



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

Eimantė Čebatoriūnaitė

**MAŽAENERGIAME PASTATE VEIKIANČIO GRUNTINIO ŠILUMOS
SIURBLIO SISTEMOS PARAMETRŲ ĮTAKOS EFEKTYVUMUI ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF PARAMETERS FOR EFFICIENCY OF
GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM OPERATING IN LOW ENERGY
BUILDING**

Baigiamasis magistro darbas

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas 621E30003

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Artur Rogoža

(Vardas, pavardė)

(Data)

Eimantė Čebatoriūnaitė

**MAŽAENERGIAME PASTATE VEIKIANČIO GRUNTINIO ŠILUMOS
SIURBLIO SISTEMOS PARAMETRŲ ĮTAKOS EFEKTYVUMUI ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF PARAMETERS FOR EFFICIENCY OF
GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM OPERATING IN LOW ENERGY
BUILDING**

Baigiamasis magistro darbas

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas 621E30003

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vadovas	<u>dr. Violeta Misevičiūtė</u> (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Konsultantas	<u>mgr. Karolis Januševičius</u> (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	<u>lekt. Regina Žukienė</u> (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)

Vilnius, 2016

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA**

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Energijos inžinerija studijų kryptis

Energijos inžinerija ir planavimas studijų programa, valstybinis kodas **621E30003**

Energijos inžinerijos specializacija

(parašas)

Artur Rogoža

(vardas, pavardė)

2016 _____ mėn. ____ d.

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentei*Eimantei Čebatoriūnaitei*.....
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema *Mažaenergiame pastate veikiančio gruntinio šilumos siurblio sistemos parametrų įtakos efektyvumui analizė*

Patvirtinta 2014 m. spalio 22 d. Dekano įsakymu Nr. 317 ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016 m. gegužės mėn. 23 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Aprašyti tyrimų srities problematiką, aktualumą, tyrimo objektą, suformuluoti tikslą ir jam pasiekti spręstinus uždavinius. Atlikti šilumos siurblių sistemų, jų parametrų įtakos efektyvumui teorinę apžvalgą. Išnagrinėti mažąenergiams pastatams keliamus reikalavimus, reglamentavimą. Pasirinkti ir aprašyti nagrinėjamai (gruntinio šilumos siurblio) sistemai taikomą modeliavimo priemonę. Sudaryti nagrinėjamos sistemos modelį ir atlikti jos parametrų (bivalentės temperatūros, gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekio (ilgio) ir akumuliacinės talpos tūrio) įtakos efektyvumui analizę. Modeliavimo rezultatus ir teiginius pateikti iliustruota grafine medžiaga. Parengti darbo išvadas ir pasiūlymus. Parengti pranešimą konferencijai ir jį atspausdinti konferencijos leidinyje.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: lekt. R. Žukienė, mgr. K. Januševičius
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(parašas)*dr. Violeta Misevičiūtė*.....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(parašas)

.....*Eimantė Čebatoriūnaitė*.....
(vardas, pavardė)

.....*2016-05-16*.....
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Pastatų energetikos katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Energijos inžinerijos ir planavimo** programos magistro baigiamasis darbas 4 (energijos inžinerija)
Pavadinimas **Mažaenergiame pastate veikiančio gruntinio šilumos siurblio sistemos parametrų įtakos efektyvumui analizė**
Autorius **Eimantė Čebatoriūnaitė**
Vadovas **Violeta Misevičiūtė**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Pastatuose šilumos šaltiniu pasirenkant šilumos siurblio sistemą remiamasi standartuose nurodytais arba praktiniais sistemos komponentų intervalais, tačiau nėra aiški verčių, iš nurodytų intervalų, įtaka sistemos veikimo efektyvumui.

Darbe nagrinėjama bivalentė gruntinio šilumos siurblio sistema mažaaenergiame pastate. Sudaryta skaičiuojamoji schema TRNSYS programoje. Įvertinta bivalentės temperatūros, gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekio (ilgio) ir akumuliacinės talpos tūrio įtaka veikimo efektyvumui, apskaičiuotas sistemos sezoninio energinio efektyvumo rodiklis.

Parinkant aukštesnę bivalentę temperatūrą, sumažėja gruntiniu šilumos siurbliu padengiama šilumos poreikio dalis ir temperatūrų skirtumas, rodiklis didėja. Didėjant gręžinių ilgiui, padidėja paviršiaus, kuriuo perduodama šiluma, plotas, rodiklis didėja. Didėjant akumuliacinės talpos tūriui, didėja tūris, kurį reikia pašildyti, rodiklis mažėja. Keičiant bivalentę temperatūrą skirtingais mėnesiais rodiklis sumažėjo iki 3 % ir padidėjo iki 9 %, keičiant gręžinių kiekį – sumažėjo iki 15 % ir padidėjo iki 17 %, keičiant akumuliacinės talpos tūrį – padidėjo iki 0,6 % ir sumažėjo iki 0,2 %, lyginant su pradiniu variantu.

Parinkant bivalentę temperatūrą svarbu atsižvelgti į žemesnių, nei numatyta bivalanetė, temperatūrų trukmę, nuo to priklauso gruntiniu šilumos siurbliu padengiama šilumos poreikio dalis ir veikimo efektyvumas. Parinkant gręžinių ilgį, reikia tiksliai įvertinti pasirinkto ilgio vertę, kadangi skirtingais atvejais, iš standarte pateikiamo intervalo parinkus skirtingas vertes, gaunamų rezultatų pokytis yra žymus. Parinkant akumuliacinės talpos tūrį galima remtis numatytu praktiniu intervalu per daug nenukrypstant nuo siekiamo tikslo, kadangi skirtingais atvejais, iš numatyto intervalo parinkus skirtingas vertes, gaunami panašūs rezultatai.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, 5 skyriai, išvados, literatūra.

Darbo apimtis – 59 p. teksto be priedų, 27 iliustr., 9 lent., 64 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedamas priedas.

Prasminiai žodžiai: atsinaujinantys energijos ištekliai, gruntinis šilumos siurblys, mažaaenergis pastatas, TRNSYS.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Building Energetics

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Energy Engineering and Planning** study programme Master Graduation Thesis 4 (Energy Engineering)

Title **Analysis of the Impact of Parameters for Efficiency of Ground Source Heat Pump System Operating in Low Energy Building**

Author **Eimantė Čebatoriūnaitė**

Academic supervisor **Violeta Misevičiūtė**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

When heat pump system is selected as a heat source for low energy building, the components design is based on intervals of the values from norms, however the impact of different values from the intervals for operation efficiency of the system is not clear.

In this paper bivalent ground source heat pump operating in low energy building has been analysed. Calculation scheme has been made in TRNSYS program. The impact of bivalent temperature, amount (length) of ground source heat exchanger boreholes and volume of buffer tank for operating efficiency has been evaluated, seasonal performance factor has been calculated.

When the higher bivalent temperature is chosen, the fraction of heat demand covered by ground source heat pump and the temperature difference decreases, the factor increases. When the length of boreholes increases, the heat transfer surface area increases, the factor increases too. When the volume of buffer tank increases, the volume to be heated increases, the factor decreases. The factor of different months decreased up to 3 % and increased up to 9 % when the bivalent temperature has been changed, the factor decreased up to 15 % and increased up to 17 % when the length has been changed, the factor increased up to 0,6 % and decreased up to 0,2 % when the volume has been changed comparing with initial value.

The bivalent temperature should be chosen according to duration of lower than bivalent temperatures, because it influences the fraction of heat demand covered by ground source heat pump and operation efficiency. The chosen length of boreholes should be evaluated precisely because the results were different in each case when different values from the interval from norm have been chosen. Provided practical interval could be trusted selecting the volume of buffer tank to achieve the intention, because the results were similar in each case when different values from practical interval has been chosen.

The work of 8 parts: introduction, 5 chapters, conclusions, references.

Size – 59 pages of text, 27 pictures, 9 tables, 64 references.

Appendix.

Keywords: renewable source of energy, ground source heat pump, low energy building, TRNSYS.

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Eimantė Čebatoriūnaitė, 20094532

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Energijos inžinerija ir planavimas, ENmf-14

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 20 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Mažaenergiame pastate veikiančio gruntinio šilumos siurblio sistemos parametrų įtakos efektyvumui analizė“ patvirtintas 2014 m. spalio 22 d. dekanų potvarkiu Nr. 317ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Karolis Januševičius. Mano darbo vadovas dr. Violeta Misevičiūtė.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Eimantė Čebatoriūnaitė

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

ĮVADAS	11
1. MOKSLINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA	14
2. TEISINIS REGLAMENTAVIMAS IR REGULIAVIMAS.....	23
2.1 Mažaenergiai pastatai Lietuvoje	23
2.2 Bendrieji reikalavimai mažai energijos naudojančių pastatų savybėms.....	25
2.3 Gruntinių šilumos siurblių projektavimo normos ir standartai	27
3. TYRIMO METODIKA.....	29
3.1 Tyrimo objektas ir vieta	29
3.2 Tiriamasis įrenginys – gruntinis šilumos siurblys	32
3.3 Modeliavimo priemonės tyrimui parinkimas.....	37
4. TIRIAMOJI SISTEMOS SCHEMA, PARAMETRAI IR MODELIS	44
5. TYRIMO REZULTATAI	52
IŠVADOS	59
LITERATŪRA	61

LENTELIŲ SĄRAŠAS

- 1 lentelė.** Objekto duomenys
- 2 lentelė.** Pastato energinio naudingumo sertifikato duomenys
- 3 lentelė.** Nagrinėjamojo gruntinio šilumos siurblio duomenys
- 4 lentelė.** Eksperimento ir modeliavimo palyginimas
- 5 lentelė.** Modeliavimo įrankių palyginimas
- 6 lentelė.** Sistemos elementų ir medžiagų parametrai
- 7 lentelė.** Bivalentė temperatūra
- 8 lentelė.** Gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekis
- 9 lentelė.** Akumuliacinės talpos tūris

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1 pav.** Tyrimo schema
- 2 pav.** Pastatų patalpų šildymui sunaudota energija ES 2012 m. (Carvalho *et al.* 2015)
- 3 pav.** Gruntinių šilumos siurblių instaliuota galia ES šalyse 2013 m. (Carvalho *et al.* 2015)
- 4 pav.** Gruntinių šilumos siurblių pasiskirstymas Lietuvoje pagal gruntinio šilumokaičio tipą (kairėje) ir galią (dešinėje) 2013 m. (Gaigalis *et al.* 2016)
- 5 pav.** Gruntinio šilumos siurblio kontūro ilgis skirtinguose miestuose (Nguyn *et al.* 2014)
- 6 pav.** Gyvenamosios paskirties pastato sąnaudų palyginimas (KTU 2011)
- 7 pav.** Administracinės paskirties pastato sąnaudų palyginimas (KTU 2011)
- 8 pav.** Mokslo paskirties pastato sąnaudų palyginimas (KTU 2011)
- 9 pav.** Vaikų lopšelio–darželio pastatas (Santariškių vaikų lopšelis–darželis sprendiniai 2015)
- 10 pav.** Pastato sklypo plano ištrauka
- 11 pav.** Šilumos siurblio ciklas
- 12 pav.** Monovalentinis režimas
- 13 pav.** Bivalentinis alternatyvus režimas
- 14 pav.** Bivalentinis lygiagretus režimas
- 15 pav.** Principinė pastato šilumos gamybos ir tiekimo schema
- 16 pav.** Šilumos siurblio parametrų priklausomybė
- 17 pav.** Skaičiuojamoji sistemos schema TRNSYS programoje
- 18 pav.** Šilumos siurblio galia ir bivalentė temperatūra
- 19 pav.** Skaičiavimų schema
- 20 pav.** Vienerių metų išorės oro temperatūros kitimas
- 21 pav.** Vienerių metų skirtingų išorės oro temperatūrų trukmė
- 22 pav.** Žemesnės už bivalentę temperatūros trukmė
- 23 pav.** Gruntiniu šilumos siurbliu padengiama šilumos poreikio dalis, keičiant bivalentę temperatūrą
- 24 pav.** Gruntiniu šilumos siurbliu padengiama šilumos poreikio dalis skirtingais mėnesiais
- 25 pav.** SPF pokytis, keičiant bivalentę temperatūrą
- 26 pav.** SPF pokytis, keičiant gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį
- 27 pav.** SPF pokytis, keičiant akumuliacinės talpos tūrį

SANTRUMPOS

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai

BT – bivalentė temperatūra

COP – veikimo efektyvumo koeficientas (angl. *Coefficient of Performance*)

CŠT – centralizuotas šilumos tiekimas

ES – Europos Sąjunga

KV – karštas vanduo

SPF – sezoninis efektyvumo faktorius (angl. *Seasonal Performance Factor*)

ŠS – šilumos siurblys

ŠVOK – šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas

IVADAS

Apsirūpinimo energija šaltinių pasirinkimas didelis, tačiau galimybės, besikeičiantis visuomenės požiūris į komfortą ir aplinką skatina protingą ir apgalvotą jų pasirinkimą.

Susidūrusi su klimato kaitos iššūkiais ir siekdama tikslo gyventi tvarioje aplinkoje, Europos Sąjunga (ES), vienijanti senojo žemyno valstybes, apibrėžė tris pagrindinius energetinės politikos tikslus – iki 2020 metų 20 % sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas (lyginant su 1990 metų kiekiais), pasiekti, kad atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) dalis galutinio energijos suvartojimo atžvilgiu būtų ne mažiau kaip 20 % ir padidinti energijos efektyvumą 20 % (sutaupyti 20 % pirminės energijos kiekio).

Priemonės tikslams pasiekti – Europos Parlamento ir Tarybos patvirtintos direktyvos, kurios apibrėžia šalims narėms taisykles ir rekomendacijas. Atsižvelgiant į direktyvas, kiekviena valstybė susikuria savo mechanizmą, pagal kurį įgyvendina bendrus ES energetinius tikslus.

Lietuva ne išimtis – pakoreguoti įstatymai, išleisti nauji reglamentai, kurie nustato, kaip turi būti siekiama efektyviai panaudoti energiją, bei naudojami Europoje patvirtinti standartai. Viena iš priemonių – pastatų energinio naudingumo didinimas, kurios tikslas – palaipsniui Lietuvoje didinti pastatų energinį efektyvumą iki beveik nulinės energijos pastatų visoje šalyje.

Mažai energijos vartojantys pastatai nuo įprastinių skiriasi konstrukciniais ir architektūriniais sprendimais, atitvarų šiluminėmis savybėmis, sandarumu, inžinerinėmis sistemomis bei AEI panaudojimu.

Mažaenergiai pastatai su AEI naudojančiais generatoriais yra didelis iššūkis mokslininkams ir projektuotojams, nes iki šiol nėra sukurtos vienos sistemos, galinčios įvertinti energetinį efektyvumą projektavimo stadijoje (Mažaenergiai pastatai 2015).

Energiniam pastatų naudingumui didelę įtaką turi tinkamai parinktos inžinerinės sistemos. Viena iš jų – šildymo sistema, kurios šilumos šaltinių pasirinkimas yra platus, sistemos veikimas realiomis aplinkos sąlygomis yra sudėtingas, reikalaujantis ne tik teorinių skaičiavimų, bet ir realaus vertinimo. Tai taip pat reikalinga, kad įgyvendinama sistema veiktų efektyviai – šiluma būtų pagaminama kuo mažesnėmis pirminės energijos sąnaudomis.

Dažnai mažaaenergiuose pastatuose šilumos šaltiniu pasirenkama šilumos siurblio (ŠS) sistema, naudojanti žemesnės temperatūros aplinkos oro, vandens, grunto ar atliekinę šilumą. Galimi tradiciniai šios sistemos variantai arba įvairios kombinacijos su kitais šilumos šaltiniais. Pastarosios sistemos gali pasiekti aukštesnį efektyvumą, lyginant su tradicinėmis, tačiau pagrindinė problema – tinkamas sistemų derinimas tarpusavyje.

Tyrimų duomenimis, vėsesnio klimato regionuose tinkamesnė yra gruntinio ŠS sistema dėl pastovesnės grunto temperatūros. Tokių sistemų veikimo efektyvumas priklauso ne tik nuo klimato

sąlygų ir pastato charakteristikų, bet ir nuo sistemą sudarančių komponentų – gruntinio šilumokaičio, akumuliacinės talpos, cirkuliacinių siurblių ir vamzdynų – parametrų. Naudojant ŠS su papildomu šilumos šaltiniu, efektyvumas priklauso nuo sistemos valdymo – kokiomis sąlygomis veikia vienas ar kitas šaltinis.

Nuo pastatų energinio naudingumo sertifikavimo patvirtinimo (2005 metais), statybos produkcijos sertifikavimo centro (SPSC) duomenimis, iki 2015 metų vasario mėnesio tik 34 pastatai Lietuvoje buvo A ir tik 6 pastatai A+ energinio naudingumo klasės. Šiame darbe nagrinėjamas pirmasis mažaenergis visuomeninės paskirties pastatas – vaikų lopšelis–darželis Santariškių gatvėje, Vilniuje.

Pastato šilumos šaltinis – gruntinis ŠS, kuris veikia bivalenčiu režimu su papildomu šilumos šaltiniu. Siekiant užtikrinti patikimą šilumos tiekimą šalčiausiomis sezono paromis, kaip alternatyvus šilumos šaltinis, naudojamas centralizuotas šilumos tiekimas (CŠT).

Nagrinėjamas pastatas eksploatuojamas nuo 2015 metų sausio mėnesio, todėl nėra išsamių inžinerinių sistemų veikimo duomenų, iš kurių būtų galima spręsti, ar įgyvendinti projektiniai sprendiniai yra teisingi ir ar jie gali būti naudojami tolesniam mažaeenergių pastatų projektavimui, kokie sprendimai nepriimtini ir kurių reikėtų vengti ateityje.

Projektuojant sudėtinga numatyti realų būsimo pastato energinį naudingumą. Neužtenka atskirai apskaičiuoti atitvarų šiluminės vertės, šilumos nuostolius ir parinkti inžinerines sistemas. Įvertinti pastato energinį naudingumą galima tik žinant kaip konkrečioje vietovėje atskiros pastato dalys veiks bendroje sistemoje. Tai įvertinti padeda dinaminis kompiuterinis modeliavimas valandos ar trumpesniu laiko žingsniu.

Modeliavimo tikslas – analizuojant procesus, sistemų veikimą, rasti optimalius sprendimus, nustatyti tiriamosios sistemos silpnąsias vietas, įvairių vidinių ir išorinių veiksnių poveikio įtaką. Nagrinėjamu atveju – sezoninio efektyvumo ir kritinių periodų nustatymas bei analizė, bazinių režimų optimizavimas. Privalumai – universalumas, prieinamumas, sąlygiškai nedidelės laiko ir ekonominės sąnaudos. Trūkumai – matematinių modelių taikymo apribojimai, faktinės informacijos poreikis, būtinybė priimti prielaidas, reikalingos pastangos ir papildomos kalibravimo procedūros, siekiant gauti faktinei situacijai artimą rezultatą.

Darbe vertinama mažaeenergiame pastate veikiančios gruntinio ŠS sistemos parametrų įtaka veikimo efektyvumui. Atlikus mokslinių tyrimų apžvalgą pasirinkti pagrindiniai vertinami parametrai – bivalentė temperatūra, gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekis (ilgis) ir akumuliacinės talpos tūris. Vertinimas atliktas naudojant TRNSYS kompiuterinio modeliavimo programą.

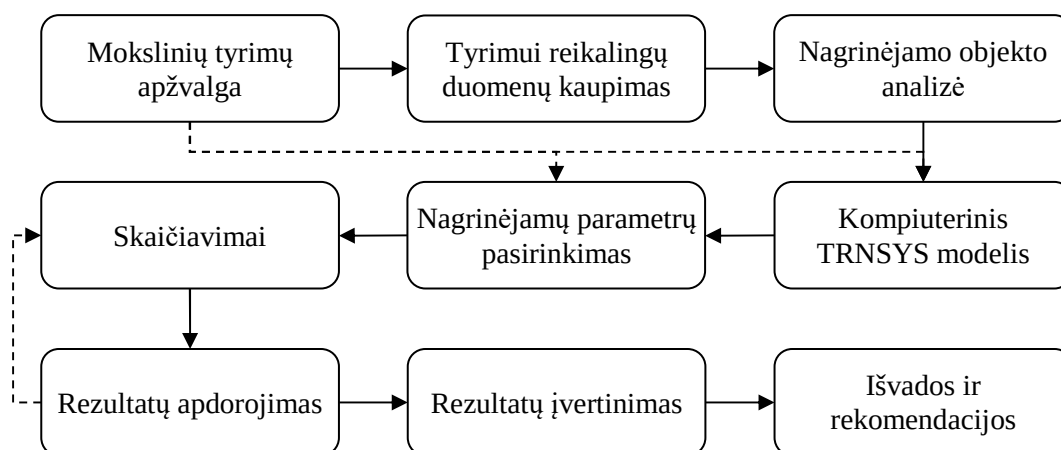
Darbo problema – mažaeenergiame pastate veikiančios bivalentės gruntinio ŠS sistemos parametrų įtaka veikimo efektyvumui.

Darbo tikslas – įvertinti mažaeNERgiame pastate įrengto grūntinio ŠS, veikiančio bivalenčiu režimu su papildomu šilumos šaltiniu, sistemos parametų įtaką veikimo efektyvumui.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti mažaeNERgio visuomeninės paskirties pastato Vilniuje charakteristikų analizę.
2. Sukurti ir apskaičiuoti pastato ir jame veikiančios grūntinio ŠS sistemos kompiuterinį modelį.
3. Apskaičiuoti pastato ir grūntinio ŠS sistemos modelį su skirtingais parametrais – bivalnete temperatūra, grūntinio šilumokaičio gręžinių kiekiu (ilgiu), akumuliacinės talpos tūriu.
4. Įvertinti skaičiavimų su skirtingais parametrais rezultatus.
5. Pateikti praktines rekomendacijas mažaeNERgių pastatų grūntinio ŠS sistemų įgyvendinimui.

Bendra tyrimo atlikimo schema pateikta 1 pav.



