



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Grindinio šildymo sistemos techninių parametru įtaka sistemos veikimo rodikliams**

Magistro baigiamasis projektas

---

**Tadas Valionis**  
Projekto autorius

**doc. Jurgita Černeckienė**  
Vadovė

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Grindinio šildymo sistemos techninių parametru įtaka sistemos veikimo rodikliams**

Magistro baigiamasis projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

---

**Tadas Valionis**

Projekto autorius

**doc. Jurgita Černeckienė**

Vadovė

**doc. Laura Stasiulienė**

Recenzentė

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Tadas Valionis

## **Grindinio šildymo sistemos techninių parametru įtaka sistemos veikimo rodikliams**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tadas Valionis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

**Studijų programa:** \_\_\_\_\_ Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai \_\_\_\_\_

**Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):**

Įvairių šildymo sistemų tipų ir techninių parametru įtakos žmonių pasitenkinimui šilumine aplinkai bei pastato energiniam efektyvumui tyrimas

**Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanı potvarkiu Nr.:** ST18-F-09-1

**(lietuvių k.):** Grindinio šildymo sistemos techninių parametru įtaka sistemos veikimo rodikliams

**(anglų k.):** Heated floor system technical parameter impact on the systems operation indexes

**Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):**

**Baigiamojo projekto dalys:**

	<b>Atlikti</b>
Įvadas	<b>x</b>
Literatūros apžvalga	<b>x</b>
Metodologija	<b>x</b>
Eksperimentiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<b>x</b>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	<b>x</b>

**Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:**

Konsultacijų laikas 17:00-17:30 val. pirmadieniais.

**Vadovas:** \_\_\_\_\_ doc. Jurgita Černeckienė \_\_\_\_\_  
(indėlis 100 %) \_\_\_\_\_ *pareigos, vardas, pavardė* \_\_\_\_\_ *parašas*

**Studentas:** \_\_\_\_\_ Tadas Valionis \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ *vardas, pavardė* \_\_\_\_\_ *parašas*  
*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Valionis, Tadas. Grindinio šildymo sistemos techninių parametų įtaka sistemos veikimo rodikliams. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovė doc. Jurgita Černeckienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptių grupė: inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: pulsuojančias šilumnešio srautas, grindinis šildymas.

Kaunas, 2022. 47 p.

### **Santrauka**

Vienas iš svarbiausių grindinio šildymo sistemos efektyvumą nulemiančių faktorių yra šilumnešio srautas. Pagal atliktą literatūros analizę nustatyta, kad pulsuojančias šilumnešio srautas gali turėti reikšmingą poveikį šildymo prietaiso šilumos perdavimo koeficientui. Taip pat literatūroje teigiama, jog šio srauto tekėjimo greitis yra reikšmingas sukurtos šilumnešio pulsacijos poveikio dydžiui vertinant šildymo sistemos efektyvumą. Šilumnešio srautui tekant laminariu arba neapibrėžtu režimu pastebimas didžiausias pulsacijos poveikis, o srautui tekant vis didesniu greičiu (turbulentiniu režimu) poveikis proporcingai silpnėja. Atliktame analitiniame tyrime naudojantis COMSOL Multiphysics programine įranga nustatytas 5,8 % vamzdžio šiluminio laidumo padidėjimas, tačiau grindų paviršiaus temperatūros pokytis nepastebėtas lyginant su pastovaus šilumnešio srauto tyrimu, dėl galimai per trumpos tyrimo simuliacijos trukmės. Naudojant pirmame tyrime gautus rezultatus, atliktas pulsuojančio šilumnešio srauto poveikio šildymo sąnaudoms tyrimas administracinės paskirties pastatui, naudojant EQUA IDA-ICE programine įranga. Atlikus tyrimą, nustatytas didžiausias energijos sutaupymas lygus 3 %, kai buvo naudojamas 65 mm užpilamo betono sluoksnio storis ir 50 °C. Remiantis abiem atliktais tyrimais nustatyta, jog pulsuojančio šilumnešio srauto technologija nėra efektyvi naudojant šildymo prietaisus paremtus šiluminio laidumo principu. Tolimesnius pulsuojančio šilumnešio srauto tyrimus verta atlikti su šildymo prietaisais, kurie remiasi konvekcija kaip pagrindiniu šilumos atidavimo būdu.

Valionis, Tadas. Influence of Underfloor Heating System Technical Parameters on System Performance. Master's Final Degree / supervisor doc. Jurgita Černeckienė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field group: Engineering Sciences.

Keywords: pulsed flow, hydronic floor heating.

Kaunas, 2022. 47 p.

### **Summary**

One of the most important factors for hydronic floor heating system efficiency is heated flow medium. According to the literature analysis it was concluded that pulsed flow can have a substantial effect on the heat transfer coefficient of the heating device. Also, it has been observed that flow velocity is an important factor for the effect created by pulsed flow on the heat transfer effectiveness. When the flow is in laminar or undefined state, the biggest pulsed flow effects can be observed, although when the flow velocity increases, and it becomes turbulent the pulsed flow effect slowly disappears. The study on pulsed flow in hydronic floor heating system was simulated using COMSOL Multiphysics software. The results indicated 5.8 % increase in heat flow rate in the pipe, although the heated floor surface temperature had not increased significantly compared to the steady flow solution. While using the results of the first study, a study on pulsed flow use in hydronic floor heating system in an office building has been conducted using EQUA IDA-ICE software. The biggest difference in energy consumption when comparing pulsed and steady flows was 3 %, when screed thickness was set to 65 mm and heated flow medium temperature to 50 °C. Based on these studies a conclusion has been made that pulsed flow technology is not effective in heating devices that use conduction as the main source of heat transfer. In further research of pulsed medium flow, it is advised to use heating devices that use convection as the main source of heat transfer.

## Turinys

<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>6</b>
<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Santrumpos .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>12</b>
1.1. Programinės įrangos palyginimas.....	12
1.1.1. Ansys Fluent.....	12
1.1.2. COMSOL Multiphysics.....	13
1.1.3. EQUA IDA-ICE .....	15
1.2. Faktoriai nulemiantys grindinio šildymo sistemos inertiškumą.....	17
1.2.1. Šildomų grindų konstrukcijos tipai .....	17
1.2.2. Vamzdžių išdėliojimo žingsnio dydis .....	19
1.2.3. Užpilamo betono sluoksnio storis .....	19
1.2.4. Šilumnešio temperatūra .....	20
1.2.5. Vamzdžio konstrukcinė medžiaga.....	21
1.3. Pulsuojančio srauto technologija.....	23
1.3.1. Veikimo principas .....	23
1.3.2. Technologijos pritaikymas .....	25
1.3.3. Pulsacijos parametrai.....	26
1.3.4. Taikymas pastatų šildyme .....	27
1.3.5. Pulsuojančio srauto poveikis šildymo prietaiso pasipriešinimui.....	28
<b>2. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>30</b>
2.1. Pulsuojančio ir pastovaus šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos parametrų tyrimas baigtinių elementų metodu .....	30
2.1.1. Tyrimo objektas.....	30
2.1.2. Tyrimo metodologija .....	34
2.1.3. Rezultatų palyginimas .....	36
2.2. Pastovaus ir pulsuojančio šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos energetinių parametrų tyrimas baigtinių elementų metodu .....	39
2.2.1. Tyrimo objektas.....	39
2.2.2. Tyrimo metodologija .....	40
2.2.3. Tyrimo rezultatai taikant pastovų šilumnešio srautą.....	41
2.2.4. Tyrimo rezultatai taikant pulsujantį šilumnešio srautą.....	41
2.2.5. Rezultatų palyginimas .....	42
<b>Diskusija .....</b>	<b>43</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>44</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>45</b>

