 2025-05-29].
- [48] European Commission JRC, „Long term projections of heating and cooling“, 2017. Prieiga per internetą: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/24422> [žiūrėta 2025-05-29].
- [49] A. Volkova ir kt., „Large-scale heat pumps for district heating systems in the Baltics“, Renew. Sustain. Energy Rev., t. 167, p. 112749, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112749 [žiūrėta 2025-05-15].
- [50] Solarthermalworld.org, „Denmark: 37 MW Field with 203000 m3 Storage“. Prieiga per internetą: <https://www.solarthermalworld.org/news/denmark-37-mw-field-203000-m3-storage-underway/> [žiūrėta 2025-05-29].
- [51] Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija, „CŠT sektoriaus 2022 metų apžvalga“ [žiūrėta 2025-11-19].
- [52] H. Kauko ir kt., „Flexibility through power-to-heat“, Energy, t. 313, p. 134017, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.134017 [žiūrėta 2025-05-29].
- [53] SINTEF, „Power-to-heat flexibility“. Prieiga per internetą: <https://blog.sintef.com> [žiūrėta 2025-05-26].
- [54] N. Javanshir ir kt., „Operation of district heat network“, Energy, t. 266, p. 126423, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126423 [žiūrėta 2025-06-12].
- [55] Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, „Klimato kaitos prognozės“. Prieiga per internetą: <https://klimatokaita.lt> [žiūrėta 2025-05-20].
- [56] LHMT, „Klimato pokyčiai“. Prieiga per internetą: <https://www.meteo.lt/klimatas/klimato-kaita/klimato-pokyciai-nuo-stebejimu-pradzios/> [žiūrėta 2025-05-20].

- [57] LHMT, „Klimato būklė 2024“. Prieiga per internetą: <https://www.meteo.lt/app/uploads/2025/03/Lietuvos-klimato-bukle-2024-pabaigtas-1.pdf> [žiūrėta 2025-05-20].
- [58] LEI, „Temperatūra Lietuvoje 1777–1990“.
- [59] Copernicus Climate Change Service, „European State of the Climate 2022“, 2023 Prieiga per internetą: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2022> [žiūrėta 2025-05-19].
- [60] K. Valančius ir kt., „Heating and Cooling Primary Energy Demand“, Buildings, 2022 Prieiga per internetą: [Heating and Cooling Primary Energy Demand and CO2 Emissions: Lithuanian A+ Buildings and/in Different European Locations](#) [žiūrėta 2025-05-19].
- [61] Our World in Data, „Air conditioning emissions“. Prieiga per internetą: <https://ourworldindata.org> [žiūrėta 2025-05-22].
- [62] DNV, „Lithuania energy system transformation to 2050“. Prieiga per internetą: [https://www.epsog.lt/uploads/documents/files/Lietuvos%20energetikos%20vizija/Lithuania%20Energy%20System%20Transformation%20to%202050%20\(EPSO-G%20presentation\).pdf](https://www.epsog.lt/uploads/documents/files/Lietuvos%20energetikos%20vizija/Lithuania%20Energy%20System%20Transformation%20to%202050%20(EPSO-G%20presentation).pdf) [žiūrėta 2025-06-11].
- [63] Staffell, Iain & Pfenninger, Stefan, Temperature at 2m (MERRA-2) Prieiga per internetą: <https://www.renewables.ninja> [žiūrėta 2025-06-11].
- [64] Klimato studija, 2022, Prieiga per internetą: https://klimatokaita.lt/media/17396/ivadine-ataskaita-elle_3f-1.pdf [žiūrėta 2025-06-11].
- [65] J. Spinoni ir kt., „Heating and cooling degree-days“, 2018. Prieiga per internetą: [Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100 - Spinoni - 2018 - International Journal of Climatology - Wiley Online Library](#) [žiūrėta 2025-06-11].
- [66] Eurostat, „CDD HDD“. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu> [žiūrėta 2025-06-11].
- [67] UNFCCC, „Energy models“. Prieiga per internetą: <https://unfccc.int> [žiūrėta 2025-08-13].
- [68] Danish Energy Agency, “Danish Technology Data for Energy Plants,” Danish Energy Agency and Energinet.dk, 2012.
- [69] IEA, Nuclear Reactor Cost Estimates for Net Zero World Initiative, 2023, Prieiga per internetą: [NZW09 Nuclear Energy Cost Estimates for Net Zero World Initiative.pdf](#) [žiūrėta 2025-10-21].
- [70] Danish Energy Agency, „Danish Technology Data for Energy Plants“, Danish Energy Agency and Energinet.dk, 2012, Prieiga per internetą: [Technology Data for Generation of Electricity and District Heating](#) [žiūrėta 2025-10-21].
- [71] M. M. Balakheli, M. Chahartaghi, M. Sheykhi, S. M. Hashemian, ir N. Rafiee, „Analysis of different arrangements of combined cooling, heating and power systems with internal combustion engine from energy, economic and environmental viewpoints“, Energy Convers. Manag., t. 203, p. 112253, saus. 2020, Prieiga per internetą: [doi:10.1016/j.enconman.2019.112253](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112253) [žiūrėta 2025-10-21].