1 pav. Tyrimo schema

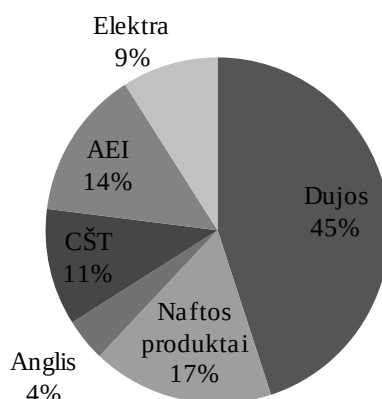
Tikslui pasiekti sukaupti tyrimui reikalingi duomenys ir atlikta pasirinkto pastato – vaikų lopšelio–darželio Santariškių g., Vilniuje – analizė. Pagal realius pastato ir sistemų duomenis sukurtas TRNSYS kompiuterinis modelis, apskaičiuoti pradinio varianto sistemos veikimo parametrai. Atlikus mokslinių tyrimų apžvalgą pasirinkta įvertinti bivalentės temperatūros, grūntinio šilumokaičio gręžinių kiekio (ilgio) ir akumuliacinės talpos tūrio įtaka grūntinio ŠS veikimo efektyvumui. Apskaičiuotas modelis su skirtingais parametrais. Remiantis gautais rezultatais įvertintas kiekvieno varianto sezoninis efektyvumo faktorius. Palyginti gauti rezultatai ir nustatytas pokytis. Atsižvelgiant į gautus rezultatus pateiktos praktinės rekomendacijos grūntinio ŠS sistemų įgyvendinimui.

Eimantė Čebatoriūnaitė

1. MOKSLINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA

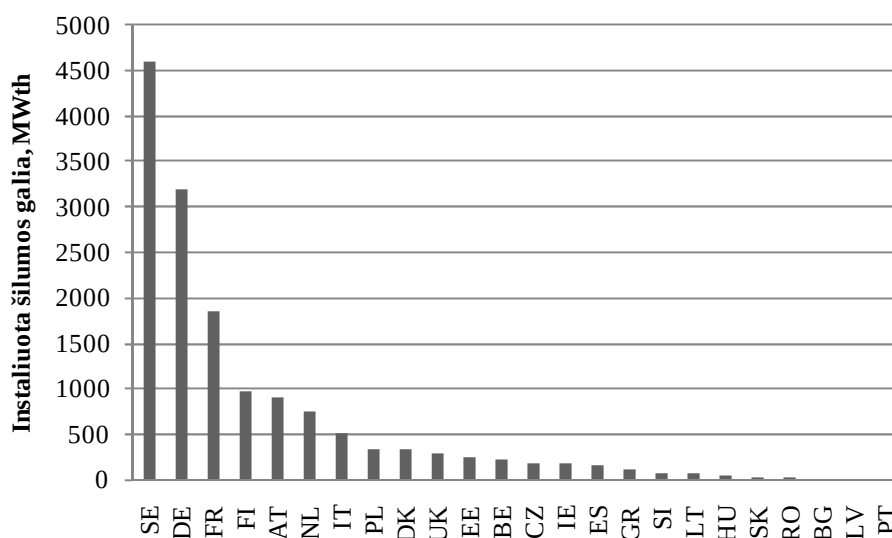
Mokslinių tyrimų apžvalgos tikslas – apžvelgti užsienio šalyse ir Lietuvoje atliktus mokslinius tyrimus, kuriuose nagrinėjamos gruntinio ŠS sistemos, vertinama įvairių parametrų ir numatytų veikimo režimų įtaka sistemos veikimo efektyvumui, veikimas jungiant gruntinį ŠS su kitais šilumos šaliniais.

A. C. Carvalho *et al.* (2015) tyrimo duomenimis 2012 m. Europoje pastatų patalpų šildymui buvo sunaudota 23 % galutinės suvartotos energijos, daugiausiai iškastinio kuro, plačiausiai naudotos – gamtinės dujos (2 pav.).



2 pav. Pastatų patalpų šildymui sunaudota energija ES 2012 m. (Carvalho *et al.* 2015)

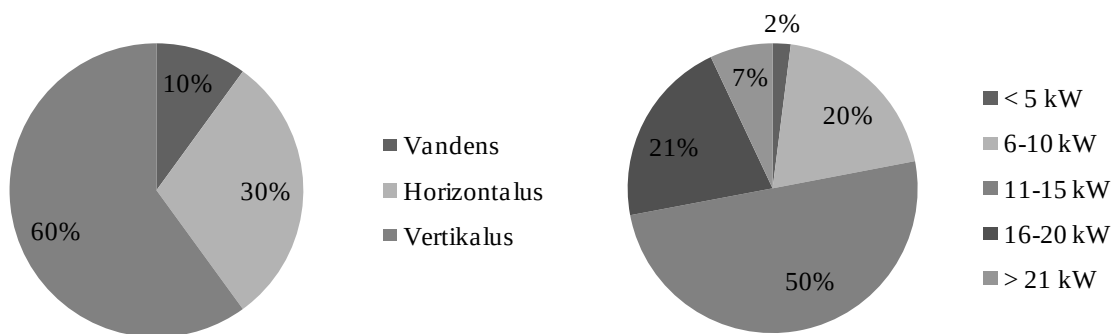
Vystantis technologijoms didėja galimybės iškastinį kurą keisti AEI, naudoti ŠS. Kasmet ŠS panaudojimas didėja. A. C. Carvalho *et al.* (2015) tyrime teigiama, kad ES orinių ŠS paklausa didesnė lyginant su gruntinių, o bendra gruntinių ŠS instaliuota šilumos galia didžiausia Švedijoje ir Vokietijoje, o Lietuva yra 18 iš 24 šalių (3 pav.).



3 pav. Gruntinių šilumos siurblių instaliuota galia ES šalyse 2013 m. (Carvalho *et al.* 2015)

Darbo autoriai tyrime siūlo iškastinio kuro keitimo strategiją, kurią įgyvendinus ES būtų sunaudojama apie 60 % mažiau pirminės energijos ir išskiriama 90 % mažiau CO₂ emisijų iki 2050 m. Mokslininkų teigimu, ankstesni tyrimai parodė, kad aukšto efektyvumo ŠS mažina pirminės energijos ir emisijų kiekius.

Lietuvos mokslininko V. Gaigalio *et al.* (2016) apžvalgos duomenimis, pastatuose vietoje kietąjį kurą naudojančių šilumos įrenginių įrengiant ŠS sumažinama daugiau nei 4 t šiltnamio dujų emisijų ir išsaugoma apie 50 % pirminės energijos per metus. ŠS apie 75 % reikalingos energijos pagamina iš aplinkos šilumos. Apžvalgos duomenimis, Europoje 2005–2013 metais ŠS pardavimai išaugo beveik 6,6 karto. Lietuvoje ŠS rinka atsirado 2002 metais, jų populiarumas šalyje didėjo, tačiau rinka vis dar nedidelė. Bendras parduotų ŠS kiekis Lietuvoje 2009–2013 metais išaugo apie 5 kartus, nuo 554 iki 3 032 įrenginių. Daugiausia parduota gruntinių ŠS su vertikaliais kolektoriais, 11–15 kW galios (4 pav.). Darbe prognozuojama, kad ŠS pardavimų augimas Lietuvoje išliks stabilus ateinančius 5 metus (Gaigalis *et al.* 2016).



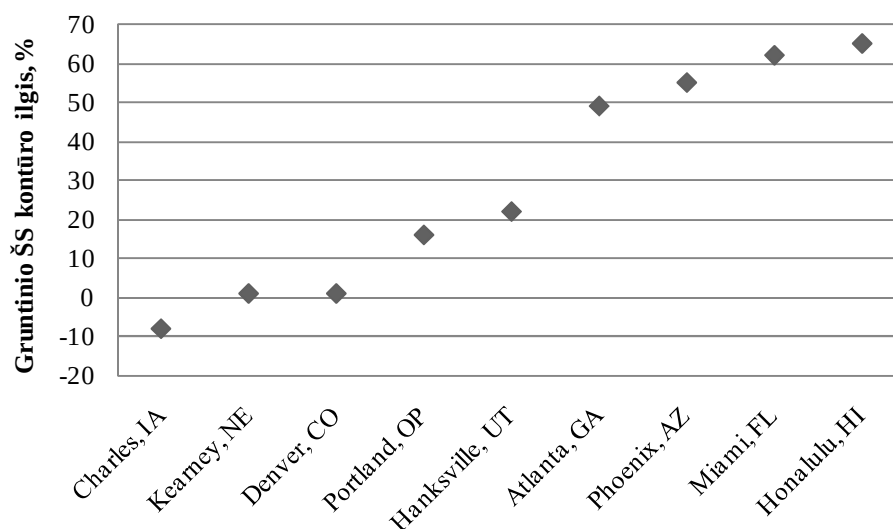
4 pav. Gruntinių šilumos siurblių pasiskirstymas Lietuvoje pagal gruntinio šilumokaičio tipą (kairėje) ir galią (dešinėje) 2013 m. (Gaigalis *et al.* 2016)

Nors skirtingų šilumos šaltinių ŠS veikimo principas yra tas pats, jų pritaikymas ir veikimo efektyvumas gali skirtis, priklausomai nuo vietovės, kur įrengiamas ŠS, pastato paskirties ir šildymo sistemos tipo.

E. Kim *et al.* (2012) tirtos mokslas paskirties pastato rezultatai parodė, kad tokios pačios galios gruntinio ŠS nominalus COP buvo 32–54,1 % didesnis lyginant su oriniu, veikiant šildymo režimu gruntinio ŠS COP buvo 36–38,5 %, didesnis už orinio. Išvados teigiama, kad gruntinio ŠS sistema, lyginant su tradicinėmis pastato šildymo sistemomis, yra pranašesnė energijos efektyvumo ir sąnaudų šildymui atžvilgiu.

Skirtingose Kanados vietovėse A. A. Safa *et al.* (2015) atlikto tyrimo metu nustatyta, kad vėsesniam klimatui, kuris būdingas ir Lietuvai, tinkamesnis yra gruntinis ŠS nei orinis, nes grunto temperatūra yra pastovesnė negu oro. Šiltesnio klimato vietovėse gruntiniai ŠS veikė efektyviau.

Penkiuose, skirtingomis klimato sąlygomis pasižyminčiuose, Šiaurės Amerikos miestuose atliktame H. V. Nguyn *et al.* (2014) tyrime, kuriame stebėti gruntinio ŠS parametrai, teigiama, kad optimalus projektavimas ir ekonominiai parametrai labai priklauso nuo aplinkos sąlygų, energijos sąnaudų kainų, veikimo trukmės ir valdymo strategijų panaudojimo. Sezoninė analizė parodė, kad valdymo strategija yra labai svarbi nustatant tinkamą gruntinio ŠS sistemos dydį. Tuose miestuose, kuriuose aplinkos oras yra šiltesnis, gruntiniam ŠS pakanka trumpesnio kolektoriaus (5 pav.). Tvirtinama, kad gruntinio ŠS sistema ekonomiškai tik gyvenamiesiems pastatams, o negyvenamiesiems – tradicinė sistema, kurios sąnaudos įrengimui ir eksploatavimui mažesnės, lyginant su gruntinio ŠS sistema.



5 pav. Gruntinio šilumos siurblio kontūro ilgis skirtinguose miestuose (Nguyn *et al.* 2014)

M. Kharshen *et al.* (2015) tyrimu buvo nustatyta šiltėjančio klimato įtaka gruntiniams ŠS 2014–2050 metų laikotarpyje. Apskaičiuota, kad šiltėjant klimatui gruntinio ŠS sistemų metinis energijos sunaudojimas sumažėtų 8,5 % vėsaus klimato regionuose ir iki 18,7 % šilto klimato regionuose. Teigiama, kad gerinant pastatų atitvarų šiluminės savybės galima sumažinti gruntinių ŠS sistemų metinį energijos sunaudojimą.

ŠS sistemą sudaro ŠS įrenginys su šilumos šaltinio (oro, vandens, grunto) šilumokaičiu, akumuliacinės talpos, kurios įrengiamos siekiant išvengti pastovaus ŠS veikimo, ir kiti elementai, tokie kaip cirkuliaciniai siurbliai bei vamzdynai, tarpusavyje jungiantys sistemos dalis ir visą ŠS

sistemą su pastato šildymo arba karšto vandens (KV) ruošimo sistemomis. Kiekviena sistemos dalis gali turėti įtakos ŠS veikimo efektyvumui.

Y. Nam *et al.* (2014) tyrimu nustatyta, kad gruntinio ŠS efektyvumui įtakos turi atstumai tarp kolektoriaus gręžinių, kolektoriaus įrengimo gylis, gręžinio ir vamzdynų skersmuo, grunto savybės ir šilumnešio debitas. Kuo didesni atstumai tarp gręžinių, kuo giliau jie įrengti, tuo šilumos perdavimas geresnis, kuo skersmuo didesnis, tuo paviršiaus plotas didesnis ir tuo šilumos perdavimas geresnis, tačiau greičiau atvėsta gruntas, dėl ko ŠS efektyvumas laikui bėgant gali mažėti.

T. Sivasakthivel *et al.* (2014) teigimu efektyvumas taip pat priklauso nuo gruntinio ŠS kolektoriaus ilgio, kuris priklauso ne tik nuo reikalingo šilumos kiekio, bet ir kolektoriaus bei grunto šiluminio laidumo. Taip pat teigiama, kad efektyvumui įtakos turi vamzdynų skersmuo, šilumokaičio medžiagos šilumos laidumas ir šilumnešio debitas.

W. Retkowski *et al.* (2015) tyrime buvo stebima gruntinio ŠS ir grunto tarpusavio įtaka ir įvertinta, kad įrenginys, kurio veikimas reikalauja maksimalaus šilumos išgavimo, žymiai sumažina grunto temperatūrą, o tai turi įtakos ŠS veikimo efektyvumui. Nepaisant to, toks įrenginys būtų pajėgus veikti apie 25 metus, tačiau su didesnėmis energijos sąnaudomis. Sumažinus gręžinio temperatūrų skirtumą, nustatytas mažesnis poveikis gruntui, sistemos efektyvumui ir energijos sąnaudoms.

Turkijos šiaurinėje dalyje atlikto U. Camdai *et al.* (2015) tyrimo rezultatai parodė, kad netinkamai parinktas gruntinio šilumokaičio kontūro dydis gali turėti įtakos per žemoms šilumnešio temperatūroms, tuomet ŠS negali pasiekti gamintojo deklaruojamo COP, sistemos efektyvumas mažesnis.

A. Safa *et al.* (2015) bandymais nustatyta, kad per didelė sistema turi įtakos žemam komforto lygiui ir įrangos patikimumui. Taip pat teigiama, kad pakeitus netinkamus temperatūrinio valdymo parametrus, būtų sutaupoma 28,2 % energijos kiekio.

Tyrimo, kuriame analizuotas gruntinio ŠS veikimas Italijos šiaurinėje ir pietinėje dalyje trimis skirtingais režimais, autorius A. Zarrella *et al.* (2015) nustatė, kad sezoninis energijos efektyvumas visais atvejais panašus ir priklauso nuo kolektoriaus gręžinio skersmens ir vamzdynų medžiagos. Didėjant nuostoliams sistemos sezoninis energinis efektyvumas mažėjo. Tyrime rekomenduojama projektavimo metu naudoti modeliavimą, kuriuo būtų galima įvertinti šilumos nuostolius ir sistemos efektyvumą.

X. Zhai *et al.* (2011) teigia, kad kartu su gruntiniu ŠS geriausia jungti grindų, lubų ar sienų šildymo sistemas, nes joms reikia žemesnės temperatūros, norint užtikrinti tinkamas komforto sąlygas. Taip pat siūloma nustatyti optimalią veikimo valdymo strategiją pagal klimato sąlygas, pastato funkcijas ir grunto šilumos balansą.

ŠS sistemų veikimo efektyvumas priklauso ir nuo to, kam ruošama šiluma – patalpų šildymui, KV ruošimui ar tiek patalpų šildymui, tiek KV ruošti. Taip pat, siekiant didesnio ŠS veikimo efektyvumo ir mažesnių eksploataavimo sąnaudų, ŠS jungiami su kitais šilumos šaltiniais.

T. You *et al.* (2015) tyrime, kuriame nagrinėtas gruntinis ŠS veikiantis kartu su papildomu šilumos šaltiniu – saulės kolektoriumi, teigiama, kad tokia sistema palaiko stabilią grunto temperatūrą ir užtikrina šildymo patikimumą. Gruntinio ŠS COP ir sistemos veikimo efektyvumas gali būti padidintas keičiant papildomo šilumos šaltinio funkcijas – šilumos kompensavimas, KV ruošimas, patalpų šildymas. Papildomą šilumos šaltinį naudojant KV ruošimui, energijos sąnaudos šilumos kompensavimui ir KV ruošimui sumažėjo 7,5–11 %, apytiksliai 3,6–4,8 % sumažėjo visai sistemai reikalingos energijos kiekis. Papildomą šilumos šaltinį naudojant patalpų šildymui ir KV ruošimui sunaudota 9,8–12,9 % mažiau energijos šilumos kompensavimui ir KV ruošimui, apytiksliai 5,31–6 % mažiau visos sistemos sunaudojamos energijos. Apibendrinant teigiama, kad tokia sistema suteikia galimybę sumažinti energijos sąnaudas ir išlaikyti grunto šilumos balansą pastatams su dideliais šildymo ir KV ruošimo poreikiais vėsaus klimato regionuose.

Apžvalgoje, kurią atliko S. Hackel *et al.* (2011), tvirtinama, kad gruntinis ŠS su papildomu šilumos šaltiniu pranašesnis energijos sąnaudų atžvilgiu negu tik gruntinis ŠS arba įprastinės sistemos. Siekiant pagerinti sistemos veikimą, projektuotojams ir pastatų prižiūrėtojams rekomenduojama tinkamai parinkti sistemos dydį, nustatyti tinkamą veikimo strategiją, po sistemos įrengimo keisti veikimo nustatymus pagal pastato poreikius. Taip pat, norint išvengti klaidų, prieš įrengiant sistemą rekomenduojama naudoti modeliavimo programas.

I. Saebu *et al.* (2014) darbe rašoma, kad per pastaruosius metus iki atlikto tyrimo pradžios gruntinių ŠS panaudojimas pastatų šildymui ir vėsinimui išaugo 10–12 %. Šiame tyrime rekomenduojama rinktis kombinuotas šildymo ir vėsinimo sistemas su ŠS, nes tokios sistemos efektyvesnės lyginant su tradicinėmis.

M. Alavy *et al.* (2013) atliktame tyrime buvo stebėti 10 įvairios paskirties pastatų – nuo gyvenamųjų iki komercinių ir pramoninių. Tyrimas parodė, kad kombinuotos sistemos su gruntiniais ŠS gali būti pritaikytos tiek gyvenamiesiems, tiek komerciniams ir pramoniniams pastatams.

Tyrime, kuriame nagrinėta hibridinių ŠS technologijos plėtra Kinijoje, autorius M. Guo *et al.* (2016) teigia, kad hibridinė sistema yra pranašesnė lyginant su įprasta, kurioje naudojamas tik ŠS. Tokia sistema gali 35 % sumažinti pradinės investicijas ir beveik 21 % eksploatacines sąnaudas pirmaisiais metais, ilgainiui skirtumas tarp šių sistemų veikimo išauga.

B. Henault *et al.* (2016) vertinime nustatyta, kad priklausomai nuo įrenginių ir įrengimo kainų, projekto grynoji dabartinė vertė labiausiai priklauso nuo gruntinio šilumokaičio gręžinių

skaičiaus, palaikomos temperatūros ir ŠS galios. Hibridinės grunto ŠS sistemos gali žymiai sumažinti elektros sąnaudas ir pikinių šilumos poreikių įtaką efektyvumui.

G. Bagarella *et al.* (2016) darbe nagrinėta hibridinė orinio ŠS ir dujinio kondensacinio katilo sistema gyvenamajame pastate. Sistemos veikimas vertintas vėsaus ir drėgno bei šilto ir sauso klimato vietovėse – Danijoje ir Prancūzijoje. Analizuota kaip pasirinkta ŠS bivalentė ir išsijungimo (angl. *cut-off*) temperatūra įtakoja metinį sezoninį efektyvumą. Taip pat palygintas bivalentis lygiagretus įrenginys su bivalentčiu alternatyviu įrenginiu energijos sąnaudų atžvilgiu.

Tyrimo autoriai apibrėžė, kad bivalentė temperatūra – tai temperatūra, kai ŠS šiluminė galia yra lygi pastato šilumos poreikiui, kuomet bivalentė temperatūra aukštesnė, tuo ŠS galia mažesnė, išsijungimo temperatūra – tai išorės oro temperatūra, žemiau kurios ŠS yra išjungiamas.

Bivalentės lygiagrečios sistemos atveju, jei išorės oro temperatūra yra aukštesnė nei bivalentė temperatūra, šiluminė energija yra gaminama tik ŠS, jei žemesnė – veikia abu šilumos generatoriai tuo pat metu, jei žemesnė nei išsijungimo temperatūra – veikia tik papildomas šilumos šaltinis. Bivalentės alternatyvios sistemos atveju, kai išsijungimo temperatūra lygi bivalentei temperatūrai, ŠS ir papildomas šilumos šaltinis niekada neveikia tuo pat metu. Kuomet aukštesnė išsijungimo temperatūra, tuo didesnis įrenginio sezoninis COP, tačiau ŠS pagamina mažiau šilumos. Kuomet žemesnė išsijungimo temperatūra, tuo mažesnis sezoninis COP, bet katilas pagamina mažiau šilumos (Bagarella *et al.* 2016).

Apibendrinant gautus rezultatus, G. Bagarella *et al.* (2016) įvertino, kad mažiausias bendras metinis suvartotos pirminės energijos kiekis nustatytas, kai išsijungimo temperatūra artima bivalentei temperatūrai, tuo atveju skirtumas tarp lygiagrečios ir alternatyvios sistemų energijos gamybos yra nedidelis. Vėsaus ir drėgno klimato vietovėse geriausia alternatyva yra kai bivalentė ir išsijungimo temperatūros sutampa, o šilto ir sauso klimato vietovėse išsijungimo temperatūra gali būti žemesnė, taip yra dėl mažesnės aplinkos drėgmės žiemą. Kuomet mažesnis vidutinis drėgnumas, tuo žemesnė išsijungimo temperatūra. Kai bivalentė temperatūra žema (nagrinėtu atveju žemesnė arba lygi 0 °C), skirtumas tarp bivalentės lygiagrečios ir alternatyvios sistemos, energijos suvartojimo atžvilgiu, nedidelis. Jei bivalentė temperatūra aukšta (nagrinėtu atveju didesnė arba lygi 6 °C), bivalentės lygiagrečios sistemos efektyvumas didesnis negu alternatyvios. Tyrimo išvadose teigiama, kad energiniu ir ekonominiu požiūriu geriausia alternatyva yra bivalentė lygiagreti sistema, tačiau kai parenkamas didelės galios ŠS, neverta išsijungimo temperatūrą nustatyti žemesnę nei bivalentė temperatūra.

K. Klein *et al.* (2014) tyrime taip pat nagrinėta hibridinė orinio ŠS ir dujinio kondensacinio katilo sistema gyvenamajame pastate Vokietijoje. Tyrime vertinta ŠS galios ir akumuliacinės talpos tūrio įtaka sezoniniam efektyvumui. Teigiama, kad didinant ŠS galią, žemėja bivalentė temperatūra, pailgėja ŠS veikimo laikotarpis. Keičiant akumuliacinės talpos tūrį sezoninis efektyvumo ir

apkrovos faktorius mažai kinta, keičiasi šilumos generatorių veikimo laikas, todėl teigiama, kad akumuliacinės talpos įtaka nežymi. Atlikus ekonominį vertinimą nustatyta, kad hibridinė sistema su vidutinio dydžio ŠS yra pranašesnė.