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Ansys Fluent programinės įrangos vartotojo sąsaja prieinama per internetinę aplikaciją [9].	13
<b>2 pav.</b> COMSOL Multiphysics programinės įrangos vartotojo sąsaja [12].	14
<b>3 pav.</b> EQUA IDA-ICE programinės įrangos vartotojo sąsaja [15].	16
<b>4 pav.</b> Sauso tipo grindinio šildymo sistemos konstrukcija [19].	18
<b>5 pav.</b> Šlapio tipo grindinio šildymo sistemos konstrukcija [19].	18
<b>6 pav.</b> Vidutinė grindų temperatūra įrengiant vamzdyną skirtingais žingsnių dydžiais grindų įšilimo metu [25].	19
<b>7 pav.</b> Laboratorija ir įranga naudota tyrime [25].	20
<b>8 pav.</b> Vidutinė grindų paviršiaus temperatūra skirtingiems užpilamo betono sluoksnio storiams grindų įšilimo metu [25].	20
<b>9 pav.</b> Vidutinė grindų temperatūra, tiekiant skirtingos temperatūros šilumnešį grindų įšilimo metu [25].	21
<b>10 pav.</b> Oro temperatūros pokytis per laiką, naudojant vamzdžius iš skirtingų medžiagų [27].	22
<b>11 pav.</b> Vandens siurblys su periferiniu mechanizmu (kairėje) ir su centriniu mechanizmu (dešinėje) [30].	24
<b>12 pav.</b> Vieno takto stūmoklinio vandens siurblio veikimo principas skysčio įtraukimo metu [31].	24
<b>13 pav.</b> Vieno takto stūmoklinio vandens siurblio veikimo principas skysčio išstūmimo metu [31].	25
<b>14 pav.</b> Dviejų taktų vandens siurblio veikimo principas [31].	25
<b>15 pav.</b> Tyrimo šilumos mainų schema [4].	27
<b>16 pav.</b> Paviršiaus temperatūros pasiskirstymas naudojant pastovų srautą (a) 10 tipo ir (b) 11 tipo radiatoriuose [2].	27
<b>17 pav.</b> Paviršiaus temperatūros pasiskirstymas naudojant pulsuojantį srautą (a) 10 tipo ir (b) 11 tipo radiatoriuose [2].	28
<b>18 pav.</b> Skysčio temperatūra, kai Reinoldso skaičius yra žemas (a) ir kai Reinoldso skaičius yra aukštas (b).	29
<b>19 pav.</b> Paviršių tipai naudojami tyrime [35].	29
<b>20 pav.</b> Tyrimo objekto 3D vizualizacija COMSOL Multiphysics programinės įrangos aplinkoje.	30
<b>21 pav.</b> Tyrimo objekto grindų konstrukcijos sluoksnių numeracija COMSOL Multiphysics programinės įrangos aplinkoje.	31
<b>22 pav.</b> Sinusoidinė pulsacijos lygtis naudojama tyrime tekant pulsuojančiam šilumnešio srautui.	34
<b>23 pav.</b> Vamzdžio vidaus ir išorės paviršiaus temperatūros naudojant pastovų ir pulsuojantį šilumnešio srautą.	36
<b>24 pav.</b> Vamzdžio skleidžiama šiluminė galia naudojant pastovų ir pulsuojantį šilumnešio srautą.	37
<b>25 pav.</b> Vamzdžio vidaus paviršiaus šilumos srauto tankis naudojant pastovų ir pulsuojantį šilumnešio srautą.	38
<b>26 pav.</b> Tiriamo pastato 3D vizualizacija EQUA IDA-ICE programinės įrangos aplinkoje.	39



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Sumodeliuotos grindų konstrukcijos sluoksnių parametrai.....	31
<b>2 lentelė.</b> Šilumnešio parametrai naudojami tyrime.....	33
<b>3 lentelė.</b> Tiriama pastato geometriniai duomenys. ....	39
<b>4 lentelė.</b> Tiriama pastato konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai ir storiai. ....	40
<b>5 lentelė.</b> Tyrimo alternatyvos. ....	40

## Santrumpos

CFD – skaitinė fluidų dinamika (angl. – *computational fluid dynamics*);

IFC – duomenų mainų standartas architektūros, statybos ir inžinerijos industrijoms (angl. – *Industry Foundation Classes*);

PE-X – polietileninis vamzdis su metaliniais sujungimais;

PID – valdiklio tipas, kuris gavęs grįžtamąjį ryšį iš sistemos optimizuoja sistemos valdymą naudodamas tris grandis – proporcinę, integruojančią ir diferencijuojančią. Plačiai naudojamas pramonėje bei pastatų šildymo sistemose;

PMV – rodiklis apibūdinantis numatomą vidutinį šiluminio komforto vertinimą (angl. – *Predicted Mean Vote*)

PPD – rodiklis apibūdinantis nepatenkintųjų patalpų šiluminiu komfortu procentą (angl. – *Predicted Percentage Dissatisfied*)

STR – statybos techninis reglamentas;

XPS – ekstruzinis polistireninis putplastis.

## Įvadas

Ar dar galima patobulinti grindinio šildymo sistemą? Ši sistema pasižymi tolygiu šilumos atidavimu, energetiniu efektyvumu, tylumu ir labai mažomis eksploataavimo išlaidomis. Tačiau sistema yra itin inertiška dėl didelės šiluminės masės, kuri atsiranda iš grindų konstrukcijos. Komforto atžvilgiu tai yra puiki šildymo sistemos savybė, tačiau energetiniu ją dar galima tobulinti. Prisitaikant prie kintančių oro sąlygų sistemai pradėjus veikti, įprastai šilumnešis yra tiekiamas iki kol patalpos oro temperatūra pasiekia nustatytą. Pasiekus šią vertę grindų masė būna perkaitinta ir sistema toliau atidavinėja šilumą. Tokią problemą galima spręsti didinant grindinio šildymo sistemos šilumos perdavimo koeficientą tarp vamzdžio ir šilumnešio. Šį efektą galima pasiekti didinant srauto turbulentiškumą, dėl kurio mažėja vamzdžio sienelės pasipriešinimo koeficientas. Turbulentiškumas vandens sraute gali būti padidintas didinant šilumnešio srautą arba mechaniškai sukeltą pulsaciją. Srauto didinimas tuo pačiu didina sistemos šiluminės energijos sąnaudas. Tačiau pulsacija gali būti sukelta su minimaliomis elektros energijos sąnaudomis naudojant stūmoklinį arba diafragminį šilumnešio siurbį. Remiantis šiuo principu pradėtas tirti pulsuojančio šilumnešio srauto tiekimas į šildymo sistemas. Didinant suminį šilumos perdavimo koeficientą sistemoje galima padidinti jos šiluminę talpą [1]. Šiuo metu jau yra atlikta keletas tyrimų naudojant pulsuojančio šilumnešio srautą sistemose su radiatoriais kaip šilumos atidavimo prietaisais. Tyrėjai iš Birmingamo universiteto teigia, kad naudojantis šia technologija galimas suminės energijos sutaupymas iki 22 %, o naudojant PID sistemos valdiklį – iki 27 % [2], [3], [4].

Šiame tyrime yra analizuojama pulsuojančio šilumnešio srauto įtaka grindinio šildymo sistemos parametrams. Tyrime lyginamos skirtingų skaitinės fluidų dinamikos analizės programų galimybės ir limitai, įsigilinama į pulsuojančio srauto praktiką ir teoriją, nustatomi faktoriai, nulemiantys sistemos inertiškumą ir išanalizuojama kokias pulsacijos dažnio ir amplitudės vertes naudoti būtų efektyviausia. Atlikus tyrimą įvertinamos ir palyginamos sistemos šilumos perdavimo koeficiento, šilumos išsiskyrimo ir šilumos pasiskirstymo tankio vertės tarp pulsuojančio ir tolygaus šilumnešio srauto sistemų. Taip pat, kad geriau vizualizuoti rezultatus atliekamas tyrimas, kai pastato grindinio šildymo sistemai yra pritaikomas padidintas šilumos perdavimo koeficientas pagal vertę gautą iš anksčiau atlikto tyrimo.

**Darbo tikslas** – skaitiniu būdu ištirti pastovaus ir pulsuojančio šilumnešio srauto tiekimo į grindinio šildymo kontūrą parametrus.

### **Pagrindiniai darbo uždaviniai:**

- Atlikti tyrimui reikalingos literatūros analizę ;
- Ištirti pastovaus šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos parametrus naudojantis COMSOL Multiphysics CFD programine įranga;
- Ištirti pulsuojančio šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos parametrus naudojantis COMSOL Multiphysics CFD programine įranga;
- Ištirti pastovaus šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos energetinius parametrus naudojantis EQUA IDA-ICE programine įranga;
- Ištirti pulsuojančio šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos energetinius parametrus naudojantis EQUA IDA-ICE programine įranga.

## 1. Literatūros apžvalga

Šia literatūros analize siekiama apžvelgti mokslinius tyrimus, kuriuose yra informacijos reikalingos baigiamajam projektui atlikti. Palyginamos skirtingos skaitinės fluidų dinamikos modeliavimo programinės įrangos galimybės ir limitai, siekiant nuspręsti kuri prieinama programinė įranga yra tinkamiausia tyrimui atlikti. Apžvelgiami sistemos inertiškumą nulemiantys faktoriai. Taip pat gilinamasi tiek į praktinę, tiek į teorinę pulsuojančio srauto technologijos dalis, analizuojama kuo remiamasi nustatant pulsacijos dažnio ir amplitudės vertes.

### 1.1. Programinės įrangos palyginimas

Pasirinkti tinkamus įrankius darbui yra vienas svarbiausių tyrimo etapų. Teksto tvarkymui naudojama Microsoft Word<sup>1</sup> programinė įranga, o tyrimų rezultatų apdorojimui Microsoft Excel<sup>2</sup> [5, 6]. Tam, kad atlikti numatytus tyrimus programinė įranga turi būti tinkama vertinti skysčio tekėjimą, šilumos perdavimą skystos ir kietos agregatinių būsenų medžiagose, taip pat atskira programinė įranga kuria naudojantis galima įvertinti energines sąnaudas esant pulsuojančio šilumnešio srauto sukurtam efektui. Į palyginimą įtrauktos programos legaliai prieinamos studentams bei galinčios atlikti anksčiau nurodytas užduotis.

#### 1.1.1. Ansys Fluent

Ansys Fluent<sup>3</sup> – tai skaičiuojamajai fluidų dinamikai tirti skirta programinė įranga, kuria galima tirti fluidų tekėjimą įvairiais režimais bei jų šilumos perdavimą tarp skystos ir kietos fazių medžiagų. Ši programa dažniausiai naudojama pramonėje kylančioms problemoms, susijusioms su fluidų tekėjimo ypatybėmis per kliūtis ir jų keliamu pasipriešinimu, aušinimo ir šildymo sistemų efektyvumu, spręsti [7, 8].