- [72] Danish Energy Agency, High Temperature Heat Pumps – Technology Data for Energy Plants, Danish Energy Agency, Prieiga per internetą: [Technology Data for Generation of Electricity and District Heating](#) [žiūrėta 2025-10-21].
- [73] European Commission. Joint Research Centre., ILF Consulting Engineers Austria GmbH., ir AIT Austrian Institute of Technology GmbH., Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU, Prieiga per internetą: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/24422> [žiūrėta 2025-10-21].
- [74] Ember, European Wholesale Electricity Price Data, Prieiga per internetą: <https://ember-energy.org/data/european-wholesale-electricity-price-data> [žiūrėta 2025-11-07].
- [75] World Bank Group, Climate Data for Lithuania Prieiga per internetą: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/lithuania> [žiūrėta 2025-11-06].
- [76] Stefan; Staffell, Iain, „Temperature at 2m (MERRA-2)“. Prieiga per internetą: <https://www.renewables.ninja/> [Žiūrėta: 2025-11-06]
- [77] Lietuvos statistikos departamentas / Valstybės duomenų agentūra, “Lietuvos aplinka, žemės ūkis ir energetika (2023 m. leidimas). Energijos balansas,” 2023, Prieiga per internetą: <https://osp.stat.gov.lt/lietuvos-aplinka-zemes-ukis-ir-energetika-2023/energetika/energijos-balansas> [Žiūrėta: 2025-11-09]
- [78] Lietuvos statistikos departamentas / Valstybės duomenų agentūra, “Rodiklių duomenų bazė – Statistinių rodiklių analizė,” 2025 Prieiga per internetą: <https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?hash=226fc1a8-ad9d-4940-bca6-2adf4271acbf#/> [Žiūrėta: 2025-10-09]
- [79] Lietuvos Respublikos energetikos ministerija, “Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija,” Jun. 2024, Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/public/canonical/1731396595/5432/NENS%202024-2.12.pdf> [Žiūrėta: 2025-10-09]
- [80] “LIETUVOS CENTRALIZUOTO ŠILUMOS TIEKIMO SEKTORIAUS 2023 METŲ APŽVALGA.” Prieiga per internetą: <https://lsta.lt/wp-content/uploads/2024/09/LSTA-Silumine-technika-2024-Nr-2-91.pdf> [Žiūrėta: 2025-10-09]
- [81] 2006 IPCC Guidelines, Prieiga per internetą: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf [Žiūrėta: 2025-10-09]
- [82] CEWEP, “WASTE-TO-ENERGY CLIMATE ROADMAP.” Prieiga per internetą: [CEWEP - The Confederation of European Waste-to-Energy Plants](#), [Žiūrėta: 2025-12-09]
- [83] European Parliament and Council, “Directive (EU) 2019/904 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment,” Jun. 2019, Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj/eng>, [Žiūrėta: 2025-12-09]
- [84] European Parliament and Council, “Regulation (EU) 2024/1781 on packaging and packaging waste,” Jun. 2024. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng>, [Žiūrėta: 2025-12-09]

Priedai

1 priedas. Lietuvos centralizuoto šilumos ir vėsumos tiekimo sistemos energijos srautų ir technologijų schema.