C. Naldi *et al.* (2014) darbe analizuotas orinis ŠS, veikiantis šiaurinėje Italijos dalyje. Vertinta bivalentinio taško ir akumuliacinės talpos įtaka įrenginio efektyvumui. Teigiama, kad teisingas bivalentės temperatūros parinkimas gali žymiai padidinti sistemos veikimo efektyvumą, o akumuliacinės talpos tūrio keitimas yra neefektyvus. Nustatyta, kad, konkrečiu nagrinėtu atveju, optimali bivalentė temperatūra yra -2°C arba 0°C . Jei bivalentė temperatūra žemesnė nei optimali vertė, padidėjęs akumuliacinės talpos tūris nežymiai sumažina vidutinį sezoninį efektyvumą, jei aukštesnė – nežymiai padidina sezoninį efektyvumą (Naldi *et al.* 2014).

Lietuvoje taip pat atlikta nemažai ŠS tyrimų, kuriuose nagrinėta skirtingų parametrų ir režimų įtaka sistemos veikimo efektyvumui.

Eksperimentinio ŠS darbo režimų tyrime J. Narkevičiūtė (2010) nustatė, kad ŠS tiekiant šilumą KV ruošti, ŠS negali užtikrinti reikiamos 60°C temperatūros be papildomo šilumos šaltinio, pasiekta temperatūra – $48,9^{\circ}\text{C}$. Aukštesnėms temperatūroms pasiekti reikalinga didesnė kompresoriaus galia, dėl ko COP mažėja (Narkevičiūtė 2010).

V. Sklepovič (2012) darbe nagrinėtas orinis ŠS gyvenamosios paskirties pastate. Įvertinta, kad, įrenginio efektyvumas labai priklauso nuo aplinkos oro temperatūros svyravimų, todėl, ŠS tiekiant šilumą patalpų šildymo sistemai, rekomenduojama įsirengti kito tipo ŠS – vandens arba grunto. Įrenginiui tiekiant šilumą KV ruošti, nepasiektas gamintojo deklaruotas transformacijos efektyvumas, apkraunami kompresoriai, todėl nerekomenduojama ruošti KV naudojant tik ŠS, kai aplinkos temperatūra žema, patariama įsirengti akumuliacinę talpą ir saulės kolektorių. ŠS tiekiant šilumą patalpų šildymo sistemai ir KV ruošti, KV gamyba mažina bendrą ŠS naudingumo koeficientą, todėl rekomenduojama atskirti ŠS nuo KV gamybos. Taip pat patariama žeminti grindinio šildymo temperatūrą, į bendrą sistemą prijungti akumuliacinę talpą. Tyrime atkreipiamas dėmesys į tinkamą sistemų projektavimą, montavimą, priežiūrą ir naudojimą.

Administracinio pastato katilinės efektyvumo didinimo galimybių tyrime E. Bartuševičius (2010) apskaičiavo, kad optimali sistemos modernizavimo alternatyva yra ŠS su vertikaliu grunto kolektoriumi, veikiantis kartu su katilu, kuris padengtų pikinius šildymo poreikius. Taip pat pastebėta, kad Lietuvoje, skirtingai nei užsienio šalyse, nėra parengtų normų bei reglamentų tinkamam ŠS įrengimui bei eksploatavimui, dėl šios priežasties Lietuvoje yra nemažai netinkamai įrengtų sistemų, veikiančių neefektyviai. Teigiama, kad norint pasiekti aukštą naudingumo koeficientą reikia atitinkamai pritaikyti ir pastato šildymo sistemą (Bartuševičius 2010).

Nors didesnėje dalyje tyrimų teigiama, kad ŠS su papildomu šilumos šaltiniu veikia efektyviau, S. Pakalkos (2010) ŠS efektyvumo analizėje, kurioje nagrinėtas grunto ŠS veikimas

skirtingais režimais prekybos paskirties pastate, nustatyta, kad mažiausios pirminės energijos sąnaudos buvo monovalenčio režimo atveju.

Beveik nulinės energijos visuomeninių pastatų aprūpinimo energija sprendinių tyrime, kurį atliko S. Adomėnaitė (2013), palyginus gruntinį ir orinį ŠS, tvirtinama, kad gruntinis ŠS yra tinkamesnis. Tokio įrenginio investicijos didesnės, bet veikimas efektyvesnis – pagaminama daugiau šilumos ir vėsos, sunaudojama mažiau elektros energijos.

Daugumoje tyrimų šilumą generuojantys įrenginiai ar sistemos yra analizuojami juos stebint, kaupiant duomenis, atliekant eksperimentinius bandymus arba skaičiuojant kompiuterinius modelius. Jei nagrinėjama reali sistema, atliekamas eksperimentas, jei tolimesnis tyrimas su realia sistema nėra įmanomas, sukuriamas kompiuterinis modelis, kuris validuojamas pagal eksperimento duomenis, ir tolesnis tyrimas atliekamas naudojant kompiuterinį modeliavimą. Jei nagrinėjant realią sistemą nėra galimybės atlikti eksperimentą arba siekiama iširti neegzistuojančios sistemos veikimą, atliekamas tik kompiuterinis modeliavimas.

Atlikus gruntinių ŠS modelių tyrimų apžvalgą P. Cui *et al.* (2010) teigia, kad skaitiniai modeliai yra lankstūs ir tikslūs palyginus su analitiniais modeliais.

J. Corberin *et al.* (2013) nagrinėjo gruntinį ŠS, veikiančią šildymo ir vėsinimo režimais, administraciniame pastate Ispanijoje. Tyrimo metu buvo išmatuoti realaus sistemų veikimo duomenys, taip pat sukurtas pastato TRNSYS modelis ir apskaičiuotas vienos dienos sistemos veikimas vėsinimo režimu. Palyginus gautus rezultatus nustatyta, kad modeliavimo rezultatai atitiko matavimų parametrus.

Darbe, kurio autorius X. Cao *et al.* (2012), pateikiama kelių metų laikotarpyje Kinijoje atliktų tyrimų, kuriuose naudojamas modeliavimas, apžvalga. Teigiama, kad reikalingi detalesni tyrimai, siekiant užtikrinti efektyvų sistemos modeliavimo panaudojimą. Vienas iš trūkumų – neįvertinama skirtingų geologinių sluoksnių įtaka vertikaliam gruntiniam šilumokaičiui.

R. N. Faria *et al.* (2013) tyrimo metu, kuriame nagrinėtas ŠS veikimas, ruošiant KV gyvenamajame pastate, palyginti modeliavimo rezultatai su eksperimento tyrimo duomenimis ir gautas tenkinamas santykinis rezultatas. Teigiama, kad skirtumai tarp modelio ir eksperimento rezultatų atsirado dėl skirtumų tarp realios ir modeliutos sistemos, pavyzdžiui, šilumnešių savybių skirtumų, taip pat dėl to, kad skaitiniame modelyje nėra įvertinami vamzdiniai, jungiantys sistemos dalis, ir jų kiekis, kurie gali turėti įtakos sistemos veikimui.

Apžvelgus ir palyginus gruntinio ŠS veikimui skaičiuoti skirtus modelius, X. Cong *et al.* (2014) tvirtina, kad, norint užtikrinti efektyvius skaitinius bandymus, reikia naudoti detalesnius gruntinio šilumokaičio modelius, įvertinti grunto šiluminės savybes, vertikalų temperatūrinį pasiskirstymą grunte ir gruntinio vandens įtaką.

T. Cutic *et al.* (2014) tyrime įvertinta, kad daugiau netikslumų buvo skaičiuojant sistemos veikimą ruošiant KV nei šildant patalpas. Gauti energijos suvartojimo ir efektyvumo reikšmių modeliavimo rezultatai didesni lyginant su išmatuotais.

B. Henault *et al.* (2016) teigia, kad hibridines gruntinio ŠS sistemas įmanoma suprojektuoti naudojant standartinius dydžio pasirinkimo būdus, tačiau kompiuterinio modeliavimo įrankiai gali būti panaudoti detalesniam kiekvienos sistemos dalies energijos suvartojimo įvertinimui, taip užtikrinant ekonomiškai efektyvų projektavimą.

Atlikus mokslinių tyrimų apžvalgą pastebėta, kad skirtingomis klimato sąlygomis, skirtinguose objektuose, skirtingomis sistemų konfigūracijomis, nagrinėtų gruntinių ŠS tyrimų rezultatai ir išvados yra panašūs.

Užsienyje ir Lietuvoje atliktų tyrimų apžvalga rodo, kad:

1. Lietuvoje bendra instaliuota gruntinių ŠS galia yra viena mažiausių ES, tačiau 2009–2013 m. Lietuvoje ŠS pardavimai padidėjo apie 5 kartus ir prognozuojamas stabilus tolimesnis paravimų augimas.
2. Vėsesniam klimatui, kuris būdingas ir Lietuvai, tinkamesnis gruntinis ŠS lyginant su oriniu, dėl pastovesnės grunto temperatūros.
3. Gruntinio ŠS veikimo efektyvumui įtakos turi atstumai tarp gruntinio šilumokaičio gręžinių, jų ilgis, įrengimo gylis, gręžinių ir vamzdynų skersmuo, vamzdynų medžiagos, grunto ir šilumnešių savybės, šilumnešių debitas bei akumuliacinės talpos tūris.
4. Efektyviam gruntinio ŠS sistemos veikimui įtakos turi tinkamai parinktas įrenginio ir gruntinio šilumokaičio dydis, įrenginio naudojimo paskirtis (šilumos tiekimas šildymo sistemai ar KV ruošimui), šildymo sistemos tipas (radiatorinis ar grindinis), tinkamas sistemos valdymas, atsižvelgiant į aplinkos sąlygas (bivalentės temperatūros nustatymas).
5. Siekiant efektyvaus gruntinio ŠS veikimo rekomenduojama įrenginio veikimą derinti kartu su papildomu šilumos šaltiniu, kuris galėti padengti pikinius poreikius (bivalentė sistema).
6. Rekomenduojama naudoti kompiuterinį modeliavimą, siekiant įvertinti sistemos veikimą ir parinkti optimalius ŠS sistemos parametrus.

Apžvelgtų tyrimų duomenys ir rezultatai yra atliekamo darbo pagrindas, kuriuo remiantis nustatyta pagrindinė darbo problema, iškeltas tikslas ir numatyti uždaviniai tyrimui atlikti, parinkti reikalingi tyrimo įrankiai ir nagrinėjami parametrai.

2. TEISINIS REGLAMENTAVIMAS IR REGULIAVIMAS

2.1 Mažaenergiai pastatai Lietuvoje

Kadangi Lietuva yra ES narė, ji turi laikytis bendros Sąjungos tvarkos ir vykdyti bendrą politiką daugelyje sričių, įskaitant ir vienoje svarbiausių – energetikoje.

Siekiant pagerinti ir kontroliuoti šią sritį buvo parengtos ir patvirtintos Europos Parlamento ir Tarybos direktyvos. Pagrindinės direktyvos, apibrėžiančios efektyvaus energijos vartojimo pastatuose strategijas yra:

- 2010/31/ES 2010 m. gegužės 19 d. dėl pastatų energinio naudingumo.
- 2009/28/EB 2009 m. balandžio 23 d. dėl skatinimo naudoti atsinaujinančius energijos išteklius.
- 2006/32/EB 2009 m. balandžio 5 d. dėl energijos galutinio vartojimo efektyvumo ir energetinių paslaugų.

2006/32/EB direktyvos tikslas – skatinti ir didinti energijos galutinio vartojimo efektyvumą valstybėse narėse. Direktyva nustato bendrą nacionalinį orientacinį energijos sutaupymo tikslą, kuris devintaisiais šios direktyvos taikymo metais (2016 m.) turi būti 9 % (3797 GWh). Tarpinis energijos taupymo rodiklis trijų metų laikotarpiui (2008–2010 m.) – 1,5 % galutinės energijos suvartojimo vidurkis 2001–2005 m. (628 GWh). Viešosios įstaigos, Energetikos agentūros, duomenimis, 2010 m. sutaupyta energijos kiekis sudarė 1,8 % (780 GWh) pagal direktyvos taikymo sritį nustatyto galutinės energijos suvartojimo. Todėl toliau judant tokiu tempu 2016 m. planuojamas sutaupymas – 9,4 % (3962 GWh).

2010/31/ES direktyva skatina didinti pastatų energinį naudingumą atsižvelgiant į klimato sąlygas ir vietos ypatybes, taip pat į patalpų mikroklimato reikalavimus ir ekonominį efektyvumą. Direktyva įpareigojo valstybes nares racionaliai ir ekonomiškai naudoti energijos šaltinius, skatinti efektyvesnę energijos vartojimą, mažinti ir apriboti anglies dvideginio išsiskyrimą į aplinką, diegti pastatų energinio naudingumo sertifikavimą (Pastatų sertifikavimas 2012). Šioje direktyvoje nustatomi reikalavimai dėl:

- bendrų pastatų integruoto energinio naudingumo apskaičiavimo metodikos principų;
- minimalių reikalavimų naujų pastatų energiniam naudingumui taikymo;
- minimalių reikalavimų energiniam naudingumui taikymo esamiems pastatams (jų dalims), kuriems reikia modernizacijos, kurios sudaro dalį pastato atitvaros ir kurios daro didelį poveikį pastato atitvarų energiniam naudingumui, kai jos modernizuojamos ar keičiamos bei pastato techninėms sistemoms, kai jos įrengiamos, keičiamos ar atnaujinamos;

- nacionalinių planų, kuriais siekiama didinti beveik nulinės energijos pastatų skaičių;
- pastatų energinio sertifikavimo;
- periodinių pastatų šildymo ir oro kondicionavimo sistemų tikrinimų;
- energinio naudingumo sertifikatų ir tikrinimo ataskaitų nepriklausomos kontrolės sistemų.

Pagrindinės direktyvos nuostatos, dėl ko imtasi anksčiau išvardintų priemonių, yra iki 2020 m. 20 % sumažinti energijos sunaudojimą, 20 % energijos gamybos turi sudaryti AEI ir 20 % sumažinti bendrą šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją (palyginus su 1990 m. lygiu).

ES direktyvų pagrindu buvo patvirtinti pagrindiniai teisės aktai apibrėžiantys efektyvaus energijos vartojimo pastatuose strategijas:

- Lietuvos Respublikos Statybos įstatymas.
- Lietuvos Respublikos Energetikos įstatymas.
- Lietuvos Respublikos Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas.
- Nacionalinė energetinė nepriklausomybės strategija.

Taip pat viena pagrindinių priemonių, padedančių įgyvendinti numatytus tikslus šalies energetikoje – Statybos techninis reglamentas STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“. Išskiriamos devynios pastatų energinio naudingumo klasės (nuo žemiausios G iki aukščiausios A++).

Pagal šį reglamentą apibrėžiama, kad mažai energijos naudojančios pastatai (jų dalys) yra pastatai, atitinkantys reglamento reikalavimus B, A, A+ klasės pastatams. Energijos beveik nevartojantys pastatai – pastatai, atitinkantys šio reglamento reikalavimus A++ energinio naudingumo klasės pastatams, t. y. labai aukšto energinio naudingumo pastatai, kuriuose energijos sunaudojimas beveik lygus nuliui arba energijos sunaudojimas labai mažas, didžiąją sunaudojamos energijos dalį sudaro AEI, įskaitant vietoje ar netoliese pagamintą atsinaujinančių išteklių energiją.

2010/31/ES direktyvos tikslams įgyvendinti Lietuvoje yra nustatyti pereinamieji reikalavimai naujai statomiems pastatams pagal pastatų energinio naudingumo klases. Nauji pastatai ar jų dalys nuo 2014 m. turi atitikti B klasės pastatams keliamus reikalavimus, nuo 2016 m. – A klasės, nuo 2018 m. – A+ klasės, o nuo 2021 m. – A++ klasės pastatams keliamus reikalavimus. Nuo 2018 m. visuomeniniai pastatai, o nuo 2020 m. visi nauji pastatai turi būti nulinės energijos pastatai. Nuo 2018 m. nauji valstybinių įstaigų užimami ir nuosavybės teise valdomi pastatai turi būti beveik nulinės energijos, o nuo 2020 m. visi nauji pastatai turi būti beveik nulinės energijos.

Pastatų energinio naudingumo vertinimui naudojamas standarte LST EN 15217:2007 „Energinės pastatų charakteristikos. Pastatų energetinių charakteristikų išreiškimo ir energetinio sertifikavimo metodai“ nurodytas skaičiavimo metodas.

2.2 Bendrieji reikalavimai mažai energijos naudojančių pastatų savybėms

Lietuvoje energinis naudingumas nesusietas su konkrečia skaitine energijos vartojimo verte, jį apibrėžia atitinkama pastato energinio naudingumo klasė. Šalies teisės aktuose, kuriuose keliama reikalavimai pastatų energiniam naudingumui, pastatų etalonai nenaudojami. Kiekvienas pastatas vertinamas individualiai. Šių reikalavimų principas – teisės aktuose nustatyti norminiai reikalavimai įvairios paskirties D–A++ klasės pastatų atitvarų šiluminėms savybėms, inžinerinių sistemų efektyvumui (šildymo, vėsinimo, vėdinimo, KV ruošimo, patalpų apšvietimo), energijos sąnaudoms pastatui šildyti ir vėsinti bei kitiems rodikliais. Teisės aktuose nustatyti analogiški rodikliai ir atskaitiniams (D, E klasės) pastatams (mažiausiai energijos naudojančių 50 % tam tikros paskirties pastatų vidutinės rodiklių vertės).

Pastato energinio naudingumo klasė nustatoma pagal šių pastato rodiklių vertes (įvertinama visų išvardintų rodiklių atitiktis norminiams reikalavimams): pastato atitvarų skaičiuojamųjų savitųjų šilumos nuostolių, pastato sandarumo, mechaninio vėdinimo su šilumogrąža sistemos techninių rodiklių, pastato energijos vartojimo efektyvumo rodiklių C1 ir C2 vertės, atitinkamai apibūdinančias pirminės neatsinaujinančios energijos vartojimo efektyvumą šildymui, vėdinimui, vėsinimui ir apšvietimui bei KV ruošti, pastate sunaudojamos energijos dalį iš AEI.

Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerijos paruoštame „Energijos beveik nevartojančių pastatų kiekio didinimo plane“ rašoma, jog atsižvelgiant į nustatytus reikalavimus, kad pastatas atitiktų B energinio naudingumo klasę, jo neatsinaujinančios pirminės energijos suvartojimas šildymui, vėsinimui ir apšvietimui turi būti 1–2 kartus mažesnis už C klasės pastatų, atitinkamai A klasės pastatų 2–2,67 karto mažesnės sąnaudos, A+ klasės – 2,67–4 kartus mažesnės, A++ klasės – daugiau kaip 4 kartus.

Tam, kad pastatas atitiktų B energinio naudingumo klasę, jo neatsinaujinančios pirminės energijos suvartojimas karštam buitiniam vandeniui ruošti turi būti daugiau kaip 1,01 karo mažesnis už C klasės pastatų, atitinkamai A klasės pastatų daugiau kaip 1,18 karto mažesnis, A+ klasės – daugiau kaip 1,25 karto mažesnis, A++ klasės – daugiau kaip 1,43 karto (Aplinkos ministerija 2011).

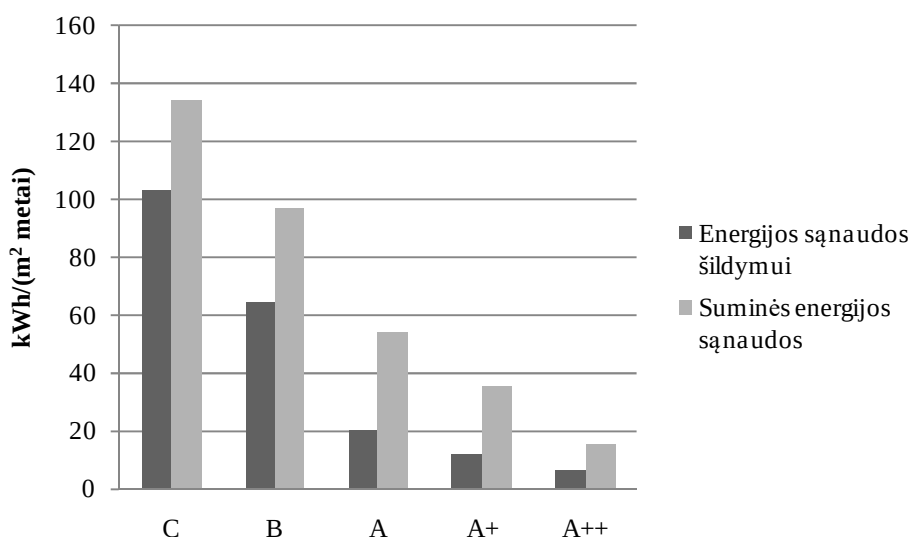
Šalia reikalavimų atitinkamos energinio naudingumo klasės pastatų kvalifikacinio rodiklio C vertei įvesti tokie papildomi reikalavimai B, A, A+, A++ klasės pastatams: pastatų atitvarų skaičiuojamiesiems savitiesiems šilumos nuotoliams, t. y. atitvarų šiluminėms savybėms, energijos sąnaudoms pastato šildymui, pastato sandarumui, pastato vėdinimo sistemai.

B, A, A+, A++ klasės pastatų atitvarų šiluminės savybės turi atitikti STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ nurodytus rodiklius.

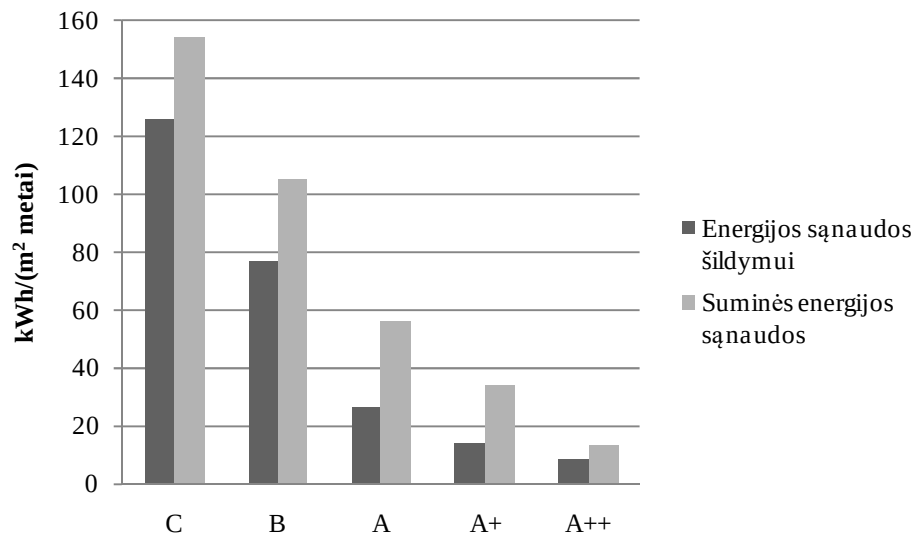
Pastatų sandarumo ir sandarumo matavimo reikalavimai taikomi A, A+ ir A++ energinio naudingumo klasių gyvenamosios, administracinės, mokymo ir gydymo paskirčių pastatams. Sandarumas turi būti išmatuotas, prie 50 Pa slėgių skirtumo tarp pastato vidaus ir išorės oro apykaita šiuose pastatuose turi neviršyti 0,6 karto per valandą. Kitų energinio naudingumo klasių ir kitos paskirties pastatams sandarumo matavimo reikalavimai nekeliama (KTU 2011).