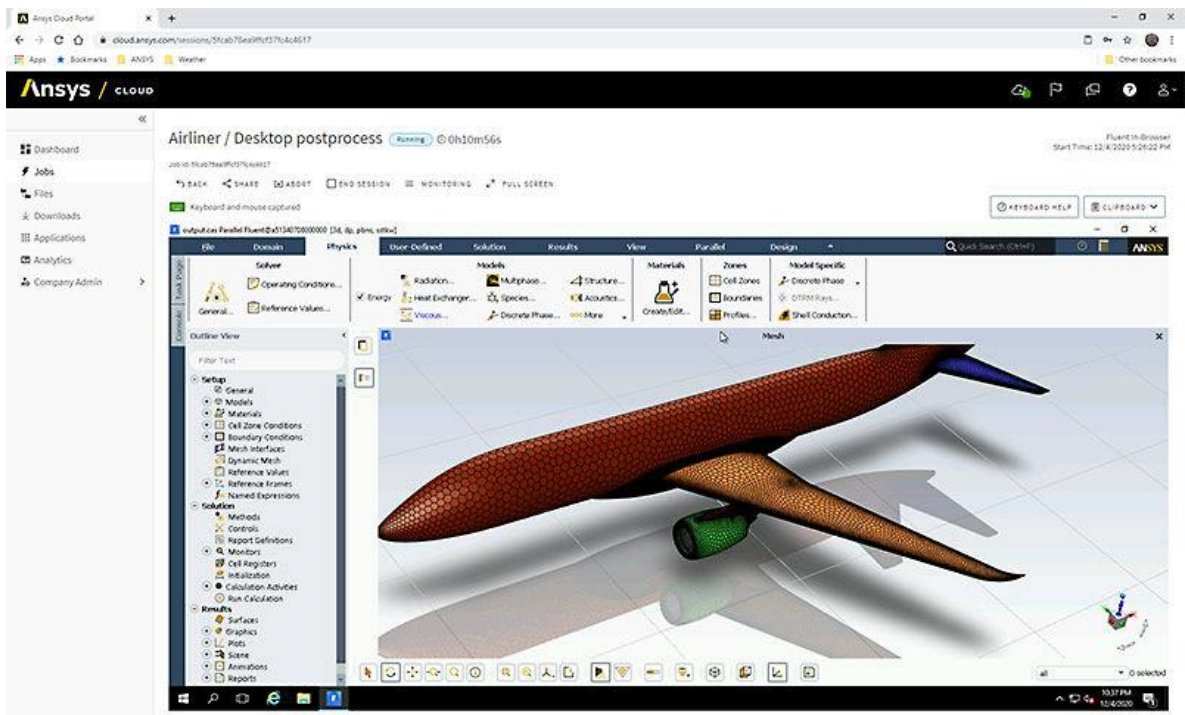
Ji yra itin efektyvi spręsti užduotims, reikalaujančioms didelio tikslumo ir greičio esant nekintančioms tyrimo sąlygoms. Simuliacijos yra optimizuotos vertinti tik tai, kas svarbiausia praktikoje naujų produktų vystyme ar egzistuojančių optimizavime. Paprastai ir sparčiai galima keisti tyrimo geometriją nekeičiant sprendimo būdų. Ši programinė įranga nėra visapusiškai tinkama spręsti užduotims, kuriose naudojamos naujai taikomos technologijos, sprendžiami ne itin praktiški uždaviniai ar ieškoma neatrastų tendencijų. Atsiradus tokioms problemoms, jų sprendimo greitis ir tikslumas ženkliai mažėja, kartais susiduriama ir su galimybių apribojimais.

---

<sup>1</sup> Microsoft Corp. Word [programinė įranga]. 2021 gruodžio 16 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/word>

<sup>2</sup> Microsoft Corp. Excel [programinė įranga]. 2021 gruodžio 16 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>

<sup>3</sup> Ansys Inc. Ansys [programinė įranga]. 2021 liepos 20 [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.ansys.com/>



1 pav. Ansys Fluent programinės įrangos vartotojo sąsaja prieinama per internetinę aplikaciją [9].

Naujausios Ansys Fluent versijos (Ansys 2021 R2 ver.) vartotojo sąsaja (žr. 1 pav.) lyginant su COMSOL Multiphysics programine įranga yra panašios. Tačiau ši sąsaja reikalauja nestandartines tyrimo sąlygas užduoti per tekstinę sąsają.

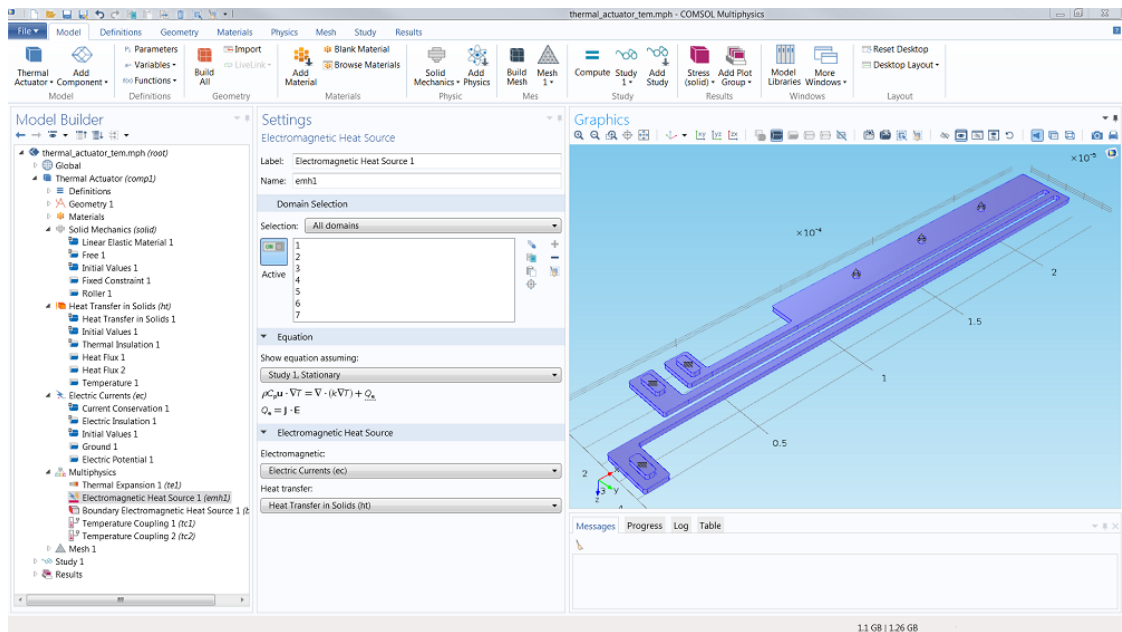
Šios programinės įrangos pagrindinis apribojimas yra kintančios užduoties sąlygos, ypač joms kintant neharmoniskai arba dideliu dažniu. Nors tokias užduoties sąlygas nustatyti galimybė yra, tačiau sprendimas tampa itin nestabilus ir netikslus. Šiuo atveju būtų naudinga pritaikyti sprendimo būdą stabilumui ir tikslumui padidinti, tačiau apie tai pateikta labai mažai pagalbinės medžiagos ir tokios sprendimo būdų korekcijos reikalauja stiprių programinės įrangos žinių.

### 1.1.2. COMSOL Multiphysics

Tai programinė įranga skirta skirtingų dizainų, įrenginių ir procesų simuliacijai atliekant inžinerinius, pramoninius ar mokslinius tyrimus. COMSOL<sup>4</sup> išsiskiria tuo, jog leidžia iš anksto apjungti skirtingus fizikos reiškinius ir efektyviai spręsti juos vienu metu. Jau iš anksto numatyta, nesudėtinga darbo eiga leidžia aiškiai apibūdinti problemą ir pereiti prie jos sprendimo būdų [10, 11].

Simuliacijoms naudojamų sprendimo būdų pasirinkimas yra itin platus. Sprendžiant uždavinius yra suteikiami įrankiai pačiam vartotojui adaptuoti sprendimo būdą prie individualios užduoties. Tai yra labai svarbu atliekant mokslinius tyrimus. Programinė įranga neapribota spręsti tik skaitinės fluidų dinamikos užduotis, bet turi platų tyrimų modulių pasirinkimą padedančių tirti: skysčių tekėjimą ir šilumos perdavimą, konstrukcinius mechanizmus ir akustiką, cheminius ir elektromagnetinius reiškinius. Kiekvienas iš šių modulių gali būti apjungtas su kitu, tokiu būdu išplečiant programinės įrangos naudojimo galimybes.

<sup>4</sup> COMSOL Inc. COMSOL multiphysics 5.6 [programinė įranga]. 2020 lapkričio 11 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/>



**2 pav.** COMSOL Multiphysics programinės įrangos vartotojo sąsaja [12].

COMSOL Multiphysics vartotojo sąsaja yra nesudėtinga (žr. 2 pav.). Tyrimo aprašymas yra iš anksto sudėliotas pagal eiliškumą ir leidžia lengvai aprašyti problemą bei ją spręsti. Programa prašo užduoti tyrimo sąlygas tokia tvarka:

- 1) Skaitinių tyrimo sąlygų įvedimas;
- 2) Geometrijos braižymas arba importavimas;
- 3) Medžiagų savybių priskyrimas geometriniams elementams;
- 4) Sprendžiamų fizikinių reiškinių pridėjimas ir apibūdinimas;
- 5) Sprendinio tinklėlio apibūdinimas;
- 6) Sprendimo būdų pridėjimas ir apibūdinimas.