Keliamas reikalavimas, kad A, A+ ir A++ energinio naudingumo klasės pastatų vėdinimo sistema būtų mechaninė su rekuperacija, kurios techniniams rodikliams taip pat keliama reikalavimai.

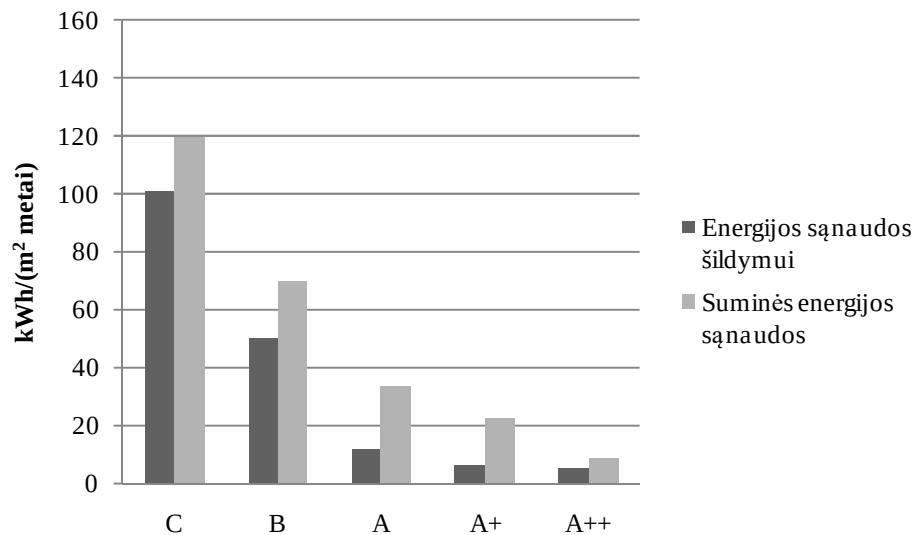
Kauno technologijų universiteto (KTU) Architektūros ir statybos instituto Statybinės šiluminės fizikos mokslo laboratorija pateikė skirtingų energinio naudingumo klasių 5 aukštų, 2000 m² ploto gyvenamojo daugiabučio, 3 aukštų, 750 m² ploto administracinio ir 4 aukštų, 2000 m² ploto mokslo pastatų energijos sąnaudų šildymui ir suminės energijos sąnaudų palyginimą (6 pav., 7 pav., 8 pav.).



6 pav. Gyvenamosios paskirties pastato sąnaudų palyginimas (KTU 2011)



7 pav. Administracinės paskirties pastato sąnaudų palyginimas (KTU 2011)



8 pav. Mokslo paskirties pastato sąnaudų palyginimas (KTU 2011)

Atsižvelgiant į keliamus reikalavimus, pastato energinis naudingumas priklauso nuo pastato atitvarų, langų ir durų šiluminių savybių (šiluminės varžos, šilumos perdavimo koeficiento), sandarumo lygio, langų ir durų orinio laidžio, skaidrių atitvarų kiekio, durų kiekio į lauką ir nešildomas patalpas, šilumos tiltelių, vėdinimo sistemos, KV ruošimo ir šildymo sistemos parinkimo. Visi rodikliai tarpusavyje susiję.

2.3 Gruntinių šilumos siurblių projektavimo normos ir standartai

Sistemų planavimas ir projektavimas privalo remtis norminiais dokumentais ir standartais tam, kad būtų išlaikyta kokybė ir neatsirastų galimybė taikyti neracionalių sprendimų. Europiniuose

standartuose (EN) pateikiamų vertinimo metodų naudojimas yra svarbus siekiant palyginti sistemas tarpusavyje šalies ir kontinento mastu (Januševičius 2013). Lietuvai įstojus į ES dauguma norminių dokumentų remiasi Europos standartais, išverstomis į lietuvių kalbą versijomis (LST EN). Gruntinių ŠS planavimas nėra apibrėžtas Lietuvos normose, todėl tikslinga remtis LST EN standartais.

Projektuojant sistemas apskaičiuojamas energijos poreikis pastato šildymui pagal standartą „Energinės pastatų charakteristikos. Patalpoms šildyti ir aušinti sunaudojamos energijos skaičiavimas“ (LST EN 13790 2008), gaunamas šilumos šaltinio pagaminamas energijos kiekis, reikalingas patalpų šildymui, įvertinus šildymo prietaisų šilumos sklaidos ir valdymo efektyvumą (LST EN 15316-2-1 2007) bei skirstymo efektyvumą (LST EN 15316-2-3 2007) gaunami energijos poreikiai reikalingi numatytam temperatūriniam komfortui užtikrinti.

Skaičiuotinas KV kiekis gali būti nustatomas keturiais skirtingo detalumo metodais (LST EN 15316-3-1 2007). Atsižvelgiant į skirstymo nuostolius, atsirandančius vamzdynuose, ir prastovos nuostolius, esant akumuliacinėms talpoms (LST EN 15316-3-1 2007), apskaičiuojamas energijos kiekis, kurį turi pagaminti šilumos generatorius KV ruošimui.

ŠS sezoninio efektyvumo skaičiavimas aprašomas standarte „Patalpoms šildyti skirtos šilumos gamybos sistemos, šilumos siurblių sistemos“ (LST EN 15316-4-2 2008). Šių sistemų projektavimo procedūra aprašyta standarte „Pastatų šildymo sistemos. Šildymo sistemų su šilumos siurbliais projektavimas“ (LST EN 15450 2008). Pastarajame standarte pateikiamas sezoninio efektyvumo faktoriaus (angl. *Seasonal Performace Factor*, SPF) skaičiavimo metodika ir ribos, kuriomis šis skaičiavimas atliekamas.

Standarte pateikiamos minimalios ir tikslinės vertės gruntiniams ŠS priklausomai nuo naudojimo paskirties. Tikslinės SPF reikšmės yra perkeltos į statybos techninį reglamentą „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ (STR 2.01.09:2012) (Januševičius 2013). Šildymo sistemai ir KV ruošimui minimali gruntinio ŠS SPF vertė – 3,5, tikslinė – 4,0. KV ruošimui minimali SPF vertė – 3,0, tikslinė – 3,5.

K. Januševičiaus (2013) darbe rašoma, kad remiantis standarte pateikiama informacija galima teigti, kad ŠS sistemos turi būti suplanuotos taip, kad būtų pasiektos tikslinės (standarte numatytos ir pakankamos) SPF vertės. Lietuviškuose norminiuose dokumentuose apie tai neužsimenama, tačiau didesnis SPF rodiklis šilumą ruošiančiam įrenginiui gali tapti privalumu siekiant aukštesnės pastato energinio naudingumo klasės pagal STR 2.01.09:2012 pateikiamą metodiką. Tačiau nepaisant pastato energinio naudingumo klasės, aukštesnis SPF rodiklis reiškia, kad sistema veikia efektyviau, mažesnėmis energijos sąnaudomis.

3. TYRIMO METODIKA

3.1 Tyrimo objektas ir vieta

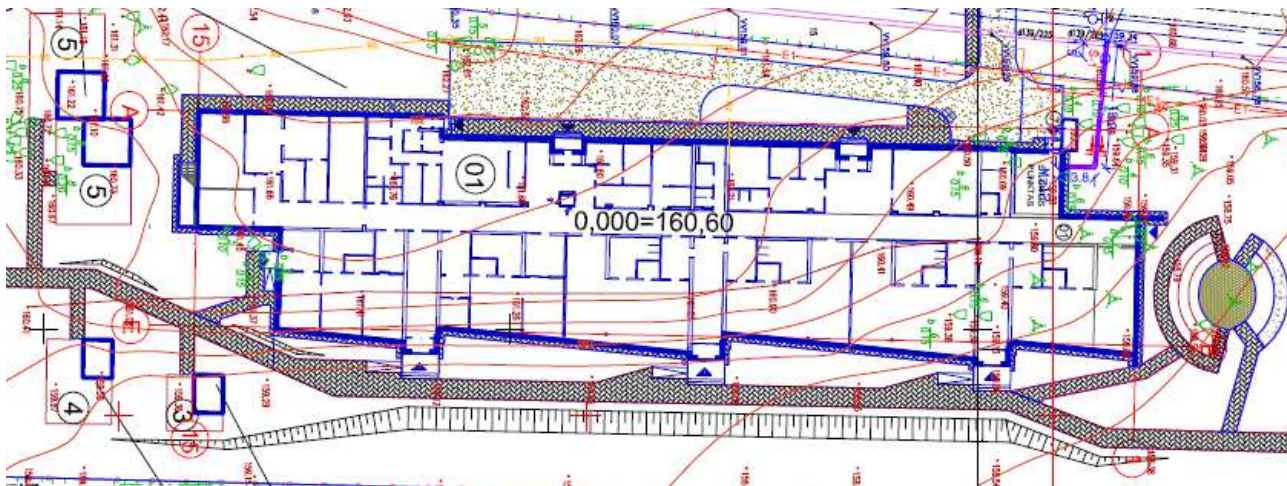
Tyrimui atlikti pasirinktas visuomeninis, mokslo paskirties pastatas – vaikų lopšelis–darželis Santariškių g. 27A, Vilniuje (9 pav.). Tai pirmasis A+ energinės naudingumo klasės visuomeninis pastatas Lietuvoje. Statybos produkcijos sertifikavimo centro (SPSC) duomenimis, iki 2015 m. vasario mėnesio tik 34 pastatai Lietuvoje buvo A energinio naudingumo klasės ir tik 6 pastatai A+ energinio naudingumo klasės (Santariškių vaikų lopšelis–darželis 2015). Pastatas eksploatuojamas nuo 2015 m. sausio mėnesio. Tai viena iš novatoriškiausių, o kartu ir viena efektyviausių ir ekologiškiausių ikimokyklinio ugdymo įstaigų Lietuvoje.



9 pav. Vaikų lopšelio–darželio pastatas (Santariškių vaikų lopšelis–darželis sprendiniai 2015)

Pastatas buvo statomas dvejus metus nuo 2013 metų. Projektavimo pradžioje buvo numatyta, kad pastatas atitiks C energinio naudingumo klasę, tačiau vėliau buvo priimtas sprendimas siekti A energinio naudingumo klasės. Pasibaigus statyboms ir sertifikuojant pastatą buvo gautas aukštesnės A+ energinio naudingumo klasės sertifikatas.

Pastato sklypo plano ištrauka pateikta 10 pav.



10 pav. Pastato sklypo plano ištrauka

Duomenys apie objektą pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Objekto duomenys

Vieta	Santariškių g. 27A, Vilnius
Paskirtis	Mokslo
Aukštų skaičius	2
Naudingasis (šildomas) plotas	3446,04 m ²
Žmonių skaičius	Apie 250 (206 vietos 0–7 m. amžiaus vaikams)
Šilumos perdavimo koeficientai	Sienų – 0,1016/0,1025/0,155 (ŠP) W/m ² K. Stogo – 0,09/0,195 (ŠP) W/m ² K. Grindų – 0,12 W/m ² K. Langų – 0,92 W/m ² K. Durų – 1,3 W/m ² K.
Projektinė patalpų temperatūra	Priėmimo patalpa, žaidimų kambarys, miegamasis – 21 °C. WC–prausykla – 24 °C. Sveikatos kabinetas – 22 °C. Koridoriai, universali salė – 20 °C. Laiptinės – 19 °C.
Vėdinimas	6 rekuperacinės vėdinimo sistemos, šilumogrąžos efektyvumas – 90,1–91,2 %
Šildymas	Šilumos šaltinis – gruntinis ŠS ir CŠT. Šildymo sistema – vandeninė, žematemperatūrė grindinio šildymo.
Metiniai šilumos poreikiai	Grindiniam šildymui – 209,3 MWh. Vėdinimui – 70 MWh. Karštam vandentiekiiui – 12 MWh. Viso – 291,3 MWh.

Pastaba. Duomenys pateikiami iš pastato techninio projekto.

Pastato energinio naudingumo sertifikato duomenys pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Pastato energinio naudingumo sertifikato duomenys

Pastato pirminės energijos sąnaudos, kWh/m ² per metus	
Neatsinaujinančios PE sąnaudos	50,86
Atsinaujinančios PE sąnaudos	0,91
Energijos sąnaudos pastatui šildyti, kWh/m ² per metus	
Neatsinaujinančios PE sąnaudos	12,25
Atsinaujinančios PE sąnaudos	0
Šiluminės energijos	4,38
Energijos sąnaudos pastatui vėsinti, kWh/m ² per metus	
Neatsinaujinančios PE sąnaudos	4,31
Atsinaujinančios PE sąnaudos	0
Šiluminės energijos	4,31
Energijos sąnaudos karštam buitiniam vandeniui ruošti, kWh/m ² per metus	
Neatsinaujinančios PE sąnaudos	14,36
Atsinaujinančios PE sąnaudos	0,91
Šiluminės energijos	7,01
Elektros energijos sąnaudos pastate, kWh/m ² per metus	
Neatsinaujinančios PE sąnaudos	24,25
Atsinaujinančios PE sąnaudos	0
Elektros energijos suminės sąnaudos	8,66
Elektros energijos sąnaudos patalpų apšvietimui	0,45
Pastato į aplinką išmetamas CO ₂ kiekis, kgCO ₂ /m ² per metus	10,94
Pastato sandarumo matavimų duomenys, kartai per valandą (50 Pa)	0,30

Pastaba. Faktiniai energijos sąnaudų duomenys gali skirtis nuo sertifikate pateikimų duomenų.

Pagal pirminį projektą vaikų lopšelio–darželio energijos sąnaudos būtų siekusios apie 200 kWh/m² per metus ar net daugiau, tačiau projektiniai pakeitimai leido kelis kartus sumažinti energijos sąnaudas. Energinio naudingumo sertifikate nustatytas 4,38 kWh/m² per metus sąnaudų šildymui kiekis.

Viena iš sąlygų, numatytų projekte – sumontuoti energiškai efektyvią vėdinimo sistemą, atitinkančią A energinio naudingumo klasę. Buvo parinkti vėdinimo įrenginiai su šilumogrąžiais, kurių naudingumo koeficientas siekia daugiau kaip 90 % (standartinės įrangos naudingumo koeficientas – 70–80 %). Taip pat buvo keliamas reikalavimas, kad įranga naudotų mažai elektros energijos, todėl panaudoti energetiškai efektyvūs ventiliatoriaus elektros varikliai, jų energijos sąnaudos apie 25–30 % mažesnės nei standartinės įrangos.

Pastato projekte buvo numatytos šilumos ir elektros energijos taupymo priemonės aukštai energinio naudingumo klasei pasiekti, vienos iš jų: aukštas šilumogrąžos efektyvumas, šalto oro paėmimo kanalų izoliavimas šilumine izoliacija, šilumos tiekimo ir šildymo sistemų, vandens vamzdžių izoliavimas šilumine izoliacija, patalpų su grindiniu šildymu temperatūros reguliavimas numatomas kambario termostatais su programuojamais valdymo blokais.

Nuo pastato eksploataavimo pradžios, 2015 metų sausio mėnesio, pradėti kaupti šilumos ir KV suvartojimo apskaitos duomenys. Kaupiami ir kas dvi savaites registruojami iš ŠS suvartojamos šilumos šildymo sistemai ir KV ruošimui duomenys, iš CŠT suvartojamos šilumos duomenys bei KV suvartojimo duomenys. Paskutiniai gauti užregistruoti apskaitos duomenys – 2015 metų lapkričio 25 dieną.

Iš viso per beveik vienuolikos mėnesių laikotarpį buvo suvartota apie 106,66 MWh šilumos iš ŠS šildymo sistemai, apie 24,28 MWh KV ruošimui ir 50,75 MWh iš CŠT. Daugiausia šilumos iš ŠS šildymo sistemai ir iš CŠT sunaudota vasario mėnesį, KV ruošimui – rugsėjo mėnesį. Per šį laikotarpį suvartota apie 485,62 m³ karšto vandens.

Pagal pastatą eksploatuojančios įmonės duomenis gruodžio mėnesį suvartota apie 30 % daugiau energijos negu buvo prognozuota. Energetikos specialistų nuomone, kadangi pastatas eksploatuojamas pirmus metus po statybų, dėl susikaupusios statybinės drėgmės sunaudojama daugiau energijos. Tai gali turėti įtakos sudarytos schemos skaičiavimų rezultatų neatitikimą realiems pastato apskaitos duomenims.

3.2 Tiriamasis įrenginys – gruntinis šilumos siurblys

Šilumos siurbLIAI, jų tipai ir režimai

Nagrinėjamos technologijos pradžia – žymaus mokslininko Lordo Kelvino ŠS koncepcija parengta dar 1852 metais. Penktajame dešimtmetyje ŠS jau buvo žinomi kaip efektyvi šildymo priemonė. Ypatingas susidomėjimas ŠS atsirado aštuntajame dešimtmetyje. Tuo metu arabai buvo įvedę naftos embargą, tai dar labiau padidino pigios bei ekonomišką energiją, skirtą pastatų šildymui, populiarumą. ŠS, kaip šilumos generatorių, panaudojimas yra gana platus. Įrenginiai naudojami tiek pramonėje, tiek gyvenamųjų bei viešųjų pastatų šilumos poreikiams tenkinti (Šilumos siurblio istorija 2009).

ŠS kaip ir vėsinimo įrenginiai veikia pagal atvirkštinį ciklą. Šiluma perduodama nuo vėsesnių kūnų šiltesniems. Jei vėsinimo įrenginių technologinė paskirtis paimti šilumą, tai ŠS – tiekti šilumą (Šilumos siurblio istorija 2009). ŠS – įrenginys, kuriam reikia elektros energijos (suteikti darbą), kad būtų galima gaminti šilumą arba vėsą.

ŠS sudarantys pagrindiniai komponentai – kompresorius, kondensatorius, droselinis vožtuvas ir garintuvas. ŠS cirkuliuoja freonas. Kompresorius suspaudžia freoną iki reikiamo slėgio, taip jį pašildo ir priverčia garuoti. Po kompresoriaus freonas teka į kondensatorių, kuriame, atiduodamas šilumą tekančiam šilumnešiui, kondensuojasi. Atidavęs šilumą, bet neatvėšęs, freonas teka pro droselinį vožtuvą, kuriame droseliavimo metu staigiai krenta freono slėgis ir temperatūra.

Proceso 1–2 metu freonas yra suspaudžiamas kompresoriuje, pakyla jo temperatūra ir slėgis. Idealiu atveju procesas kompresoriuje būtų izoentropinis (pastovi entropija s). Šis procesas pažymėtas punktyrine linija 1–2_{id}. Tačiau realiame procese pagaminama entropija, todėl linija 1–2 yra pasislinkusi į dešinę nuo 1–2_{id} punktyrinės linijos.

Freonas iš kondensatoriaus patenka į droselinį vožtuvą, kur nukrinta jo slėgis ir temperatūra, vyksta izoentalpinis procesas (pastovi entalpija h) 4–5. Po šio proceso freonas patenka į garintuvą, kuriame jo temperatūra ir slėgis nekinta, vyksta izobarinis ir izoterminis procesas, pasiekiamas pradinė būsena 6 taške. Jame garinamas freonas, turėdamas žemesnę nei aplinkos temperatūrą, sunaudoja šilumą. Drėgnasis garas vėl patenka į kompresorių. Toliau ciklas kartojamas.

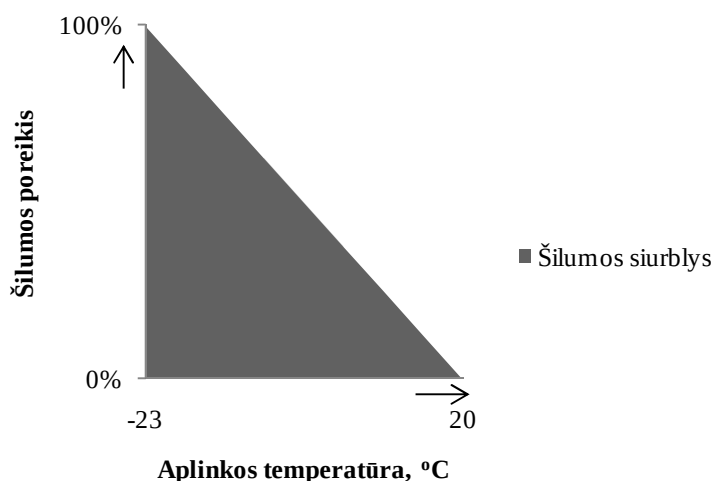
33

Ekonominiu požiūriu orinių ŠS įrengimo kaštai yra mažesni, lyginat su gruntiniais ŠS, tačiau pastarųjų eksploatavimo sąnaudos mažesnės, nes naudojama pastovesnė grunto temperatūra. Tačiau eksploatavimo sąnaudos priklauso ir nuo to, kokios paskirties ir koku režimu veikia ŠS.

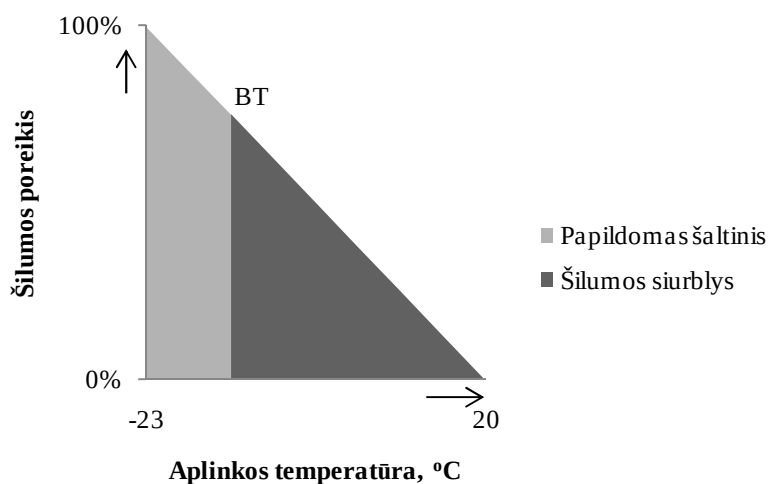
ŠS gali būti naudojami patalpų šildymui, KV ruošimui, šildymui ir vėsinimui pritaikyti ŠS, integruoto veikimo, kuomet šiluma tiekiamą patalpoms, buitinio KV ruošimui ir patalpų vėsinimui.