Programinės įrangos vartotojų bendruomenė dalinasi teorinėmis ir praktinėmis žiniomis sprendžiant įvairaus pobūdžio problemas. Susidūrus su neaiškia situacija galima pasinaudoti integruota naudojimo instrukcija, kuri automatiškai nukreipia vartotoją į aktualią informaciją apie nagrinėjamą funkciją.

Sprendimo būdai, juos pakoregavus, leidžia tirti problemą tiek su kintančiomis, tiek su nekintančiomis užduoties sąlygomis. Sprendžiant kelias užduotis vienu metu, galima jas apjungti ir spręsti kartu, taip pereinant prie sprendinio daug greičiau. Taip pat yra galimybė spręsti fizikos reiškinius atskirai, taip išskiriant ir išsaugant tolimesniam naudojimui nekintančius rezultatus. Pastarosios funkcijos yra pagrindiniai privalumai sprendžiant pulsuojančio šilumnešio srauto poveikį lyginant su Ansys Fluent programine įranga.

### 1.1.3. EQUA IDA-ICE

EQUA IDA-ICE<sup>5</sup> programinė įranga yra skirta dinaminiam vidaus patalpų klimato ir energijos suvartojimo tyrimams. Atliekant tyrimus yra galimybė itin detalai aprašyti tyrimo sąlygas tokias, kaip: šiluminės atitvarų savybės, vidiniai šilumos energijos išsiskyrimai, šilumos energijos pritekėjimas dėl saulės sukeltos radiacijos, žmonių aktyvumas patalpose, šilumos ir šalčio gamybos procesai, klimato sąlygos pagal vietovę ir jos istorinius klimato duomenis. Ši visuma sąlygų leidžia kritiškai įvertinti pastato energijos suvartojimą šaltuoju ir šiltuoju metų laikais.

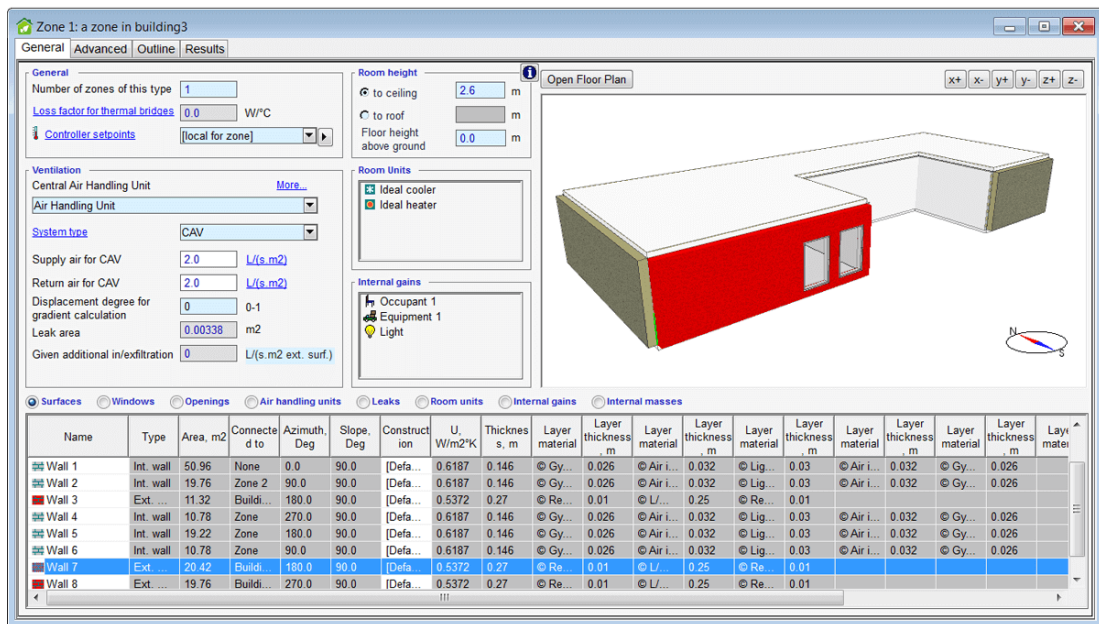
Programinė įranga rezultatus leidžia pateikti skaitiniu duomenų failu arba naudojantis jau iš anksto sukurtais ataskaitomis kuriose vertinami šie kriterijai [13, 14]:

- Zonų šilumos ir energijos balansas – saulės radiacija, žmonių užimtumas, įranga, apšvietimas, mechaninis ir natūralus vėdinimas, šildymo ir vėsinimo įrenginių parametrai, atitvarų ir šiluminių tiltelių energijos nuostoliai;
- Valdymo signalai – langų atidarymas ir šešėliavimas, šildymo ir šaldymo sistemų valdymas;
- Pastato užimtumas – žmonių aktyvumas patalpose kiekvienai atskirai zonai ir visam pastatui;
- Šilumos ir masės mainai – paviršių šilumos laidumas ir oro srautai;
- Vidaus oro kokybė – anglies dvideginio kiekis ore, oro apykaita, santykinė drėgmė;
- Šiluminio komforto faktoriai – juntama patalpos oro temperatūra, paviršių temperatūra, PPD ir PMV rodikliai;
- Energijos poreikiai – suminiai šiluminiai energijos poreikiai pagal tipą, pagamintos energijos kaina.

IDA-ICE vartotojo sąsaja leidžia 3D aplinkoje sumodeliuoti pastato geometriją, nesudėtingai aprašyti tyrimo sąlygas ir pateikti rezultatus. Esant tikslesnių tyrimo sąlygų įvesties poreikiui yra galimybė duomenis įvesti koreguojant programinį kodą, tokiu būdu galima lengvai pridėti išorinius duomenis ir juos kopijuoti tarp tyrimų. Prieinant programinį kodą taip pat galima koreguoti modelio sprendimo lygtis ir pritaikyti jas prie sprendžiamos problemos. Iškilus klausimams apie programos naudojimą pateikiamas išsamus, integruotas žinynas. Vartotojo sąsaja pateikta 3 paveikslėlyje:

---

<sup>5</sup> EQUA Simulation AB. Ida-ice [programinė įranga]. 2020 rugsėjo 11 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.equa.se/en/ida-ice>



3 pav. EQUA IDA-ICE programinės įrangos vartotojo sąsaja [15].

Didžiausias IDA-ICE privalumas yra galimybė detaliai reguliuoti energijos gamybos procesus naudojant jau iš anksto pateikta valdiklių ir jų logikos elementų biblioteka, dėl to programa yra populiari projektavimo srityje norint greitai patikrinti sprendinius ar sprendžiant didesnes užduotis kylančias pastatų projektavimo metu.



## **1.2. Faktorai nulemiantys grindinio šildymo sistemos inertiškumą**

Dėl didelio grindinio šildymo sistemų inertiškumo atsiranda valdymo iššūkių. Tipiškai sistema valdoma keičiant šilumnešio srauto temperatūrą ir/arba nutraukiant srauto tiekimą į šildomas patalpas. Tačiau vis dažniau siekiant didesnio sistemos atsako į kintančias sąlygas (saulės radiaciją, vidinius šilumos išsiskyrimus) naudojama kintančio srauto sistema su valdikliais. Valdikliai yra skirstomi į kelis tipus, vieni reguliuoja sistemą pagal tuo metu esančius parametrus, kiti tiria esamus parametrus ir juos naudoja sudaryti tipiškam valdymo grafikui. Pastarieji pagal 2021 metais atliktą tyrimą [16, 17] gali padėti sutaupyti iki 14,9 % energijos sąnaudų, užtikrinti pastovesnę temperatūrą bei sumažinti šildymo sistemos atsako greitį į sąlygų pasikeitimą ~56 %, tokiu būdu įveikiant sistemos inertiškumo problemą.

Sistemos inertiškumą įveikti taip pat dažnai trukdo prasta šildymo sistemų projektavimų praktika, kai šildymo prietaisai yra parenkami pagal norminius jų parametrus vietoje faktinių parametrų. Tokiu būdu dažniausiai prietaiso galia yra įvertinama didesnė nei faktinė ir pasiekus projektinius šilumos nuostolius šaltuoju metų laiku reikia didinti srautą į prietaisą virš numatytos vertės, dėl to kenčia prietaiso ilgaamžiškumas ir patalpų šiluminis komfortas [18].

### **1.2.1. Šildomų grindų konstrukcijos tipai**

Sprendžiant grindinio šildymo sistemos inertiškumo klausimą svarbu pasirinkti grindų konstrukcijos tipą. Dažniausiai sutinkami du konstrukcijos tipai – šlapios ir sausos grindinio šildymo sistemų konstrukcijos.

Sauso tipo grindinio šildymo sistemos konstrukcija neturi užpilamo betono sluoksnio. Ji tipičiai susideda iš šių sluoksnių (žr. 4 pav.):

- Faneros plokštės su išfrezuotais grioveliais šildymo vamzdžiui;
- Aliuminio folijos;
- Šildymo vamzdžio kontūro;
- Grindų dangos.