ŠS gauta šiluma patalpoms šildyti gali būti atiduodama skirtingai. Vienas iš būdų, kai šiluma atiduodama tiesiogiai orui arba naudojant mechaninį vėdinimą į patalpas tiekiamam orui pašildant jį iki 30 °C. Kitas būdas – šildyti šilumnešį, tiekiamą į pastato šildymo sistemą. Grindinio šildymo sistemai šilumnešį reikia sušildyti iki 30–45 °C, radiatorinei – iki 45–58 °C. Optimalus sprendimas, kai prie ŠS pritaikoma grindinė arba orinė patalpų šildymo sistema, nes esant mažesnei kondensavimosi temperatūrai, ŠS veikia efektyviau.

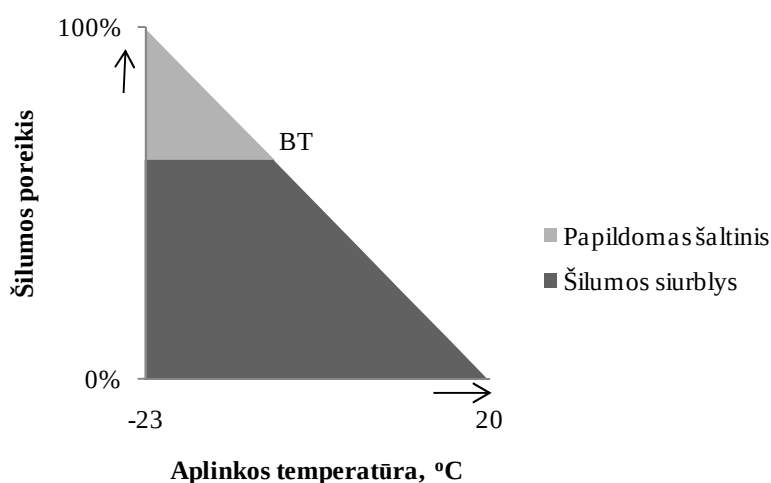
Siekiant efektyvumo, veikimo stabilumo, ekonomiškumo ir komforto galimi skirtingi ŠS veikimo režimai – monovalentinis (12 pav.), bivalentinis alternatyvus (13 pav.) ir bivalentinis lygiagretus arba monoenergetinis (14 pav.).



12 pav. Monovalentinis režimas



13 pav. Bivalentinis alternatyvus režimas



14 pav. Bivalentinis lygiagretus režimas

Monovalentinis – naudojamas vienas ŠS, jo pajėgumas parenkamas taip, kad jis tenkintų maksimalų šilumos poreikį. Bivalentinis alternatyvus – ŠS yra naudojamas kartu su papildomu šilumos šaltiniu, pavyzdžiui, kieto kuro arba dujiniu katilu, dalį šilumos poreikio tenkina ŠS kitą dalį – papildomas šilumos šaltinis. Bivalentinis lygiagretus arba monoenergetinis režimas – ŠS yra naudojamas kartu su papildomu šilumos šaltiniu, kuris yra įjungiamas kai šildymo poreikis išauga maksimaliai, jų veikimas derinamas kartu. Bivalentėse sistemose svarbus rodiklis yra bivalentė temperatūra (BT), kuri nurodo, kokiai aplinkos temperatūrai esant veiks ŠS, o kokiai papildomas šaltis arba abu šilumos generatoriai kartu.

Bivalentinės alternatyvios ir lygiagrečios sistemos dar vadinamos nuosekliai sujungtomis ir lygiagrečia sujungtomis sistemomis. Nuosekliai sujungtoje sistemoje antrasis šilumos šaltinis yra parenkamas tokio galingumo, kad būtų padengiami tik pikiniai šilumos poreikiai, lygiagrečiai – antrasis šilumos šaltinis parenkamas tokio galingumo, kad būtų padengiamas šalčiausios metų dienos šildymo poreikis.

Gruntinis šilumos siurblys

Tyrimui pasirinktą visuomeninį, beveik 3 500 m² ploto pastatą (vaikų lopšėlį–darželį), esantį Vilniuje, šiluma aprūpina gruntinis ŠS. Nagrinėjamas gruntinis ŠS yra su vertikaliu, įrengtu šalia pastato kolektoriumi. ŠS veikia bivalenčiu režimu kartu su CŠT ir ruošia šilumnešį pastato grindinio šildymo sistemai, vėdinimo sistemai ir KV šildymui. Numatyta, kad šilumos poreikis CŠT būtų užtikrinamas tik tuo atveju, kai ŠS nebūtų pajėgus tiekti reikiamos temperatūros šilumnešio.

Nagrinėjamo pastato gruntinio ŠS duomenys pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Nagrinėjamojo gruntinio šilumos siurblio duomenys

Gamintojas	Stiebel-eltron, Vokietija
Modelis	WPF 40
Paskirtis	Patalpų šildymas ir karšto buitinio vandens ruošimas
Tipas	„gruntas–vanduo“
Veikimo principas (režimas)	Bivalentinis alternatyvus
Šilumnešis	R410A
Leistinas viršslėgis	4,3 MPa
Šilumos siurblio galia (pagal DIN EN 14511), kai įeinančio kolektoriaus skysčio temperatūra – 0 °C, į šildymo sistemą tiekiamas srautas – 35 °C	Šildymo galia – 45,70 kW Šaldymo galia – 36,28 kW
Galios sąnaudos	9,42 kW
Transformacijos koeficientas	4,85
Šildymo sistemos vandens temperatūros skirtumas, esant nominaliam debitui	5 K
Kolektoriaus šilumnešis	33 % vandens etilenglikolio tirpalas
Kolektoriaus skysčio kiekis	16,6 l
Min. debitas	10,5 m ³ /h
Leistinas viršslėgis	0,3 MPa
Vidinis slėgio skirtumas	160 hPa
Šilumos paskirstymo sistemos šilumnešis	Nukalkintas vanduo
Nominalus debitas pagal DIN EN 14511 $\Delta T=5$ K	7,5 m ³ /h
Debitas, kai $\Delta T=10$ K	3,72 m ³ /h
Leistinas viršslėgis	0,3 MPa
Kolektoriaus sistema min./maks.	–5/20 °C, trumpą laiką (maks. 30 min.) šaltinio temperatūra gali būti iki 40 °C
Šilumos paskirstymo sistema (šildymo kontūras) min./maks.	15/60 °C
Temperatūrų skirtumas šildymo sistemoje	7 K
Metinis COP patalpų šildymui	4,82
Metinis COP karšto vandens ruošimui	4,07
Bendras metinis COP	4,57

Pastaba. Pateikiami gamintojo deklaruoti duomenys.

ŠS sudaro sraigtinis kompresorius, plokšteliniai šilumokaičiai, cirkuliaciniai siurbliai, pamašymo vožtuvai, hidraulinės jungtys, apsaugos grupės, antivibraciniai tvirtinimo elementai ir multifunkciniai valdymo procesoriai.

Geoterminio šildymo lauko kontūrą sudaro 6 gręžiniai. Vieno gręžinio gylis – 117 m, vieno gręžinio galia – 7,52–8,36 kW. Gręžiniai sklypo teritorijoje apjungti bendra magistrale ir privesti iki šilumos punkto. Gręžiniuose įrengtas plastikinis vamzdynas. U formos vamzdynai sujungti *Tichelman* schema. Šis jungimo principas padeda sumažinti slėgio nuostolius cirkuliaciniame kontūre ir tokiu būdu sumažinti cirkuliacinių siurblių galią ir energijos sąnaudas. Šilumnešio cirkuliacijos palaikymui per lauko kontūrą numatytas cirkuliacinis siurblys, uždarojoji, indikacinė armatūra, išsiplėtimo indas ir apsauginis vožtuvas.

Kadangi ŠS ruošia šilumnešį pastato šildymo sistemai ir KV ruošimui, už ŠS suprojektuotas triegis vožtuvas su elektrine pavara, kuris automatiškai pagal poreikį persijungia į šildymo sistemą ar KV ruošimą.

Šildymo sistemos kontūre suprojektuota akumuliacinė talpa. Karštam vandentiekui vanduo nuo ŠS pašildomas plokšteliniu šilumokaičiu, po to tiekiamas į šilumos punkto KV ruošimo šilumokaitį, iš kurio 55 °C temperatūros tiekiamas į KV akumuliacines talpyklas arba į KV tiekimo tinklą. KV temperatūra praustuvų ėmimo čiaupuose turi būti ne aukštesnė kaip 37 °C, todėl prie praustuvų įrengti temperatūros ribotuvai.

Sistemos kontūruose įrengtas plokštelinis šilumokaitis, talpyklos KV, išsiplėtimo indai, cirkuliaciniai siurbliai, uždarojoji, indikacinė armatūra ir kiti prietaisai, užtikrinantys saugų sistemų veikimą. Sistemoje įrengti pagamintos šilumos energijos šilumos skaitikliai su debitomačiais ir temperatūros jutikliais. Šilumos sistemos užpildymui ir periodiniam papildymui įrengta šalto vandentiekio atšaka su automatiniu papildymo vožtuvu, grubaus valymo filtru, minkštinimo filtru ir šalto vandens skaitikliu bei uždaromąja armatūra.

ŠS vidaus kontūrų šilumnešio tiekimo vamzdynai į grindinio šildymo sistemą ir iki KV šildytuvų, šilumos punkto patalpoje, įrengti iš plieninių, izoliuotų šilumos izoliacija, vamzdžių.

3.3 Modeliavimo priemonės tyrimui parinkimas

Kompiuterinis modeliavimas – šių laikų atliekamų tyrimų ir analizės tendencija (Kompiuterinis modeliavimas 2010). Tai eksperimentas, kuriame objektas pakeičiamas modeliu.

Per pastaruosius porą dešimtmečių kompiuterinis modeliavimas, kaip ir analitiniai bei eksperimentiniai tyrimai, tapo galingu pažangos tiriant įvairių įrenginių ir sistemų veikimą įrankiu. Kompiuterinis modeliavimas suteikia galimybę tyrinėti objektą, procesą ar reiškinių (Modeliavimas 2015).

Tuomet, kai modeliavimas su realiais įrenginiais ar sistemomis (eksperimentinis tyrimas) yra labai brangus, pernelyg sudėtingas ar užimantis per daug laiko, į pagalbą galima pasitelkti kompiuterinį modeliavimą (Kompiuterinis modeliavimas 2010), dar vadinamą kompiuterine simuliacija (angl. *simulation* – imitavimas, modeliavimas).

Turint reikalingus duomenis ir naudojant kompiuterinio modeliavimo įrankį galima sukurti esamo objekto ar objekto, kuris neegzistuoja modelį.

Nors bendra eksperimento ir kompiuterinio modeliavimo tyrimo seka yra panaši, tačiau atskiruose etapuose išsiskiria skirtingos atliekamo tyrimo ypatybės, kurios atskleidžia pagrindinius eksperimento ir modeliavimo skirtumus. Eksperimento ir modeliavimo palyginimas pateiktas 4 lentelėje.

4 lentelė. Eksperimento ir modeliavimo palyginimas

Eksperimentas	Modeliavimas
• Reikalinga reali įranga (įrenginys, sistema, matavimo prietaisai). • Tyrėjas turi būti specialistas, žinantis kaip naudotis reikalinga įranga, turintis specialų išsilavinimą ar būti specialiai apmokytas. • Tyrimui reikalingos specialios sąlygos, kurios turi būti realiai užtikrintos. Sąlygoms užtikrinti gali būti reikalingos specialios žinios. • Reikalingas tiesioginis kontaktas su tyrimu. • Užtrunka ilgiau. • Nepavykus tyrimui sudėtinga viską pakartoti. • Pasikeitus rodikliams reikia tyrimą pradėti iš naujo (sudėtinga keisti rodiklius). • Sunku įgyvendinti neegzistuojančių (naujai kuriamų) objektų tyrimą. • Objektas ir tyrimo sąlygos atitinka realybę. • Tyrimo metu gali būti atrasti nauji reiškiniai.	• Reikalingas kompiuteris ir programinė įranga. • Tyrėjui nereikia specialių žinių ar apmokymų (priklausomai nuo programos sudėtingumo). • Tyrimo sąlygos nustatomos kompiuteriu. • Tyrimas atliekamas per atstumą (valdoma kompiuteriu). • Užtrunka trumpiau (priklausomai nuo kompiuterio galingumo). • Nepavykus tyrimui nesudėtinga viską pakartoti. • Pasikeitus rodikliams užtenka programoje nurodyti pakitimus ir perskaičiuoti (nesudėtinga keisti rodiklius). • Galima tirti neegzistuojančius (naujai kuriamus) objektus. • Visada egzistuoja neatitikimas tarp modelio ir realaus objekto. • Modelyje gali būti neatsižvelgta į kai kuriuos svarbius, bet dar nenustatytus realius objekto aspektus, savybes.

Šiuo metu dažnai, tiek mokslinėje, tiek praktinėje veikloje, kompiuterinis modeliavimas keičia eksperimentinius tyrimus ir yra naudojamas kaip vienas iš pagrindinių arba pagrindinis įrankis analizuojant ir vertinant įrenginių bei sistemų procesus bei skirtingų parametrų įtaką jų veikimui. Mokslinėje veikloje pasitelkus kompiuterinį modeliavimą galima išsiaiškinti ir įsitikinti iškeltų teorijų bei prielaidų teisingumu, analizuoti įvairius procesus. Praktinėje veikloje, ypač inžinerinėje srityje, naudojant kompiuterinį modeliavimą galima ieškoti naujų objektų ar sistemų projektavimo sprendimų, įvertinti jų galimybes. Analitikai ir projektuotojai, prieš realizuodami sistemas, kuria modelius tam, kad galėtų geriau suprasti sistemos veikimą ir jos charakteristikas, optimizuoti jos struktūrą, mažinti rizikos rodiklį, didinti veikimo efektyvumą.

Kompiuterinis modeliavimas taikomas ir energetinių tyrimų bei praktikos srityje. Taikoma procesų, sistemų ir atskirų sistemos komponentų (įrenginių) analizei atlikti. Energetinis modeliavimas padeda suprasti objektuose (pastatuose, įrenginiuose, sistemose) vykstančius procesus, įvertinti jų panaudojimo galimybes, įrangos galias bei efektyvumą, įtaką aplinkai ir eksploataavimo sąnaudas.

Pagrindinis kompiuterinio modeliavimo įrankis (be kompiuterio) – programinė įranga (kompiuterinė programa), kuri yra tarpinė grandis tarp kompiuterio ir tyrėjo, leidžianti aprašyti uždavinį (duomenų įvestis) ir gauti aiškiai pateiktus rezultatus (duomenų išvestis).

Pasaulyje yra sukurta šimtai įvairių energijos modeliavimo programų. Pagal rinkos (vartotojų) poreikius kasmet, o kartais ir dažniau, jos atnaujinamos, testuojamos ir išleidžiamos naujos versijos, taip pat kuriamos naujos programos. Paklausa mokslinių tyrimų ir projektavimo srityse didelė, todėl pasiūla neatsilieka. Problema – iš daugybės programų pasirinkti tinkamiausią užduočiai atlikti.

D. B. Crawly *et al.* (2005) atliko dvidešimties panašios paskirties programų apžvalgą ir palyginimą. Tyrime išskirtos pagrindinės palyginimų kategorijos (darbe jos išskaidytos į smulkesnes):

- bendri modeliavimo požymiai (modeliavimo sprendimai, laiko žingsniai, geometrinis aprašymas, geometrijos įkėlimas arba iškėlimas į CAD ir kitas programas, medžiagų aprašymų detalumas, žmogaus komforto sąlygų įvertinimas ir kt.);
- zonų apkrovos;
- pastato atitvaros (angl. *envelope*), natūralus apšvietimas ir saulės įtaka (saulės įtakos, insoliacijos analizė, langų parametrai, bendri atitvarų parametrų skaičiavimai, dangaus modeliai (angl. *sky models*), apšvietimas bei valdymo kontrolė ir kt.);
- infiltracija, vėdinimas ir daugiazonis oro judėjimas (vėjo sukeliamas slėgis, natūralus vėdinimas, hibridinis vėdinimas ir kt.);
- atsinaujinančios energijos sistemos (saulės kolektoriai, fotovoltinės, vėjo jėgainės ir kt.);
- elektros sistemos ir įranga;
- šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemos;
- ŠVOK įranga (ventiliatoriniai konvektoriai, radiatoriai, drėkintuvai, ventiliatoriai, siurbliai, šilumokaičiai, vėsinimo įrenginiai, akumuliacinės talpos, KV ruošimo įrenginiai, valdymo kontrolės įrenginiai ir kt.);
- emisijos į aplinką;
- ekonominis įvertinimas (energijos kaina, gyvavimo ciklo kaštai);

- klimato duomenų prieinamumas;
- rezultatų ataskaitos;
- validacija;
- vartotojo sąsaja ir prieinamumas.

Tyrime teigiama, kad tarp daugybės modeliavimo įrankių nebuvo konkrečių apibūdinimų, kurie galėtų nusakyti ką tiksliai įrankis daro. Pastebėta daugybė dviprasmybių, kurios reikalauja papildomų tyrimų joms išaiškinti.

Atlikto tyrimo palyginamosios lentelės nurodo modeliavimo įrankio funkcijas ir galimybes, tačiau tyrėjai pažymi, kad yra daugybė programų „sugebėjimo“ niuansų, dėl kurių buvo sunku išsiaiškinti tiksliai funkcijas ir jas įvertinti.

Programų palyginimas pagal kategorijas pateiktas 5 lentelėje. Tyrimo ataskaitoje pateikiamos detalios palyginimo lentelės, kuriose kategorijos išskaidytos į smulkesnes, pagal funkcijų arba duomenų detalumą, 5 lentelėje pateikiamas apibendrintas palyginimas pagal kategorijas, išskiriant daugiausiai funkcijų ir duomenų turinčias programas.

5 lentelė. Modeliavimo įrankių palyginimas pagal D. B. Crawly *et al.* (2005)

Kategorijos	BLAST	BSim	DeST	DOE-2.1E	ECOTECH	ENER-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES VE	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRNSYS
Bendri modeliavimo požymiai									+		+			+	+					+
Zonų apkrovos	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+
Pastato atitvarų, natūralus apšvietimas ir saulė									+		+			+	+					+
Infiltracija, vėdinimas ir daugiazonis oro judėjimas		+	+						+		+				+			+		+
Atsinaujinančios energijos sistemos											+									+
Elektros sistemos ir įranga									+		+									+
ŠVOK sistemos			+						+	+	+	+		+	+				+	+
ŠVOK įranga	+								+		+	+		+	+				+	+
Emisijos į aplinką									+						+					
Ekonominis įvertinimas				+					+	+		+			+				+	+
Klimato duomenų prieinamumas					+	+			+											+
Rezultatų ataskaitos									+	+	+				+					+
Validacija											+									+
Vartotojo sąsaja ir prieinamumas										+	+	+		+	+				+	+

Pastaba. Nepažymėti lentelės langeliai nereiškia, kad programa neatlieka kategorijos funkcijų, tai reiškia, kad ji jų turi mažiau arba pagal tyrimą įvertinimas yra prastesnis lyginant su kitais modeliavimo įrankiais.

Šio tyrimo pagrindu atrinktos septynios programos tolimesniam vertinimui: EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IDA ICE (angl. *Indoor Climate and Energy*), IES VE (angl. *The IES Virtual Environment*), TRACE ir TRNSYS.

Jungtinių Valstijų Energijos departamento (angl. *U. S. Department of Energy*) internetiniame puslapyje pateikiamas išsamus energijos modeliavimo programų sąrašas su aprašymais, išskirtomis programų stiprybėmis ir silpnėmis.

Pagal puslapyje pateiktą informaciją EnergyPlus ir ESP-r programų privalumai yra pakankamas detalumas, lankstumas ir tai, kad jos nemokamos, tačiau EnergyPlus programoje nėra išbaigtos kai kurios funkcijos, ši programa paremta teksto įvestimi, o ESP-r reikalauja specialių žinių. eQUEST programos silpnybė yra ta, kad programa nenaudoja SI sistemos matavimų vienetų, IDA ICE – kai kurie skaičiavimai labai apkrauna kompiuterio procesorių, IES VE – nepritaikyta Linux operacinei sistemai, TRACE – reikalingi papildomi apmokymai ir specialios žinios, TRNSYS – reikalinga detali informacija apie pastatą ir sistemas. Taip pat visų šių programų licencijos yra mokamos.

J. Sousa (2013) atliktame tyrime buvo palygintos EnergyPlus, ESP-r, IDA ICE, IES VE ir TRNSYS programos. Tyrimo išvadose teigiama, kad TRNSYS programa iš visų palygintų programų yra išsamiausia, vienintelis trūkumas, kad neturi tiesioginės sąsajos su CAD programomis.

Vilniaus Gedimino technikos universitete atliktuose ir atliekamuose tyrimuose naudojamos EnergyPlus, EnergyPro ir TRNSYS programos. EnergyPlus naudojama kartu su papildomomis programomis, kuriose yra patogios sąsajos. Viena iš tyrimų teigiama, kad EnergyPro programai suteikiamas prioritetas dėl paprastos ir suprantamos vartotojo sąsajos, didelio kiekio įvairių energijos šaltinių pritaikymo galimybės bei gausios rezultatų išeišos tiek skaitine, tiek grafine forma (Janulis 2012). Tačiau kitame tiriamajame darbe pastabėtas programos trūkumas – kai kuriais atvejais nėra galimybės sujungti sistemos komponentų pagal realią schemą. Taip pat didelėje dalyje tyrimų naudota TRNSYS programa, kuri pasirinkta dėl grafinės aplinkos lankstumo ir išsamaus komponentų aprašymo, didelio vartotojų skaičiaus, galinti modeliuoti energetinės sistemos veikimą sekundės žingsniu, taip pat turi scenarijų kūrimo įrankį, sistemos veikimo bei investicijų optimizavimo funkcijas (Subačiūtė 2012).

Apžvelgus skirtingų tyrimų ir darbų modeliavimo įrankių įvertinimus, atliekamas funkcijas bei duomenų detalumą tolimesniems tyrimams atlikti pasirinkta TRNSYS modeliavimo programa.

TRNSYS aprašymas

TRNSYS (angl. *Transient System Simulation Tool*) yra programinės įrangos paketas, labai lanksti grafiškai pagrįstos programinės įrangos aplinka, naudojama imituoti nestacionariųjų sistemų elgesį. Didžioji dalis modeliavimų yra orientuoti įvertinti energetinių sistemų veikimą.