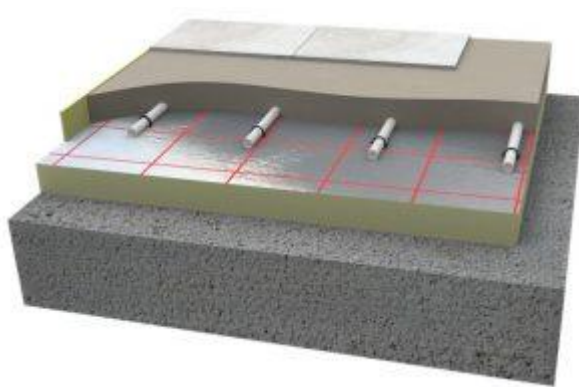
Sporto salėse ir kitose patalpose, kur yra užsiimama itin aktyviomis veiklomis svarbi lanksti ir minkšta grindų danga ilgalaikių ir trumpalaikių sveikatos sutrikimų rizikai mažinti. Tuo atveju sauso tipo grindys yra montuojamos ant skersinių tarp kurių yra klojama izoliacija ir šildymo vamzdžiai, o ant jų faneros plokštė ir grindų danga. Tokio tipo sistema leidžia šilumai pasiskirstyti tolygiai ir nesukuriant skersvėjų, o jos inertiškumas lyginant su šlapio tipo yra ženkliai mažesnis. Tokio tipo konstrukcija leidžia sistemai greitai prisitaikyti prie kintančių patalpos oro temperatūros sąlygų.



**4 pav.** Sauso tipo grindinio šildymo sistemos konstrukcija [19].

Šlapio grindinio šildymo sistemos konstrukcija nėra pritaikyta aktyviam laisvalaikiui, tačiau ji pasižymi dideliu inertiškumu ir šiluminiu komfortu. Tipiškai ši konstrukcija susideda iš šių sluoksnių (žr. 5 pav.):

- Izoliacinė plokštės;
- Šildymo vamzdžio kontūro;
- Užpilamo betono sluoksnio;
- Grindų dangos.



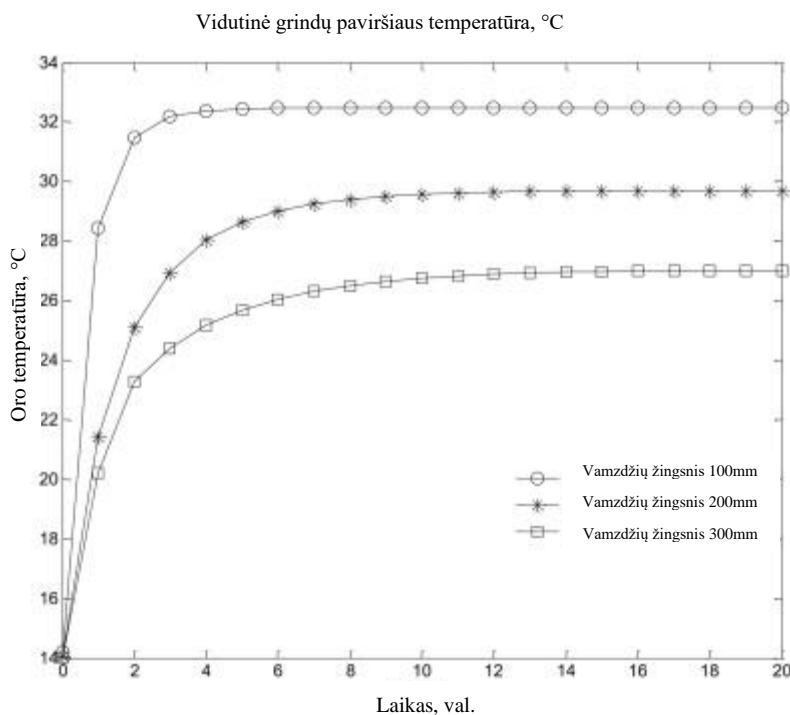
**5 pav.** Šlapio tipo grindinio šildymo sistemos konstrukcija [19].

Lyginant su sauso tipo sistema, skersvėjų rizika yra dar mažesnė, dėl labai tolygaus šilumos pasiskirstymo per visą patalpą. Su šiuo tipu sistemos inertiškumas yra ženkliai didesnis, dėl to sistema daug lėčiau reaguoja į patalpos oro temperatūros pokyčius [20].

Vienas iš didžiausių šildomų grindų privalumų yra šiluminis komfortas. Remiantis tyrimu [21], atliktu su CFD programine įranga, vertinant modeliuojamą situaciją pagal Fangerio šiluminio komforto lygčių rinkinį, nustatyta, kad dėl grindinio šildymo sistemos didelės šiluminės masės oro temperatūra ofisuose gali būti sumažinama 1,5 °C, išlaikant gerą PMV rodiklį, t.y. daugumą tenkinantį šiluminį komfortą. Taip pat, lyginant su tradiciniu konvekciniu šildymo būdu, tyrėjai pabrėžia [22], [23], [24], kad grindinis šildymas reikšmingai sumažina skersvėjų riziką.

### 1.2.2. Vamzdžių išdėliojimo žingsnio dydis

Paprasciausias būdas mažinti šildymo sistemos inertiškumą yra didinti šildymo prietaiso paviršiaus plotą. Tokiu būdu šildymo prietaisas turi didesnę plotą perduoti šilumos energiją, grindinio šildymo sistemos atveju į užpilamą betoną sluoksnį. Grindiniame šildyme šiam efektui sukurti yra didinamas vamzdžių išdėliojimo žingsnio dydis. Eksperimentiškai atliktame tyrime [25] naudotas 40 °C temperatūros šilumnešis ir 60 mm užpilamo betono sluoksnio storis. Su kiekvienu vamzdžių tarpsnio dydžio sumažinimu ta pati patalpos oro temperatūra buvo pasiekta per vis mažesnę laiko tarpą (žr. 6 pav.).



**6 pav.** Vidutinė grindų temperatūra įrengiant vamzdyną skirtingais žingsnių dydžiais grindų įšilimo metu [25].

Atlikus tyrimą nustatyta, kad patalpos įšilimo greičiui, lyginant su kitais grindinio šildymo inertiškumą nulemiančiais faktoriais, vamzdžių išdėliojimo žingsnio dydis turi didžiausią poveikį. Vis dėlto, dažnai susiduriama su problema, kai patalpos šilumos nuostoliams padengti šildomų grindų ploto neužtenka net ir naudojant mažiausią vamzdžių išdėliojimo tarpsnį ir reikia ieškoti alternatyvių priemonių šiems nuostoliams padengti.

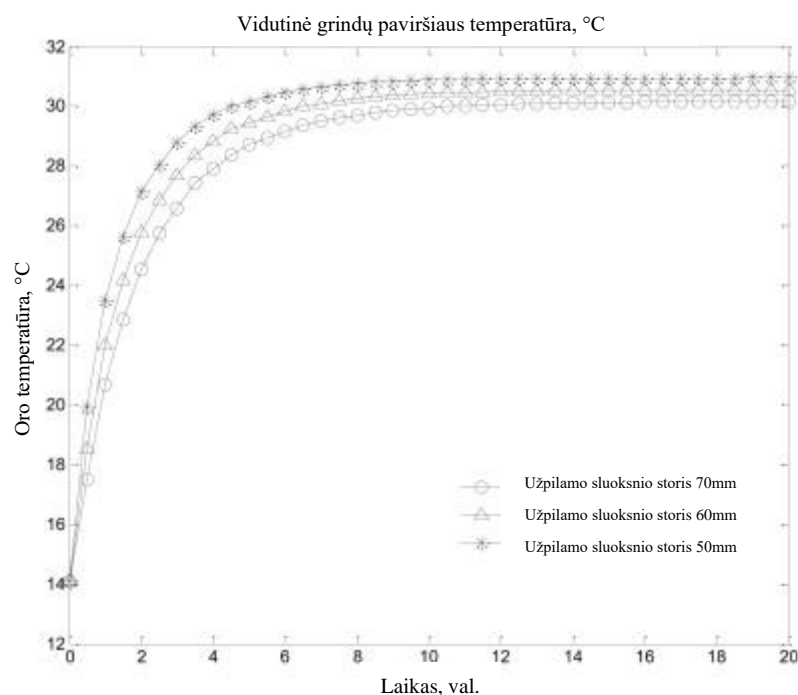
### 1.2.3. Užpilamo betono sluoksnio storis

Atlikti tyrimai [25], [26], analizuojant skirtingų sistemos konstrukcinių elementų poveikį sistemos inertiškumui, atkreipia didelį dėmesį į užpilamo betono sluoksnio storį, ypač patalpos oro temperatūros įšilimo periodu. Atliekant eksperimentinį tyrimą, buvo naudojama 7 paveikslėlyje pateikta įranga ir tyrimo patalpa. Tyrimo metu buvo keičiamas užpilamo betono sluoksnio storis, stebint patalpos oro temperatūros pokytį per laiką.



**7 pav.** Laboratorija ir įranga naudota tyrime [25].

Tyrimas atliktas naudojant 200mm vamzdyno išdėstymo žingsnį, 40 °C temperatūros šilumnešį ir keičiant užpilamo betono sluoksnį tarp 50 mm, 60 mm ir 70 mm. Rezultatai (žr. 8 pav.) parodė, kad plonesnio sluoksnio vidutinė grindų paviršiaus temperatūra buvo didesnė ir su užpilamo betono sluoksnio storio didėjimu lygiagrečiai didėjo patalpos oro įšilimo greitis. Patalpos oro temperatūros įšilimo greičio skirtumas tarp skirtingų užpilamo betono sluoksnio storų buvo nuo dešimties iki dvidešimties minučių.

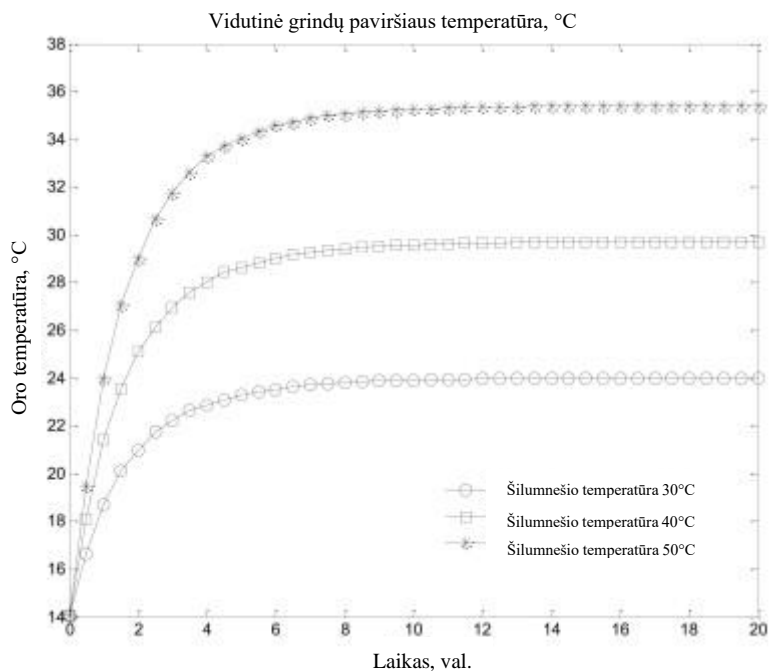


**8 pav.** Vidutinė grindų paviršiaus temperatūra skirtingiems užpilamo betono sluoksnio storiams grindų įšilimo metu [25].

#### 1.2.4. Šilumnešio temperatūra

Paskutinis parametras yra šilumnešio temperatūra. Orinio ir radiatorinio šildymo sistemose, dėl didelio oro srautų maišymosi, tiekiamo šilumnešio temperatūra nėra tokia svarbi, nes šie prietaisai

naudoja konvekciją patalpos orui pašildyti. Tačiau grindinio šildymo sistemose susiduriama su šiluminio komforto sumažėjimu, kai pėdos liečia aukštos temperatūros grindų paviršių. Paviršiaus temperatūra yra limituota dėl galimo diskomforto, kurį sukeltų pernelyg aukšta šilumnešio temperatūra. Tyrime [25] buvo naudojamas 200 mm vamzdžio išdėstymo žingsnis ir 60 mm užpilamo betono sluoksnio storis. Rezultatai (žr. 9 pav.) atskleidė, jog naudojant skirtingas šilumnešio temperatūras nežymiai skyrėsi laikas, per kurį buvo pasiekta numatyta patalpos oro temperatūra. Šis periodas svyravo tarp dešimties ir dvidešimties minučių tarp kiekvieno šilumnešio temperatūros žingsnio, taip pat, kaip ir tyrime keičiant užpilamo betono sluoksnio storį.

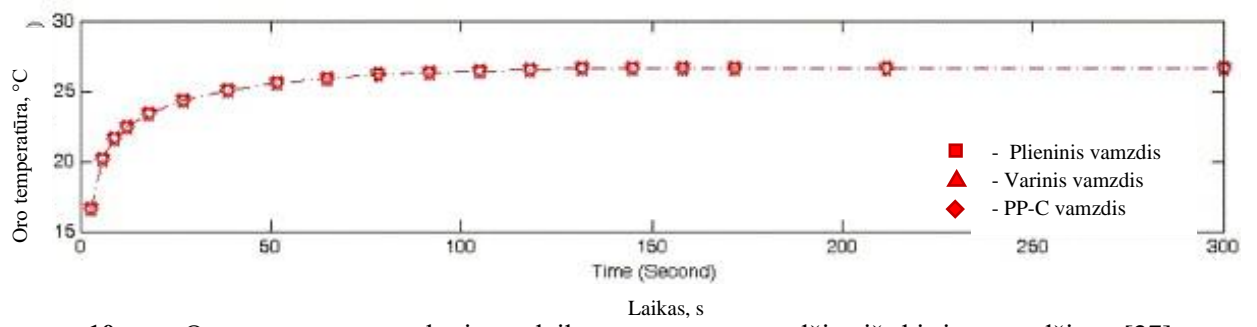


**9 pav.** Vidutinė grindų temperatūra, tiekiant skirtingas temperatūras šilumnešį grindų įšilimo metu [25].

Nors šilumnešio temperatūra patalpos oro temperatūros įšilimo greičiui didelio poveikio neturi, tačiau tokia siekiant pagaminti aukštos temperatūros šilumnešį reikalingas didesnės galios šildymo įrenginys. Naudojant šilumos siurblių nerekomenduojama bandyti pasiekti aukštą šilumnešio temperatūrą dėl proporcingai mažėjančio prietaiso efektyvumo.

### 1.2.5. Vamzdžio konstrukcinė medžiaga

Skaitiniame grindinio šildymo sistemos našumo tyrime [27], keičiant vamzdinio medžiagos tipą tarp plieninio, varinio ir PP-C įšilimo laiko atžvilgiu skirtumas beveik nepastebimas (žr. 10 pav.). Tyrėjas pabrėžia jog ženkliai svarbiau yra konstrukcijos virš vamzdžio tipas ir storis. Tačiau medžiagos tipas gali būti reikšmingas lyginant su vamzdžiais, pagamintais iš medžiagų, kurių šiluminis laidumas yra mažesnis už betono. Rezultatai nesiskiria dėl ženkliai mažesnės vamzdinio šiluminės masės lyginant su grindų konstrukcija [28].



**10 pav.** Oro temperatūros pokytis per laiką, naudojant vamzdžius iš skirtingų medžiagų [27].

### 1.3. Pulsuojančio srauto technologija

Šiuo metu pulsuojančio srauto technologija yra plačiai naudojama šilumos, energetikos, chemijos ir elektros inžinerijoje, gamyboje, medicinoje, ūkyje. Tai yra technologija kuri gali būti pritaikyta bet kokio skysčio tekėjimui. Tai gali būti vanduo laistymo sistemoje, šilumnešis šilumokaityje, aušinimo skystis branduoliniame reaktoriuje ar net kraujas kraujotakos sistemoje. Toks platus šios technologijos panaudojimo spektras skatina tyrėjus ieškoti daugiau galimybių jos pritaikymui [29].

#### 1.3.1. Veikimo principas

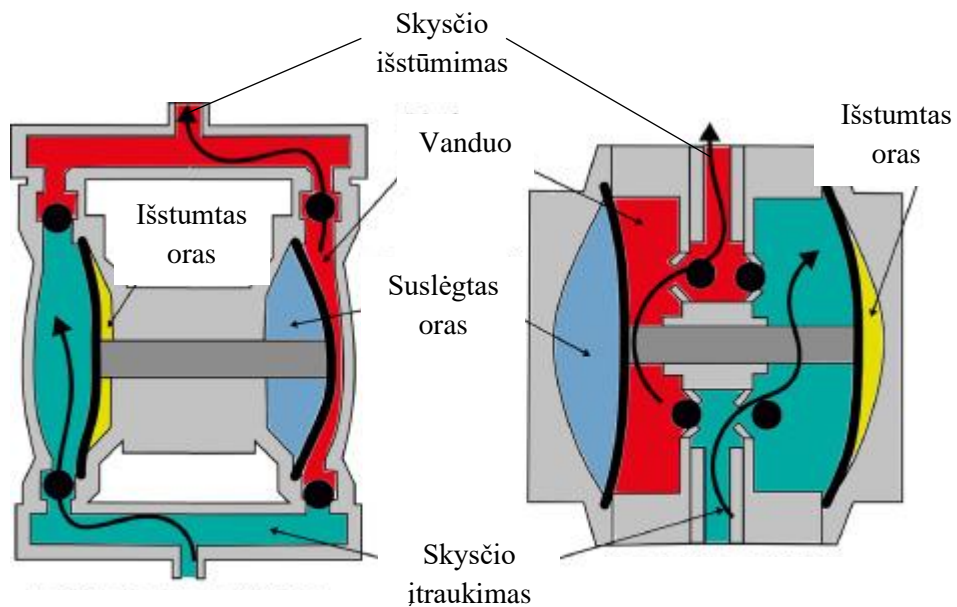
Skysčio srautui tekant jis turi savybę formuoti skirtingo tekėjimo greičio zonas. Dažniausiai skysčio greitis artėjant prie sienelių, kurios apriboja jo tekėjimą, lėtėja, o skerspjūvio centre būna didžiausias. Taip yra dėl to, jog tekėjimą ribojančios sienelės dėl paviršiaus trinties sukuria pasipriešinimą ir lėtina skysčio tekėjimo greitį. Vertinant šią technologiją skysčio tekėjimo greičio atžvilgiu, pulsacijos padeda sumažinti sienelių pasipriešinimą, dėl to padidėja vidutinis tekėjimo greitis. Vertinant šilumos laidumą, padidėjęs šilumnešio srauto greitis šalia sienelių padidina šilumos perdavimo greitį tarp skysčio ir jį ribojančių sienelių.