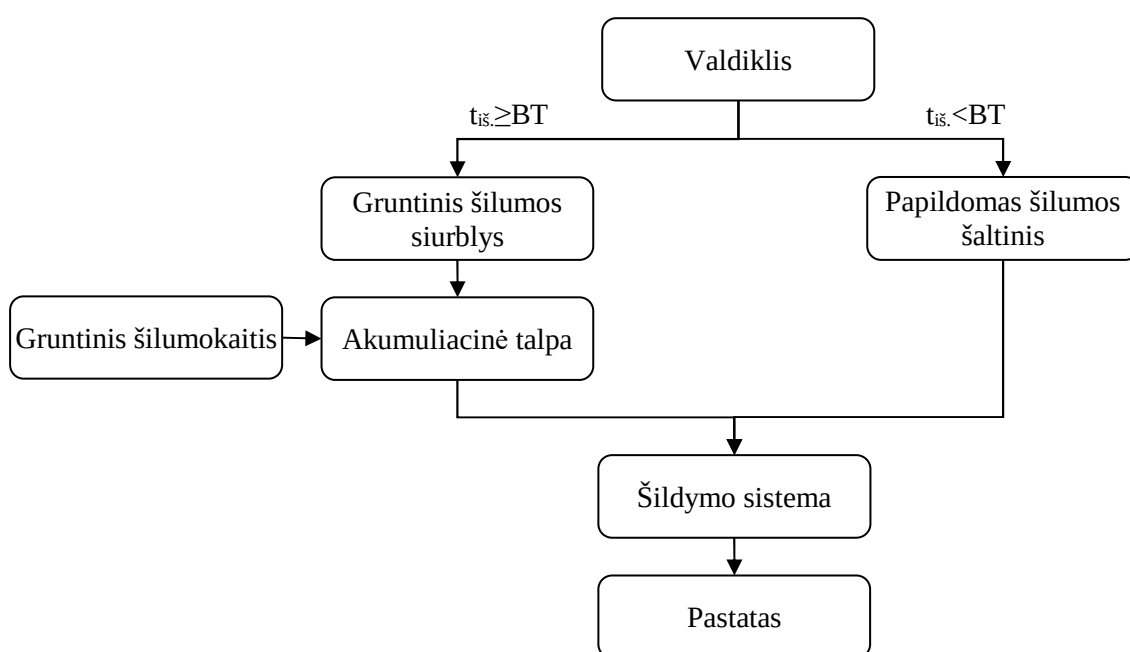
TRNSYS yra sudarytas iš dviejų dalių. Pirmoji yra skaičiavimų branduolys, kuris nuskaito ir apdoroja įvesties duomenis, iteracijų būdu išsprendžia sistemą, nustato konvergavimą ir apibrėžia sistemos kintamuosius. Branduolys taip pat teikia pagalbines priemones, kurios, be kitų detalių, nustato termofizikines savybes, invertuoja (skaičiuoja) matricas, atlieka tiesinės regresijos lygtis ir interpoliuoja išorės įvesties duomenis. Antroji dalis yra plati TRNSYS sudedamųjų dalių (komponentų) biblioteka, kurių kiekviena modeliuoja vienos dalies sistemos charakteristiką. Standartinę biblioteką sudaro apie 150 modelių – nuo siurblių, daugiazoninių pastatų, vėjo turbinų iki elektrolazerinių, nuo oro apdorojimo iki ekonominių parametrų tvarkymo ir nuo pagrindinės ŠVOK įrangos iki pažangiausių naujų technologijų. Modeliai sukonstruoti taip, kad vartotojai gali keisti egzistuojančius komponentus arba įrašyti naujus (TRNSYS 2015).

TRNSYS naudoja Fortran programavimo kalbą. Nurodant laiko atžvilgiu nekintančius ir kintančius įrangos parametrus, programa gali apskaičiuoti nuo laiko priklausančius parametrus. Programoje yra aprašomi atskiri jos komponentai, jų grafiniai vaizdai jungiami į sistemą. TRNSYS skaičiavimų branduolys, remdamasis įvestais duomenimis, atlieka iteracijas pagal kiekvieną laiko žingsnį, kol išsprendžia sistemos lygtis (TRNSYS 2015).

4. TIRIAMOJI SISTEMOS SCHEMA, PARAMETRAI IR MODELIS

Skaičiuojamoji nagrinėjamasis sistemos schema programoje TRNSYS sudaryta naudojantis vaikų lopšelio–darželio Santariškių g., Vilniuje, techniniame projekte, šilumos gamybos ir tiekimo dalyje, pateiktais projektavimo sprendinių aprašymais, įrenginių žiniaraščiu, šilumos punkto schema, įrenginių gamintojų deklaracijomis, sertifikavimo duomenimis ir objekto apžiūros metu surinktais duomenimis. Trūkstanti duomenys apskaičiuoti.

Principinė nagrinėjamo pastato skaičiavimuose įgyvendinta ir vertinama šilumos gamybos ir tiekimo schema ir veikimas pateikta 15 pav.



15 pav. Principinė pastato šilumos gamybos ir tiekimo schema

Pagal pateiktą schemą (15 pav.), numatyti du šilumos šaltiniai – gruntinis ŠS ir papildomas šilumos šaltinis (realiu atveju – CŠT). Gruntinis ŠS reikalingos temperatūros šilumą generuoja naudojant žemesnės temperatūros gruntu šilumokaičiu išgautą šilumą, tiekia ir kaupia šilumą akumuliacinėje talpoje, iš jos – į pastato grindinio šildymo sistemą. Papildomas šilumos šaltinis šilumą tiekia tiesiai į šildymo sistemą (realiu atveju – iš CŠT per šilumokaitį). Sistema valdoma elektroniniu sistemų regulatoriumi, kuris schemoje pažymėtas kaip valdiklis.

Atsižvelgiant į išorės oro temperatūrą, valdiklis duoda signalą vienam iš šilumos šaltinių tiekti šilumą į šildymo sistemą. Nagrinėjamu atveju, kai išorės oro temperatūra yra aukštesnė arba lygi bivalentei temperatūrai, veikia gruntinis ŠS, kai išorės oro temperatūra žemesnė nei bivalentė temperatūra, gruntinis ŠS nebenaudojamas, įjungiamas papildomas šilumos šaltinis.

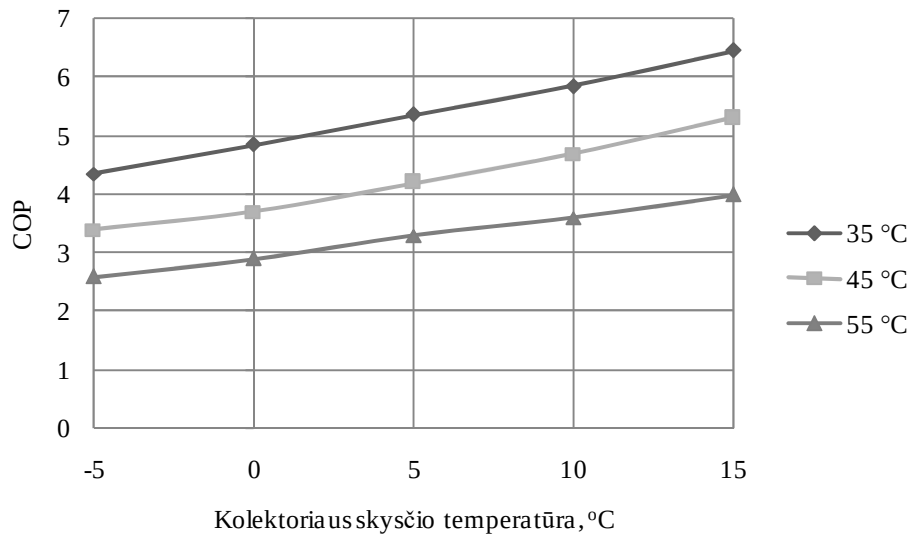
Darbe nagrinėjamas gruntinio ŠS, papildomo šilumos šaltinio ir šildymo sistemos kontūras, kurį sudaro vertikalus gruntinis šilumokaitis, ŠS, akumuliacinė talpa, papildomas šilumos šaltinis, šildymo sistema, cirkuliaciniai siurbliai ir vamzdynai.

Skaiciavimams naudojamų sistemos elementų ir medžiagų parametrai pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Sistemos elementų ir medžiagų parametrai

Sistemos elementas	Parametras	
Šilumos siurblys	Šildymo galia	45,70 kW
	Elektros galia	9,42 kW
Gruntinis šilumokaitis	Gręžinių gylis	117 m
	Gręžinių skaičius	6
	Užpildo šiluminio laidumo koeficientas	2 W/m·K
	U formos vamzdžio šiluminio laidumo koeficientas	0,42 W/m·K
Akumuliacinė talpa ŠS	Tūris	1 500 l
	Šilumos atidavimo koeficientas	0,5 W/m ² ·K
Gruntinio šilumokaičio cirkuliacinis siurblys	Debitas	10 983 kg/h
ŠS cirkuliacinis siurblys	Debitas	10 000 kg/h
Šildymo sistemos cirkuliacinis siurblys	Debitas	7 100 kg/h
Vanduo	Savitoji šiluma	4,19 kW/kg·K
	Tankis	1 000 kg/m ³
Etilentglikolio tirpalas	Savitoji šiluma	3,654 kW/kg·K
	Tankis	1 046 kg/m ³
Gruntas	Šiluminio laidumo koeficientas	2,6 W/m·K
	Šiluminė talpa	3 250 kJ/m ³ ·K

Skaiciavimuose gruntinio ŠS veikimas numatytas pagal gamintojo pateikiamą kolektoriaus ir šildymo sistemos šilumnešių temperatūrų, šildymo galios bei elektros energijos sąnaudų priklausomybę. Įrenginio gamintojo pateikiamas priklausomybės grafikas pavaizduotas 16 pav.



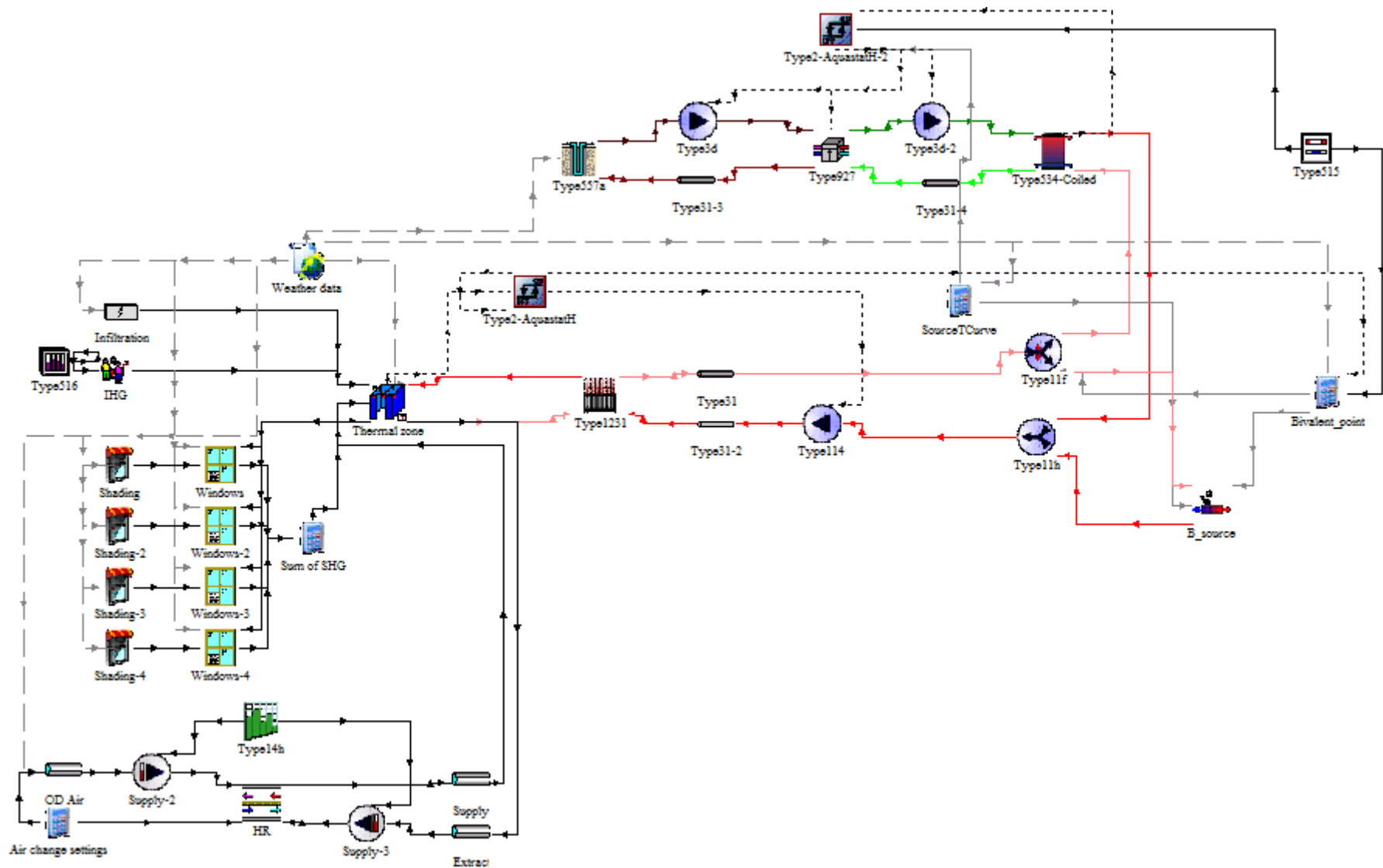
16 pav. Šilumos siurblio parametrų priklausomybė

Palaikomai akumuliacinės talpos ir grindinio šildymo sistemos temperatūrai nustatyti skaičiavimuose naudota grindinio šildymo sistemos ir išorės oro temperatūrų priklausomybė pagal LST EN 15316-4-2 standarte pateikiamą šildymo kreivę grindinio šildymo sistemai. Į grindinio šildymo sistemą tiekiamo šilumnešio temperatūra, priklausomai nuo išorės oro temperatūros, apskaičiuojama pagal (1) priklausomybę:

$$t_{tek} = 0,514 \cdot t_{iš.} + 31,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Čia: $t_{iš.}$ – išorės oro temperatūra, $^\circ\text{C}$.

Remiantis surinktais duomenimis sukurta nagrinėjamosios sistemos kontūro veikimo schema TRNSYS programoje. Sistemos schema pavaizduota 17 pav.



17 pav. Skaičiuojamoji sistemos schema TRNSYS programoje

Pateiktoje scheme (17 pav.) naudojami komponentai, imituojantis pastatą ir jo dalis, bei pagrindiniai realios šilumos gamybos ir tiekimo sistemos elementai – vertikalus gruntinis šilumokaitis, ŠS, akumuliacinė talpa, papildomas šilumos šaltinis, kuris nagrinėjamu atveju imituoja CŠT, elementas, imituojantis pastato šildymo sistemą, į kurią tiekama šiluma, cirkuliaciniai siurbliai ir vamzdynai. Schemeje naudojamas atskiras komponentas, kuriame aprašyti visų metų Vilniaus miesto klimato duomenys.

Skaičiavimuose naudoti pastato sertifikavimo procedūros metu apskaičiuoti savitieji šilumos nuostoliai per pastato atitvaras – apie 1 228 W/K. Naudojant papildomus programos komponentus įvertinta infiltracijos, išorinių pritekių ir žmonių buvimo pastate įtaka bendriesiems pastato šilumos poreikiams.

Tam, kad sistema funkcionuotų taip, kaip numatyta ir įgyvendinta pastate, schemeje naudojami papildomi elementai – valdikliai. Šiuose elementuose nustatyta, kokia temperatūra turi būti palaikoma pastato viduje, akumuliacinėje talpoje ir šildymo sistemoje. Numatyta, kad skaičiavimų metu valdikliai matuoja išorės, pastato patalpų oro, akumuliacinės talpos ir šildymo sistemos temperatūras, lygindami jas su numatytomis reikalingomis temperatūrų vertėmis, kurios turi būti pasiektos, bei duoda veikimo arba neveikimo signalą šilumos šaltiniams – gruntiniam ŠS arba papildomam šilumos šaltiniui.

Taip pat schemeje (17 pav.) numatyti papildomi programos komponentai, naudojami apskaičiuoti reikalingą tiekiamo srauto į šildymo sistemą temperatūrą, veikimo arba neveikimo signalus šildymo sistemai ir šilumos šaltiniams, bei komponentai, reikalingi skaičiavimų duomenims kaupti ir grafikams sudaryti.

Remiantis apskaičiuotais sudaryto modelio duomenimis, nustatytas nagrinėjamojo grunto ŠS sezoninis veikimo efektyvumas. Siekiant nustatyti komponentų parametrų įtaką ŠS sistemos veikimo efektyvumui, apskaičiuotas SPF kiekvienam šildymo laikotarpio mėnesiui ir bendras metinis rodiklis.

ŠS sezoninio efektyvumo faktorius apskaičiuojamas pagal (2) formulę:

$$SPF = \frac{Q_{is}}{E_i} \quad (2)$$

Čia: Q_{is} – vertinamojo laikotarpio ŠS pagamintas šilumos energijos kiekis, kWh; E_i – vertinamojo laikotarpio ŠS sunaudotas elektros energijos kiekis, kWh.

Atsižvelgiant į apžvelgtus mokslinius tyrimus, kuriuose akcentuojama bivalentės temperatūros parinkimo svarba, gruntinių šilumokaičių gręžinių parametrų ir įtaka ŠS efektyvumui bei projektavimo praktika, kuria remiantis parenkami ŠS sistemos komponentų parametrai, darbe

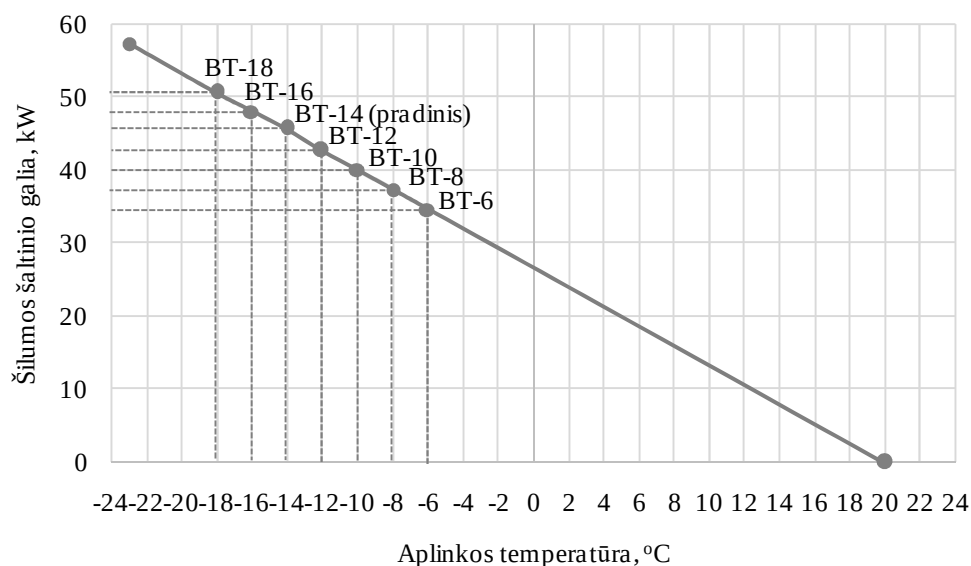
pasirinkta įvertinti grunto šiluminio šaltinio bivalentės temperatūros, vertikalaus grunto šilumokaičio gręžinių kiekio (ilgio) ir akumuliacinės talpos tūrio įtaka šiluminio šaltinio veikimui efektyvumui.

Bivalentė temperatūra – tai žemiausia išorės oro temperatūra, iki kurios šilumą gamina grunto šiluminis šaltinis, kai išorės temperatūra žemesnė už bilvalentę, šilumą gamina papildomas šilumos šaltinis. Vertinant bivalentės temperatūros įtaką, pirmiausia numatytos skirtingos bivalentės temperatūros vertės, pagal kurias apskaičiuotos reikalingos grunto šiluminio šaltinio galios pagal (3) formulę:

$$BT = t_{vid.proj.} - \frac{Q_{ss}}{H}, ^\circ C \quad (3)$$

Čia: $t_{vid.proj.}$ – projektinė vidaus oro temperatūra, $^\circ C$; Q_{ss} – šilumos siurblio galia, W ; H – pastato savitieji šilumos nuostoliai, W/K .

Nagrinėjamojo atvejo šiluminio šaltinio galios ir bivalentės temperatūros priklausomybė pateikiama 18 pav. Iš priklausomybės matyti, kad parenkant aukštesnę bivalentę temperatūrą, reikalinga mažesnė šiluminio šaltinio galia.



18 pav. Šilumos siurblio galia ir bivalentė temperatūra

Pagal EN 15450 standartą, projektuojant šiluminį šaltinį su gruntu šilumokaičiu, priklausomai nuo grunto šiluminio laidumo, 1 m gręžinio priskiriama 20–70 W šiluminio šaltinio galios arba 1 kW šiluminio šaltinio galios priskiriama 14–50 m gręžinio ilgio. Skaičiavimuose priimama prielaida, kad keičiant gręžinių kiekį pradinis vieno gręžinio ilgis, gylis, gręžinio ir U formos vamzdinių skersmuo bei atstumai tarp jų nesikeičia.

Projektuojant ŠS sistemas, parenkant akumuliacinės talpos tūrį, remiamasi, kad 1 kW ŠS galios priskiriama 13–35 l akumuliacinės talpos tūrio arba 1 l akumuliacinės talpos tūrio priskiriama 29–77 W ŠS galios. Bendras akumuliacinės talpos tūris parinktas pagal akumuliacinių talpų gamintojų numatytus standartinius tūrius.

Skirtingų skaičiavimų variantų parametrai pateikiami 7 lentelėje, 8 lentelėje ir 9 lentelėje.