Atsižvelgiant į pulsacijos pobūdį yra išskiriami du pulsuojančio srauto tipai:

- 1) Vienkryptis – kai skysčio srauto tiekimo greičio amplitudės apatinė riba yra daugiau už nulį. Šis tipas dažniau naudojamas skysčiuose kurių Reinoldso skaičiaus vertė atitinka laminarinio tekėjimo apibūdinimą. Efektas nyksta didėjant Reinoldso skaičiui, ypač pasiekus turbulentiškumą, tuomet tėkmės greitis vis mažiau reaguoja į amplitudės ir pulsacijos dažnio pokyčius;
- 2) Dvikryptis – kai skysčio srauto tiekimo greičio amplitudė periodiškai būna ir mažesnė, ir didesnė už nulį. Remiantis esamais tyrimais, šio tipo sukurtas šilumos perdavimo padidinimo efektas yra stabilesnis. Jis yra taip pat tinkamesnis aukšto Reinoldso skaičiaus sistemoms, kadangi priešingai nei vienkryptis pulsacijos tipas, jis puikiai reaguoja į amplitudės ir pulsacijos dažnio pokyčius.

Vienkryptės pulsacijos sukūrimui praktikoje yra naudojamas diafragminis vandens siurblys.

Rinkoje galima aptikti du šių siurblių tipus [30], su periferiniu ir centriniu mechanizmu išdėstymu (žr. 11 pav.).

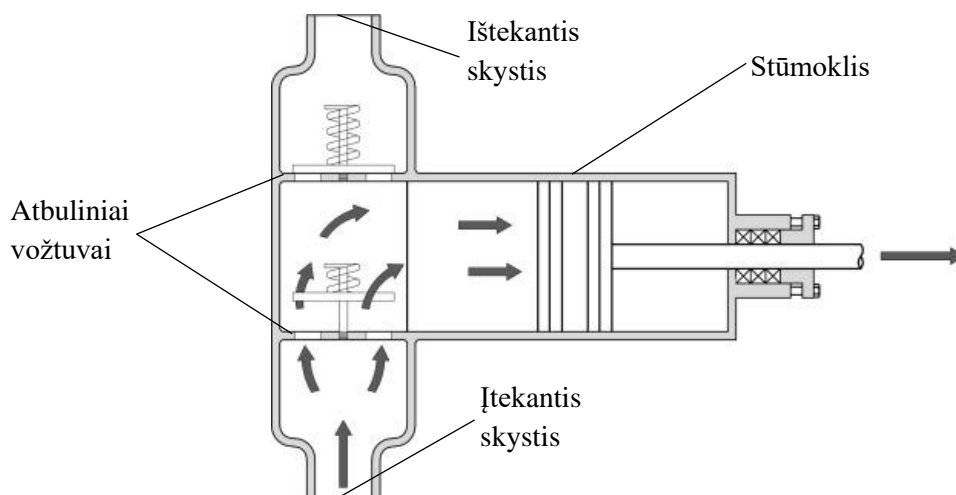


**11 pav.** Vandens siurblys su periferiniu mechanizmu (kairėje) ir su centriniu mechanizmu (dešinėje) [30].

Vandens judėjimas siurblyje pagrįstas atbulinių vožtuvų atsidarymu skysčio įtraukimo metu ir užblokavimu išstūmimo metu. Vanduo varinėjamas oro kompresoriaus pagalba, kuris išplečia ir sutraukia membraną.

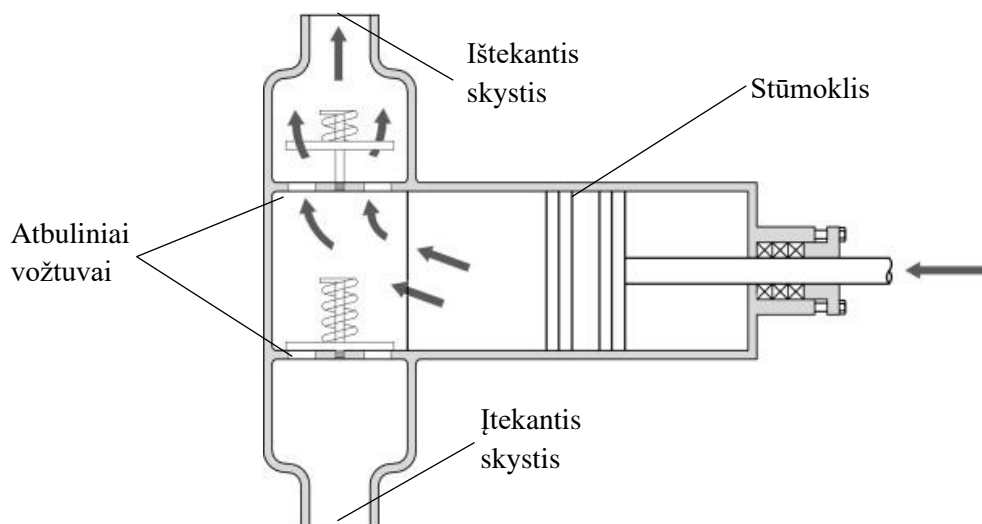
Dvikryptės pulsacijos atveju dažniau naudojamas stūmoklinis vandens siurblys be antrojo atbulinio vožtuvo. Šis vandens siurblių tipas taip pat išskiriamas į du:

- 1) Vieno takto – kai stūmoklis vienu takto metu arba įtraukia arba išstumia skystį [31]. Toks principas ne visada gali užtikrinti stabilų srautą. Integravus atbulinius vožtuvus jie gali būti naudojami ir vienkryptės pulsacijos sukūrimui (žr. 12 ir 13 pav.);



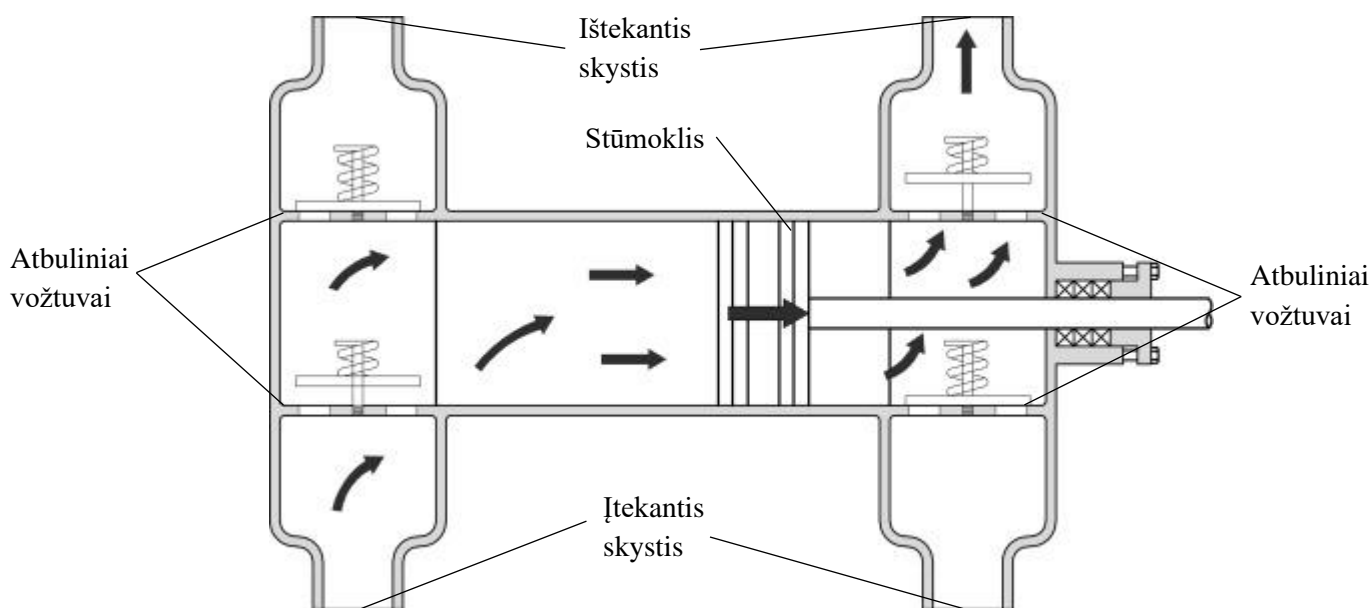
**12 pav.** Vieno takto stūmoklinio vandens siurblio veikimo principas skysčio įtraukimo metu [31].





**13 pav.** Vieno takto stūmoklinio vandens siurblio veikimo principas skysčio išstūmimo metu [31].

- 2) Dviejų taktų – kai vieno takto metu ir įtraukiamas, ir išstumiamas skystis [31]. Toks principas padeda užtikrinti tolygų srautą ir dažniausiai naudojamas pastovesniam ir didesniam srauto greičiui išvystyti (žr. 14 pav.).