7 lentelė. Bivalentė temperatūra

Žymuo	Gruntinio ŠS galia, kW	Bivalentė temperatūra, °C
BT-18	50,7	–18
BT-16	48,1	–16
BT-14 (pradinis)	45,7	–14
BT-12	42,7	–12
BT-10	40,1	–10
BT-8	37,4	–8
BT-6	34,7	–6

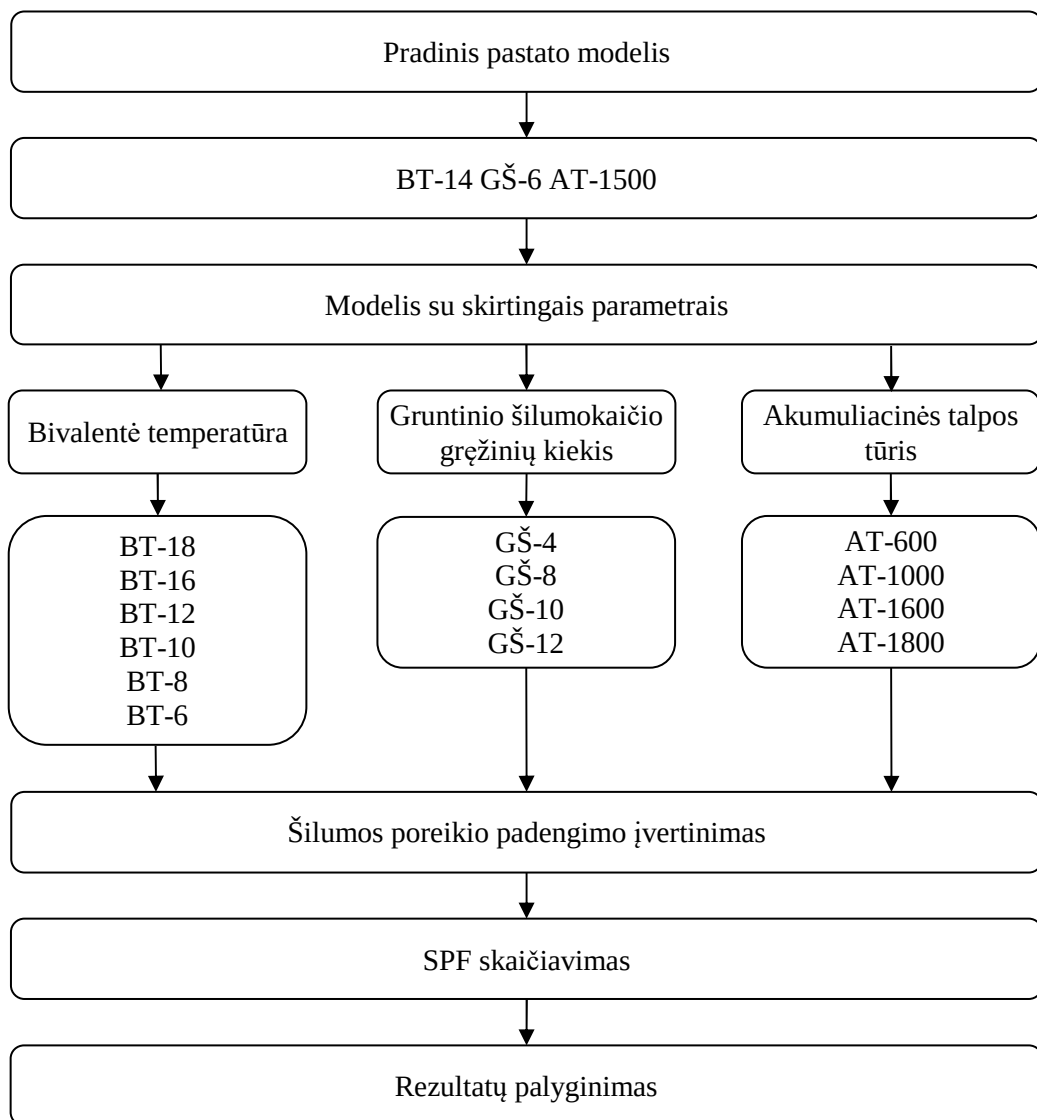
8 lentelė. Gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekis

Žymuo	Gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekis, vnt.	ŠS galia, tenkanti gręžinio ilgio vienetui, W/m
GŠ-4	4	98
GŠ-6 (pradinis)	6	65
GŠ-8	8	49
GŠ-10	10	39
GŠ-12	12	33

9 lentelė. Akumuliacinės talpos tūris

Žymuo	Akumuliacinės talpos tūris, l	ŠS galia, tenkanti talpos tūrio vienetui, l/kW
AT-600	600	13
AT-1000	1 000	22
AT-1500 (pradinis)	1 500	33
AT-1600	1 600	35
AT-1800	1 800	39

Modeliuojant stebėtas ŠS SPF kitimas keturiais laipsniais pažėmus bivalentę temperatūrą ir aštuonių laipsniais padidinus, sumažinus gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį (ilgį) ir palaipsniui didinant iki dvigubo jų kiekio bei sumažinus ir padidinus akumuliacinės talpos tūrį iki praktinio minimalaus ir maksimalaus dydžio. Taip pat įvertintas ir didesnis negu rekomenduojama gręžinių kiekis bei talpos tūris. Bendra skaičiavimų schema pateikiama 19 pav.



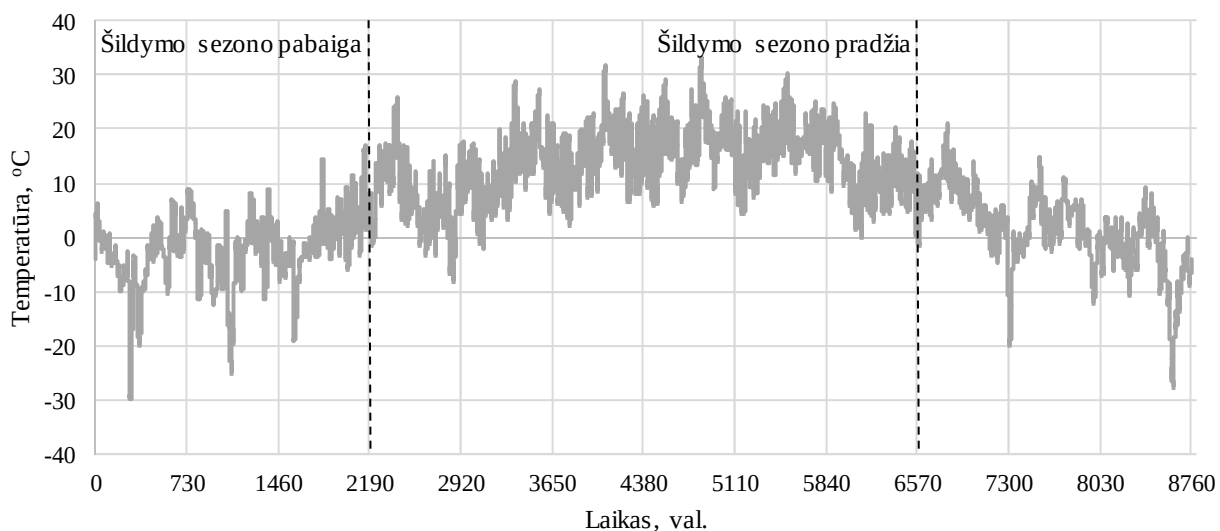
19 pav. Skaičiavimų schema

Skaičiavimais įvertintas vienerių metų laikotarpis (8 760 val.), skaičiavimų žingsnis – 1 min. Vietovė – Vilnius. Pastate palaikoma vidaus oro temperatūra šildymo sezono metu – 20 °C. Kadangi pastatas mažaenergis, priimama prielaida, kad šildymo sezonas prasideda nuo spalio mėnesio pirmos dienos ir tęsiasi iki kovo mėnesio paskutinės dienos (4 368 val.). Pagrindiniai kaupiami skaičiavimų duomenys – išorės oro temperatūra, ŠS pagamintas šilumos kiekis, sunaudotas elektros energijos kiekis ir papildomo šilumos šaltinio pagamintas šilumos kiekis.

5. TYRIMO REZULTATAI

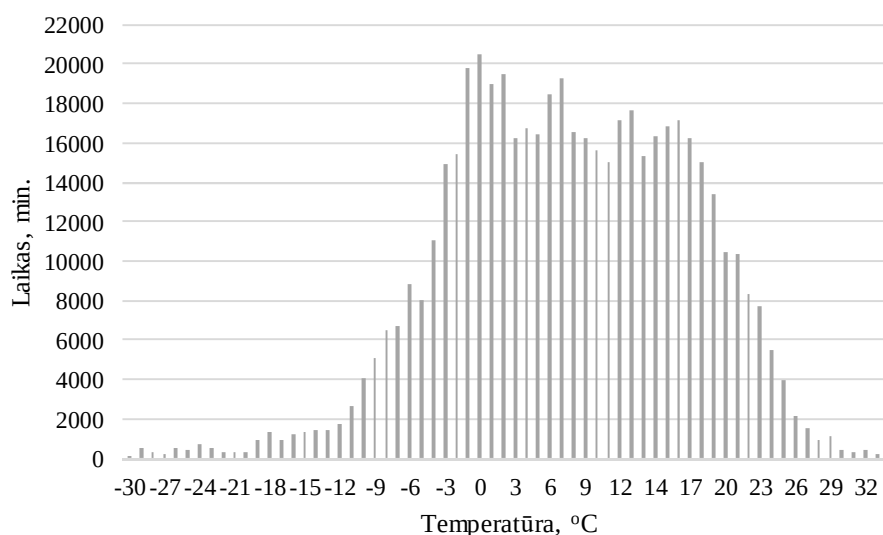
Pagal numatytus realaus objekto parametrus atlikti pradinio pastato ir sistemų modelio skaičiavimai bei septyni skirtingi skaičiavimai keičiant bivalentę temperatūrą, keturi – keičiant gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį (ilgį) ir keturi – keičiant akumuliacinės talpos tūrį. Skaičiavimų metu įvertintas kiekvieno šildymo sezono mėnesio ŠS pagamintas šilumos ir sunaudotos elektros energijos kiekis, pagal kuriuos apskaičiuotas SPF. Taip pat įvertintas papildomo šilumos šaltinio pagamintas šilumos kiekis ir apskaičiuota gruntiniu ŠS dengiama šilumos poreikio dalis. Gauti rezultatai palyginti su pradiniu variantu.

Kompiuterinio modeliavimo skaičiavimų metu vertintas vienerių metų išorės oro temperatūros kitimas pateiktas 20 pav. Skaičiavimų pradžia – sausio mėnuo. Punktyrinėmis linijomis apytiksliai pažymėta šildymo sezono pradžia ir pabaiga.



20 pav. Vienerių metų išorės oro temperatūros kitimas

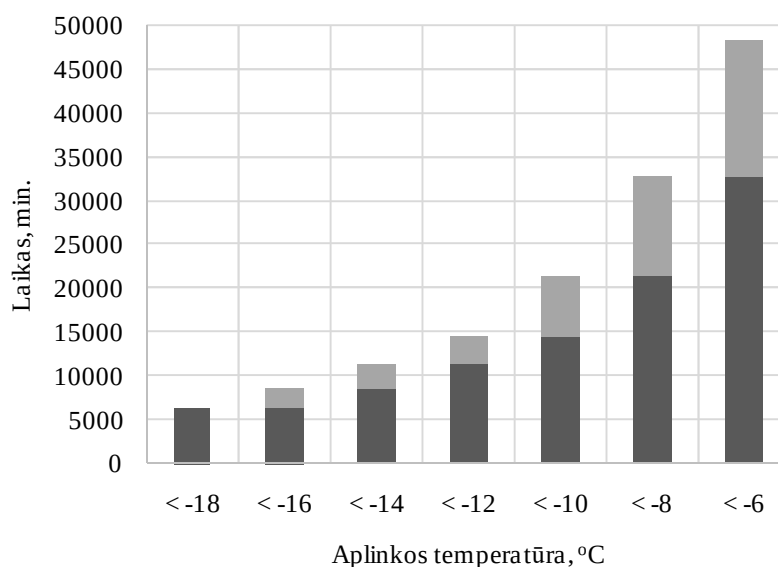
Gautų išorės oro temperatūrų vertės suskirstytos į 64 intervalus (kas 1 °C), kiekvienam temperatūros intervalui priskirtas temperatūros dažnumas, kadangi skaičiavimai atlikti 1 min. žingsniu, dažnumas lygus trukmei minutėmis. Sudaryta išorės oro temperatūrų histograma pateikta 21 pav. Histogramoje pateikiama išorės oro temperatūros trukmė minutėmis.



21 pav. Vienerių metų skirtingų išorės oro temperatūrų trukmė

Remiantis apskaičiuotais duomenimis, dažniausiai arba ilgiausiai trunkanti išorės oro temperatūra vienerių metų laikotarpyje yra apie 0 °C. Bendra tokios temperatūros trukmė – apie 20 546 min. (apie 342 val. arba apie 14 parų). Panašiai trunkančių išorės oro temperatūrų intervalas svyruoja nuo –1 °C iki +2 °C.

Žemesnės aplinkos temperatūros, nei numatyta bivalentė temperatūra, trukmė pateikiama 22 pav. Šviesiau pažymėti stulpeliai rodo trukmės pokytį.



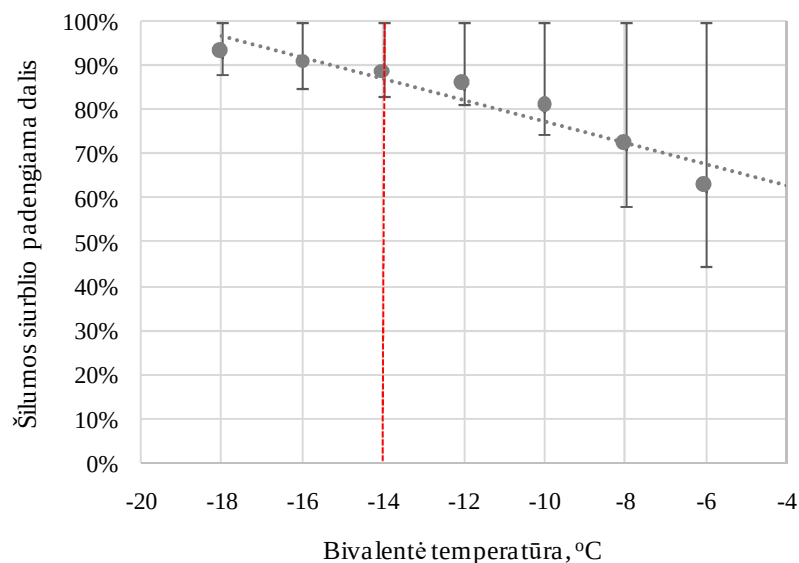
22 pav. Žemesnės už bivalentę temperatūros trukmė

Apskaičiuotais duomenimis ir atsižvelgiant į parinktas bivalentės temperatūros vertes, žemesnė nei –18 °C išorės oro temperatūra trunka apie 6 401 min. (apie 107 val. arba daugiau nei

4 paras) per metus, žemesnė nei $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 8 569 min. (apie 143 val. arba apie 6 paras), žemesnė nei $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 11 410 min. (apie 190 val. arba apie 8 paras), žemesnė nei $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 14 585 min. (apie 243 val. arba apie 10 parų), žemesnė nei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 21 288 min. (apie 355 val. arba apie 15 parų), žemesnė nei $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 32 917 min. (apie 549 val. arba apie 23 paras), žemesnė nei $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 48 430 min. (apie 807 val. arba apie 34 paras).

Didinant bivalentę temperatūrą, t. y. kai aukštėja temperatūra, nuo kurios pastatui šilumą tiekia nebe gruntinis ŠS, o papildomas šilumos šaltinis, nuo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, žemesnės nei bivalentė temperatūra trukmė pailgėja apie 34 %, nuo $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 33 %, nuo $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 28 %, nuo $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 46 %, nuo $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 55 %, nuo $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 47 %. Keičiant temperatūrą nuo $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir nuo -8 iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pastebimas didesnis trukmės pokytis nei keičiant temperatūrą nuo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, nuo $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir nuo $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai reiškia, kad parenkant bivalentę temperatūrą aukštesnę nei $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ženkliau pamažės gruntiniu ŠS padengiama šilumos poreikio dalis.

Gruntiniu ŠS padengiamos šilumos poreikio dalies kitimas, keičiant bivalentę temperatūrą, pateikiamas 23 pav. Šiuo atveju vertikalūs brūkšniai rodo ŠS padengiamos šilumos poreikio dalies intervalą skirtingais šildymo sezono mėnesiais.



23 pav. Gruntiniu šilumos siurbliu padengiama šilumos poreikio dalis, keičiant bivalentę temperatūrą

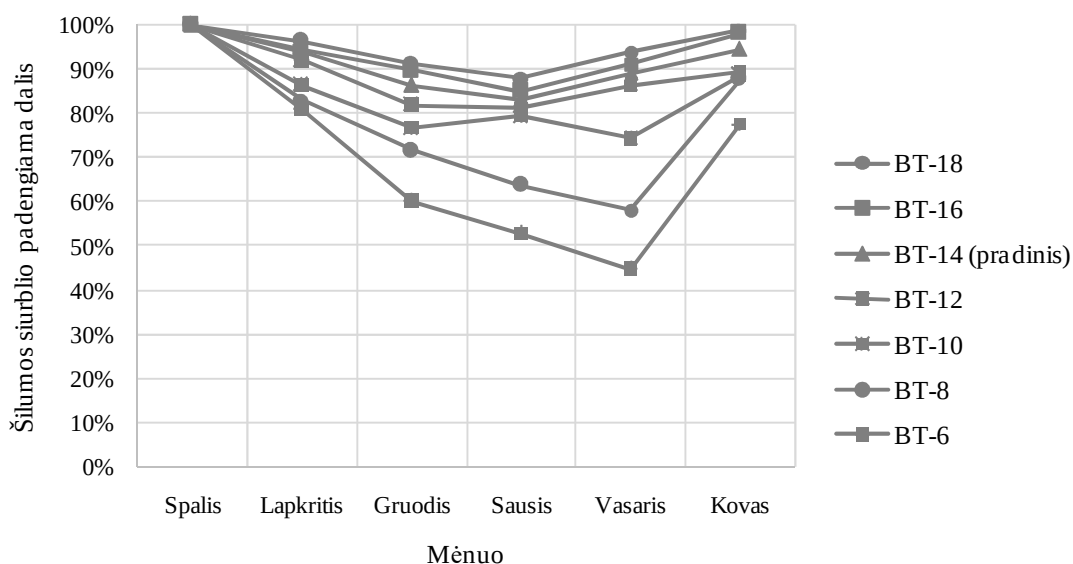
Parinkus aukštesnę bivalentę temperatūrą, gruntiniu ŠS padengiama šilumos poreikio dalis mažėja ir atvirkščiai. Iš gautų rezultatų matyti, kad keičiant bivalentę temperatūrą intervale nuo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, gruntiniu ŠS padengiamos šilumos poreikio dalies pokytis nedidelis, o intervale nuo $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, pokytis didesnis. Taip yra dėl žemesnių, nei numatyta bivalentė, temperatūrų trukmės (22 pav.). Didėjant bivalentei temperatūrai, gruntiniu ŠS padengiamos šilumos poreikio

dalies intervalas skirtingais mėnesiais didėja, kadangi didėja žemesnių nei bivalentė temperatūrų verčių kiekis.

Kai bivalentė temperatūra lygi $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, gruntinis ŠS skirtingais šildymo sezono mėnesiais padengia apie 88–100 % šilumos poreikio, kai $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 85–100 %, kai $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 83–100 %, kai $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 81–100 %, kai $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 74–100 %, kai $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 58–100 %, kai $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 45–100 %.

Vertinant visą šildymo sezoną, kai bivalentė temperatūra lygi $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, gruntinis ŠS padengia apie 93 % šilumos poreikio, kai $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 91 %, kai $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 89 %, kai $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 86 %, kai $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 81 %, kai $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 72 %, kai $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 63 %.

Gruntiniu ŠS padengiamos šilumos poreikio dalies kitimas skirtingais šildymo sezono mėnesiais, keičiant bivalentę temperatūrą, pateikiamas 24 pav.

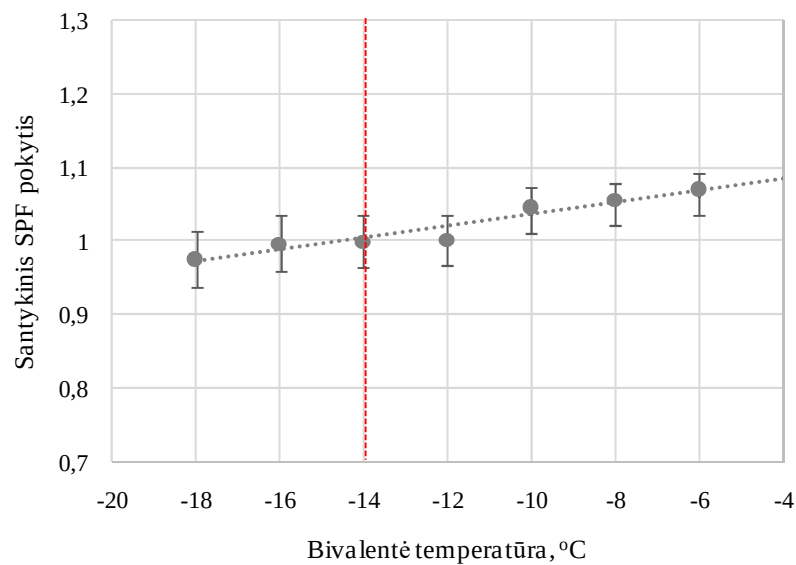


24 pav. Gruntiniu šilumos siurbliu padengiama šilumos poreikio dalis skirtingais mėnesiais

Bivalentei temperatūrai kintant nuo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, pastebimas tolygus gruntiniu ŠS padengiamos šilumos poreikio dalies mažėjimas. Kintant nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, pastebimas didesnis dalies pasikeitimas. Tai priklauso nuo žemesnių, nei numatyta bivalentė, temperatūrų trukmės (22 pav.). Bivalentei temperatūrai kintant nuo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, mažiausia gruntiniu ŠS padengiama šilumos poreikio dalis nustatyta sausio mėnesį, kintant nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – vasario mėnesį. Visais atvejais gruntinis ŠS padengia visą šilumos poreikį šildymo sezono pradžioje – spalio mėnesį. Tai priklauso nuo išorės oro temperatūrų pasiskirstymo skirtingais mėnesiais.

SPF rodiklio pokyčio palyginimas, keičiant bivalentę temperatūrą, pateikiamas 25 pav. Pateikiamas pradinio ir šešių skirtingų variantų SPF rodiklio santykis. Vertikalia punktyrine linija

pažymėtas pradinis variantas. Vertikalūs brūkšniai ties kiekviena santykine SPF verte rodo SPF intervalą skirtingais šildymo sezono mėnesiais.

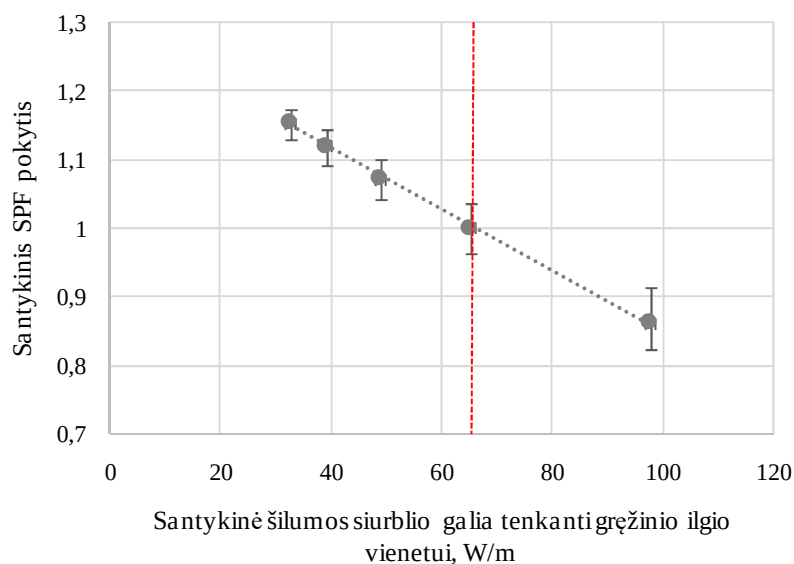


25 pav. SPF pokytis, keičiant bivalentę temperatūrą

Didėjant parinktai bivalentei temperatūrai, SPF didėja ir atvirkščiai. Taip yra dėl mažėjančios arba didėjančios šilumos poreikio dalies ir temperatūrų skirtumų.

Pažeminus bivalentę temperatūrą nuo $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, skirtingais mėnesiais SPF sumažėjo apie 2,04–2,79 %, iki $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 0,02–0,49 %, padidinus iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – padidėjo apie 0,03–0,44 %, iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 3,72–4,91 %, iki $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 4,32–6,93 %, iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 4,88–8,47 %.

SPF rodiklio pokyčio palyginimas, keičiant gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį (ilgį), pateikiamas 26 pav. Pateikiamas pradinio ir keturių skirtingų variantų SPF rodiklio santykis.

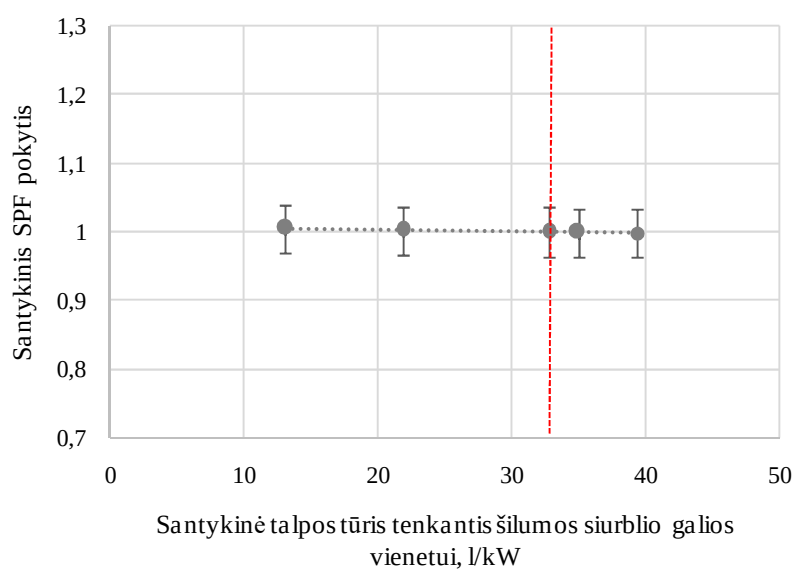


26 pav. SPF pokytis, keičiant gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį (ilgį)

Didėjant gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekiui (ilgiui) arba kai ŠS galios dalis, tenkanti gręžinio ilgio vienetui, mažėja, SPF didėja ir atvirkščiai. Taip yra dėl didėjančio arba mažėjančio šilumokaičio paviršiaus ploto, kuriuo šiluma paimama iš grunto ir tiekama į ŠS.

Sumažinus gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį nuo 6 iki 4, skirtingais mėnesiais SPF sumažėjo apie 11,81–14,75 %, padidinus iki 8 gręžinių – padidėjo apie 6,28–8,11 %, iki 10 – apie 10,49–13,03 %, iki 12 – apie 13,46–17,03 %.

SPF rodiklio pokyčio palyginimas, keičiant akumuliacinės talpos tūrį, pateikiamas 27 pav. Pateikiamas pradinio ir keturių skirtingų variantų SPF rodiklio santykis.



27 pav. SPF pokytis, keičiant akumuliacinės talpos tūrį

Didėjant akumuliacinės talpos tūriui arba kai talpos tūrio dalis, tenkanti ŠS galios vienetui, didėja, SPF mažėja ir atvirkščiais. Taip yra dėl didėjančio arba mažėjančio tūrio, kurį reikia pašildyti.

Sumažinus akumuliacinės talpos tūrį nuo 1 500 l iki 600 l, skirtingais mėnesiais SPF padidėjo apie 0,39–0,58 %, iki 1 000 l – apie 0,20–0,32 %, tūrį padidinus iki 1 600 l SPF sumažėjo apie 0,04–0,07 %, iki 1 800 l – apie 0,13–0,21 %.

Skaičiavimais nustatyta, kad visais atvejais mažiausia SPF rodiklis pasiekiamas gruodžio mėnesį, kai vidutinė mėnesio temperatūra yra apie $-3,74^{\circ}\text{C}$, didžiausias – spalio mėnesio, kai vidutinė mėnesio temperatūra yra apie $+6,60^{\circ}\text{C}$.

Keičiant nagrinėjamosios sistemos parametrus mažiausias SPF nustatytas gruodžio mėnesį, kai gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekis sumažintas iki 4 (rodiklis 13,09 % mažesnis lyginant su pradiniu tą patį mėnesį), didžiausias SPF – spalio mėnesį, kai gręžinių kiekis padidintas iki 12 (rodiklis 13,46 % didesnis lyginant su pradiniu tą patį mėnesį).

Didžiausias neigiamas SPF pokytis nustatytas gręžinių kiekį sumažinus iki 4 gręžinių, didžiausias teigiamas pokytis – padidinus iki 12 gręžinių. Keičiant akumuliacinės talpos tūrį SPF pokytis nežymus ir panašus į pradinį variantą.

Vertinant viso šildymo sezono SPF, nustatyta, kad pažeminus bivalentę temperatūrą, rodiklis sumažėjo apie 0,25–2,52 %, padidinus – padidėjo apie 0,28–6,83 %, sumažinus gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį rodiklis sumažėjo iki 13,86 %, padidinus jų kiekį – padidėjo apie 7,23–15,40 %, sumažinus akumuliacinės talpos tūrį rodiklis padidėjo apie 0,27–0,51 %, padidinus tūrį – sumažėjo apie 0,05–0,18 %.

Pastabėta, kad keičiant bivalentę temperatūrą, gruntiniu ŠS padengiama šilumos poreikio dalis ir SPF rodiklis priklauso nuo žemesnės, nei numatyta bivalentė, temperatūros trukmės, gręžinių kiekį sumažinus dviem gręžiniais SPF pokytis didesnis, nei dviem padidinus, o keičiant akumuliacinės talpos tūrį, pokytis ne toks žymus nei keičiant bivalentę temperatūrą ar gręžinių kiekį.

IŠVADOS

Tyrimė nagrinėjamas pirmasis Lietuvoje mažaenergis visuomeninis pastatas – vaikų lopšelis–darželis Santariškių g., Vilniuje, kurį šiluma aprūpina gruntinis ŠS, veikiantis bivalentčiu režimu kartu su papildomu šilumos šaltiniu.

Remiantis mokslinių tyrimų duomenimis, tyrimė, naudojant kompiuterinio modeliavimo programą TRNSYS, įvertinta skirtingų parametrų – bivalentės temperatūros, gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekio (ilgio) ir akumuliacinės talpos tūrio – įtaka sistemos veikimo efektyvumui.

Nustatyta:

1. Kai nagrinėjamosios sistemos nustatyta bivalentė temperatūra $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, gruntinis ŠS padengia apie 93 % metinio šilumos poreikio, kai $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 91 %, $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 89 %, $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 86 %, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 81 %, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 72 %, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – apie 63 %. Tai priklauso nuo žemesnės, nei numatyta bivalentė, temperatūros trukmės.
2. Pažeminus bivalentę temperatūrą nuo $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, skirtingais šildymo sezono mėnesiais SPF vertė sumažėjo iki 0,1–3 %, padidinus iki $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – padidėjo iki 0,1–9 %. Rodiklio pokytis priklauso nuo žemesnės, nei bivalentė, temperatūros trukmės ir gruntiniu ŠS padengiamos šilumos poreikio dalies.
3. Sumažinus gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį nuo 6 iki 4, skirtingais šildymo sezono mėnesiais SPF vertė sumažėjo iki 12–15 %, padidinus iki 8–12 gręžinių – padidėjo iki 6–17 %. Sumažinus gręžinių kiekį dviem gręžiniais pastebimas žymesnis pokytis negu tiek pat padidinus.
4. Sumažinus akumuliacinės talpos tūrį nuo 1 500 l iki 600–1 000 l, skirtingais šildymo sezono mėnesiais SPF vertė padidėjo iki 0,2–0,6 %, padidinus iki 1 600–1 800 l – sumažėjo iki 0,1–0,2 %. Keičiant tūrį nuo rekomenduojamo intervalo mažiausios vertės iki didžiausios, pastebimas nedidelis pokytis.
5. Pažeminus bivalentę temperatūrą nuo pradinės vertės, bendras šildymo sezono SPF rodiklis sumažėjo iki 0,3–3 %, padidinus – padidėjo iki 0,3–7 %, sumažinus gruntinio šilumokaičio gręžinių kiekį (ilgį), rodiklis sumažėjo iki 14 %, padidinus – padidėjo iki 7–15 %, sumažinus akumuliacinės talpos tūrį, rodiklis padidėjo iki 0,3–0,5 %, padidinus – sumažėjo iki 0,1–0,2 %.
6. Visais atvejais mažiausia SPF vertė pasiekta gruodžio mėnesį, didžiausia – spalį.
7. Didžiausias neigiamas SPF pokytis nustatytas gręžinių kiekį sumažinus iki 4 gręžinių, didžiausias teigiamas pokytis – padidinus iki 12 gręžinių. Keičiant akumuliacinės talpos tūrį SPF pokytis nežymus ir panašus į pradinį variantą.

8. Parinkus aukštesnę bivalentę temperatūrą, SPF didėja, nes padidėja žemesnės, nei bivalentė, temperatūros trukmė ir sumažėja gruntiniu ŠS padengiama šilumos poreikio dalis. Didėjant gręžinių kiekiui (ilgiui), SPF didėja, nes padidėja gruntinio šilumokaičio paviršiaus plotas, kuriuo pasisavinama grunto šiluma. Didėjant akumuliacinės talpos tūriui, SPF mažėja, nes padidėja šilumokaičio tūris, kurį reikia pašildyti.

Atsižvelgiant į gautus rezultatus rekomenduojama:

1. Parenkant bivalentę temperatūrą, svarbu atsižvelgti į žemesnių, nei nustatyta bivalentė, temperatūrų trukmę, nuo to priklauso gruntiniu ŠS padengiama šilumos poreikio dalis ir sistemos veikimo efektyvumas.
2. Parenkant gręžinių ilgį, reikia tiksliai įvertinti pasirinkto ilgio vertę, kadangi skirtingais atvejais iš standarte pateikiamo intervalo parinkus skirtingas vertes gaunami rezultatai su žymiu pokyčiu.
3. Parenkant akumuliacinės talpos tūrį galima remtis numatytu praktiniu intervalu per daug nenukrypstant nuo siekiamo tikslo, kadangi skirtingais atvejais iš numatyto intervalo parinkus skirtingas vertes, gaunami panašūs rezultatai.

LITERATŪRA

- Adomėnaitė, S. 2013. Beveik nulinės energijos visuomeninių pastatų aprūpinimo energija sprendimai. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Alavy, M.; Nguyen, H. V.; Leong, W. H.; Dworkin, S. B. 2013. A methodology and computerized approach for optimizing hybrid ground source heat pump system design, *Renewable Energy* 57: 404–412.
- Bagarella, G.; Lazzarin, R.; Noro, M. 2016. Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings, *Applied Thermal Engineering* 99: 485–494.
- Bartuševičius, E. 2010. Šildymo katilinės efektyvumo didinimas panaudojant šilumos siurblių. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Camdai, U.; Bulut, M.; Sozbir, N. 2015. Numerical modeling of a ground source heat pump: The Bolucase, *Renewable Energy* 83: 352–361.
- Cao, X.; Lei, B.; Yu, N.; Yuan, Y.; Sun, L. 2012. Ground source heat pump system: A review of simulation in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 6814–6822.
- Carvalho, A. C.; Mendrinos, D.; Almeida, A. T. D. 2015. Ground source heat pump carbon emissions and primary energy reduction potential for heating in buildings in Europe – results of a case study in Portugal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 755–768.
- Cong, X.; Guo, Z.; Liu, Y.; Peng, D.; Zhang, C. 2014. A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 851–867.
- Corberin, J. M.; Montagud, C.; Ruiz-Calvo, F. 2013. Experimental and modeling analysis of a ground source heat pump system, *Applied Energy* 109: 328–336.
- Crawly, D. B.; Hand, J. W.; Kummert, M.; Griffith, B. T. 2005. Contrasting The Capabilities Of Building Energy Performance Simulation Programs [interaktyvus]. 2005. U. S. Department of Energy [žiūrėta 2015 gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf>.
- Cui, P.; Fang, Z.; Yang, H. 2010. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems, *Applied Energy* 87: 16–27.
- Cutic, T.; Herkel, S.; Ruschenburg, J. 2014. Validation of a black-box heat pump simulation modeling by means of field test results from five installations, *Energy and Building* 84: 506–515.
- Durig, M.; Glass, A.; Judkoff, R.; Knabe, G.; Le, H. T.; Neymark, J.; Zweifel, G. 2002. Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs, *Energy and Buildings* 34: 917–931.

- Faria, R. N.; Ismail, K. A. R.; Koury, R. N. N.; Machado, L.; Nunes, R. O. 2013. Dynamic modeling and experimental study of an air-water heat pump for residential use, *International Journal of Refrigeration* 36: 674–688.
- Gaigalis, V.; Skema, R.; Marcinauskas, K.; Korsakienė, I. 2016. A review on Heat Pumps implementation in Lithuania in compliance with the National Energy Strategy and EU policy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 841–858.
- Guo, M.; Diao, N.; Man, Y.; Fang, Z. 2016. Research and development of the hybrid ground-coupled heat pump technology in China, *Renewable Energy* 87: 1033–1044.
- Hackel, S.; Pertzborn, A. 2011. Effective design and operation of hybrid ground-source heat pumps: Three case studies, *Energy and Buildings* 43: 3497–3504.
- Henault, B.; Pasquier, P.; Kummert, M. 2016. Financial optimization and design of hybrid ground-coupled heat pump systems, *Applied Thermal Engineering*, 98: 72–82.
- Janulis, R. 2012. Mažo daugiabučio namo atnaujinimas iki beveik nulinės energijos pastato [interaktyvus]. 2012. VGTU [žiūrėta 2015 gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2012~D_20120723_105456-06978/DS.005.0.01.ETD>.
- Januševičius, K. 2013. Saulės kolektorių ir gruntinio šilumos siurblio sistemos mažaelegiam pastatui analizė. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Kharshen, M.; Altorkmany, L.; Al-Khawaja, M.; Hassani, F. 2015. Analysis of the effect of global climate change on ground source heat pump systems in different climate categories, *Renewable Energy* 78: 219–225.
- Kim, E.; Lee, J.; Jeong, Y.; Hwang, Y.; Lee, S.; Park, N. 2012. Performance evaluation under the actual operating condition of a vertical ground source heat pump system in a school building, *Energy and Buildings* 50: 1–6.
- Klein, K.; Huchtemann, K.; Muller, D. 2014. Numerical study on hybrid heat pump systems in existing buildings, *Energy and Buildings* 69: 193–201.
- Naldi, C.; Morini, L. G.; Zanchini, E. 2014. A method for the choice of the optimal balance-point temperature of air-to-water heat pumps for heating, *Sustainable Cities and Society* 12: 85–91.
- Nam, Y.; Chae, H. B. 2014. Numerical simulation for the optimum design of ground source heat pump system using building foundation as horizontal heat exchanger, *Energy* 73: 933–942.
- Narkevičiūtė, J. 2010. Eksperimentinis šilumos siurblio darbo režimų tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Nguyn, H. V.; Law, Y. L. E.; Alavy, M.; Walsh, P. R.; Leong, W. H.; Dwoekin, S. B. 2014. Analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America, *Applied Energy* 125: 28–38.

- Pakalka, S. 2010. Šilumos siurblio efektyvumo analizė. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Retkowski, W.; Ziefke, G.; Thoming, J. 2015. Evaluation of different heat extraction strategies for shallow vertical ground-source heat pump systems, *Applied Energy* 149: 259–271.
- Saebu, I.; Sebarchievici, C. 2014. General review of ground-source heat pumps systems for heating and cooling of buildings, *Energy and Buildings* 70: 441–454.
- Safa, A. A.; Fung, A. A.; Kumar, R. 2015. Heating and cooling performance characterization of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation, *Renewable Energy* 83: 565–575.
- Safa, A. A.; Fung, A. S.; Kumar, R. 2015. Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses, *Applied Thermal Engineering* 81: 279–287.
- Sivasakthivel, T.; Murugesan, K.; Sahoo, P. K. 2014. Optimization of ground heat exchanger parameters of ground source heat pump system for space heating applications, *Energy* 78: 573–586.
- Sklepovič, V. 2012. Realių šilumos siurblio darbo režimų tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Sousa, J. 2013. Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison [interaktyvus]. 2013. CEUR Workshop Proceedings [žiūrėta 2015 gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://ceur-ws.org/Vol-923/paper08.pdf>>.
- Subačiūtė, I. 2012. Mažaenergio administracinio pastato sezoninės energijos poreikių ypatybės. Baigiamasis magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- You, T.; Wang, B.; Wu, W.; Shi, W.; Li, X. 2015. Performance analysis of hybrid ground-coupled heat pump system with multifunctions, *Energy Conversion and Management* 92: 47–59.
- Zarrella, A.; Emmi, G.; Carli, M. D. 2015. Analysis of operating models of a ground source heat pump with short helical heat exchangers, *Energy Conversion and Management* 97: 351–361.
- Zhai, X. Q.; Qu, M.; Yu, X.; Yang, Y.; Wang, R. Z. 2011. A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3133–3140.
- Martinaitis, V. Techninė termodinamika. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2003. 164 p.
- Aplinkos ministerija [interaktyvus]. 2011. Aplinkos ministerija [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.am.lt/VI/files/0.399491001352106171.pdf>>.
- Eksperimento ir modeliavimo schema* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2015 sausio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2005~D_2005_0622_091209-66099/DS.005.0.01.ETD>.

Energinis efektyvumas [interaktyvus]. 2012. Juozas Ramanauskas [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://energinisefektyvumas.lt/wp-content/uploads/2012/12/Energetinio-efektyvumo-i_kiai-JR-12-10.pdf>.

Energinis sertifikavimas [interaktyvus]. 2014. Energinis sertifikavimas [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://energinissertifikavimas.lt/siltu-namu-projektavimas>>.

Energy Simulation [interaktyvus]. 2011. U. S. Department of Energy [žiūrėta 2015 gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/subjects.cfm/pagename=subjects/pagename_menu=whole_building_analysis/pagename_submenu=energy_simulation>.

Kompiuterinis modeliavimas [interaktyvus]. 2010. [žiūrėta 2014 lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://mokslasplius.lt/rizikos-fizika/kompiuterinis-modeliavimas>>.

KTU [interaktyvus]. 2011. Aplinkos ministerija [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.am.lt/VI/files/0.852734001293441548.pdf>>.

Mažaenergiai pastatai [interaktyvus]. 2015. VGTU [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.vgtu.lt/universitetas/vgtu-inovacijos/inovacijos/vgtu-mokslininkai-miestu-ateitis-energija-pasigaminantys-namai/32330?nid=69441><http://www.pastatu-sertifikavimas.lt/placiau.html>>.

Modeliavimas [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2015 sausio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<http://ims.mii.lt/ims/%C5%BEodynai/term/m/modeliavimas.html>>.

Pastatų sertifikavimas [interaktyvus]. 2013. Pastatų sertifikavimas [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.pastatu-sertifikavimas.lt/placiau.html>>.

Santariškių vaikų lopšelis–darželis [interaktyvus]. 2015. 15min.lt [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.15min.lt/naujiena/aktualu/vilniaus-zinios/santariskiu-darzelyje-vieno-kv-m-patalpu-sildymas-kainuoja-maziau-nei-eura-per-metus-793-484178>>.

Santariškių vaikų lopšelis–darželis sprendiniai [interaktyvus]. 2015. Statybas ir architektūra [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://sa.lt/energiskai-efektyvus-vaiku-darzelis/>>.

Šilumos siurblio istorija [interaktyvus]. 2009. VGTU [žiūrėta 2015 m. spalio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2009~D_20090611_181315-87002/DS.005.0.01.ETD>.

Šilumos siurblių panaudojimas [interaktyvus]. 2010. Nuo pamatų [žiūrėta 2015 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.nuopamatu.lt/renkames-iranga/sildymo-sistemas/132-kas-yra-silumos-siurbLIAI>>.

Šilumos siurblių režimai [interaktyvus]. 2015. Altherma [žiūrėta 2015 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.daikra.com/images/default/source/attachments/altherma.pdf>>.

Šilumos siurblių tipai [interaktyvus]. 2015. Lietuvos šilumos siurblių asociacija [žiūrėta 2015 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.lietssa.lt/apie-asociacija>>.

Šilumos siurblys [interaktyvus]. 2012. VGTU [žiūrėta 2014 m. spalio 26 d.]. Prieiga per internetą:<http://www.mla.vgtu.lt/index.php/mla/article/viewFile/mla.2012.79/pdf_1>.

TRNSYS [interaktyvus]. 2015. TRNSYS [žiūrėta 2014 m. sausio 22 d.]. Prieiga per internetą:<<http://www.trnsys.com/>>.

TRNSYS aprašymas [interaktyvus]. 2005. VGTU [žiūrėta 2014 m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą:<http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2005~D_20050613_084147-71403/DS.005.0.02.ETD>.

VĮ Energetikos agentūra [interaktyvus]. 2012. Tadas Norvydas [žiūrėta 2015 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://paramaverslui.eu/wp-content/uploads/2015/04/ES-EVE-ir-AEI-Tado-Norvydo.pdf>>.

Stiebel Eltron. Planung und installation. Wärmepumpen. 2009.

LST EN 15316-4-2:2008 Pastatų šildymo sistemos. Sistemos energijos poreikio ir sistemos našumo skaičiavimo metodas. 4-2 dalis. Patalpoms šildyti skirtos šilumos gamybos sistemos, šilumos siurblių sistemos. Vilnius, 2007.

LST EN 15450:2008 Pastatų šildymo sistemos. Šildymo sistemų su šilumos siurbliais projektavimas. Vilnius, 2008.

STR 2.01.09 2012 Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas. Vilnius, 2012.