**14 pav.** Dviejų taktų vandens siurblio veikimo principas [31].

### 1.3.2. Technologijos pritaikymas

Vienas iš dažniausiai sutinkamų pulsuojančio srauto panaudojimų dėl padidinto šilumos perdavimo efektyvumo yra šilumokaičiuose. Viename eksperimentiniame tyrime [32] naudojant rutulinį ventilių kaip pulsacijos šaltinį tyrėjas nustatė, kad priešpriešinių srautų šilumokaičiuose pulsacijos efektas turi galimybę padidinti šilumos perdavimo koeficientą nuo 20 % iki 90 %, tačiau naudojant paralelinių srautų šilumokaitį šis efektas yra mažesnis – apie 70 %. Toks efektas pagrįstas dideliu metalo laidumu naudojamu šilumokaičio konstrukcijai ir proporcingai didinamam šilumnešio srautu kitoje šilumnešio pusėje. Šiuose šilumokaičiuose buvo naudojamas labai didelis srauto greitis ir itin didelis pulsacijos dažnis, kas nėra pritaikoma šildymo tipiniuose šildymo prietaisuose, dėl jų silpnos konstrukcijos.

Taip pat dėmesio skiriama centralizuotiems miestų tinklams. Tiekiant pulsuojantį srautą į centralizuotus tinklus galima su sąlyginai mažais kaštais padidinti sistemos galią. Tai labai svarbu miestams, turintiems didelius energijos sąnaudų priaugius piko metu. Pasinaudojant šia technologija, pulsuojantis srautas galėtų būti aktyvuotas iš anksto, prieš tipinį piko laiką ir tokiu būdu atitolinti įrenginių galios didinimą. Tai aktualiausia karštuoju metų laiku dėl aiškaus piko esant didžiausiam saulės radiacijos kiekiui. Keli tyrėjai išnagrinėjo pulsacijos galimybes atlikdami analitinį tyrimą. Jų darbo objektas – Verona (Italija). Remdamiesi gautais rezultatais, jie teigia, jog Vasario mėnesi įmanoma sutaupyti iki 13 % ir balandžio mėnesį iki 18 % sąnaudų šildymui ir vėsinimui.

### 1.3.3. Pulsacijos parametrai

Skysčio pulsaciją apibūdino čekų fizikas Vincenc Strouhal daugiausiai dirbęs su eksperimentine fizika. Prie skysčių mechanikos pagrindų jis prisidėjo sukūręs Strauhalo skaičių – bematį skaičių apibūdinantį virpančio srauto tekėjimo mechanizmą. Egzistuoja keletas Strauhalo skaičiaus  $S_t$  versijų, tačiau pagrindinė ir skysčio pulsacijos atveju svarbiausia yra pateikta 1 formulėje [3]:

$$S_t = \frac{f \cdot L}{U} \quad (1)$$

čia:

$f$  – sukurtos pulsacijos dažnis, 1/s;

$L$  – hidraulinis diametras, m;

$U$  – tėkmės greitis, m/s.

Šie trys kintamieji yra reikalingi pulsuojančiam srautui apibūdinti – sukurtos pulsacijos dažnis, hidraulinis diametras ir tėkmės greitis. Nors hidraulinis diametras ir tėkmės greitis yra limituoti, pulsacijos dažnis gali kisti.

Pabrėžiama, jog Strauhalo skaičius turėtų būti režiuose tarp 0 ir 1, dėl to, jog juose esančiame sraute yra pastebimas didžiausias šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas [29].

Taip pat pabrėžiama, jog tokio tipo pulsacijai tinkamiausias toks šilumnešio tiekimo greitis, kuris būtų laminarinio režimo režiuose. Šilumnešio turbulentiškumo režiai nustatomi Reinoldso skaičiumi. Iki 2300 srauto režimas laikomas laminariniu, nuo 2300 iki 4000 režimas yra neapibrėžtasis ir nuo 4000 režimas yra turbulentinis. Reinoldso skaičius  $R_e$  srauto tėkmei vamzdžiu apskaičiuojamas pagal 2 formulę [33]:

$$R_e = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} \quad (2)$$

čia:

$\rho$  – skysčio tankis, kg/m<sup>3</sup>;

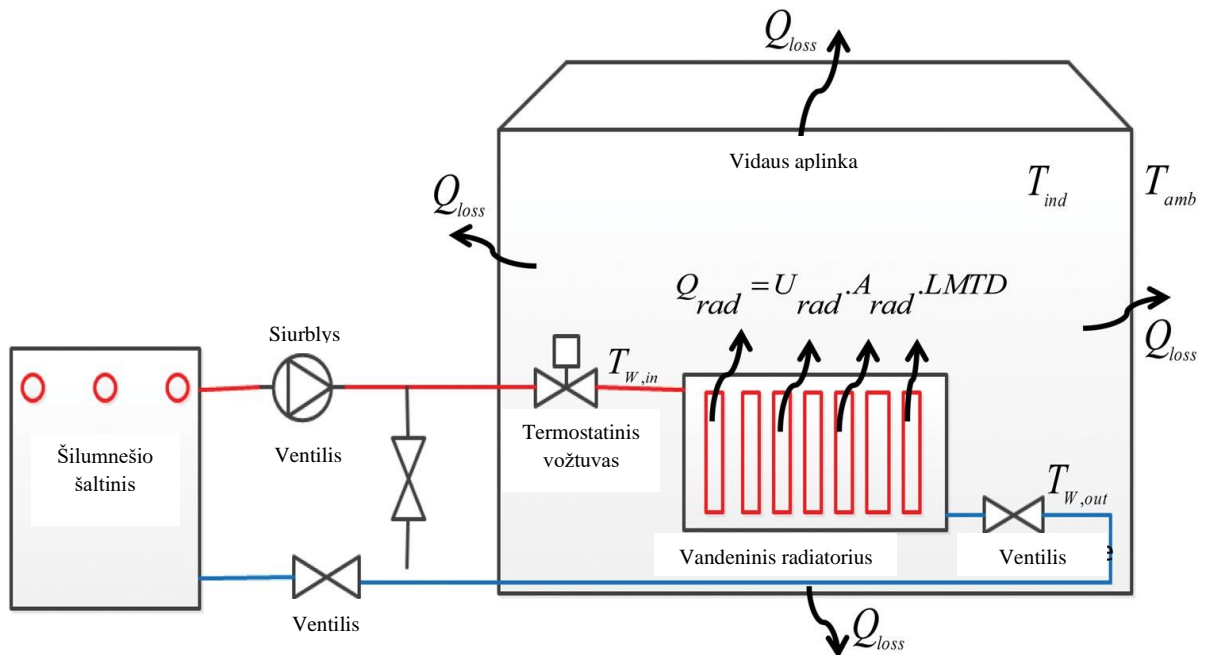
$u$  – tėkmės greitis, m/s;

$L$  – vamzdžio diametras, m;

$\mu$  – dinaminė skysčio klampa, Pa·s.

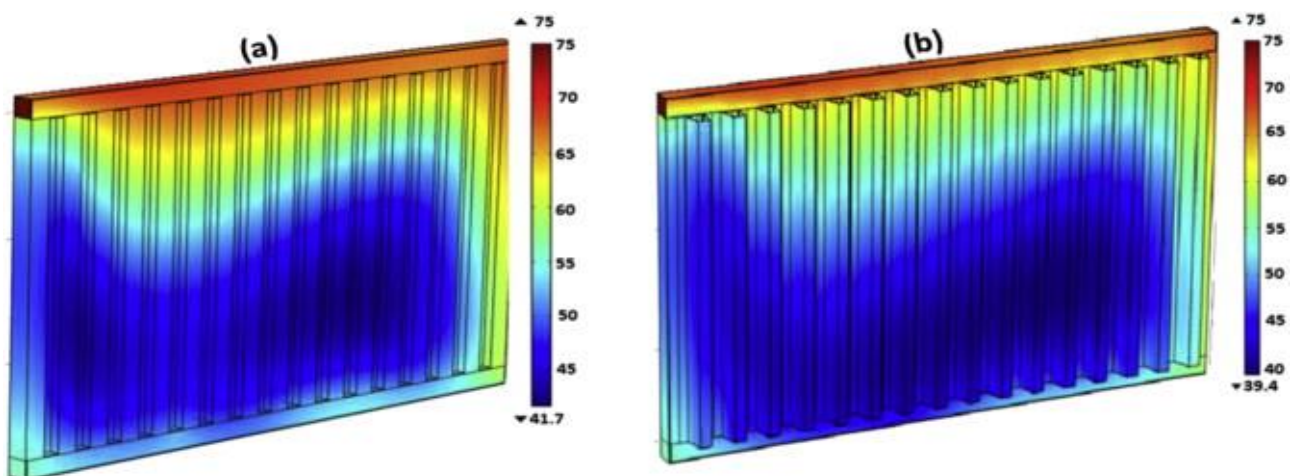
### 1.3.4. Taikymas pastatų šildyme

2014 metais atliktame tyrime [4] analizuoti pastato šildymo sistemos su radiatoriais parametrai. Tyrimo principinė šilumos mainų schema pavaizduota toliau (žr. 15 pav.). Įvertinus šilumos nuostolius pagal Jungtinės Karalystės žiemos klimatinius duomenis nustatyta, jog galimas 20-22 % šiluminės energijos sutaupymas naudojant 0,0384 kg/s šilumnešio srautą ir 0,017 Hz pulsacijos dažnį.



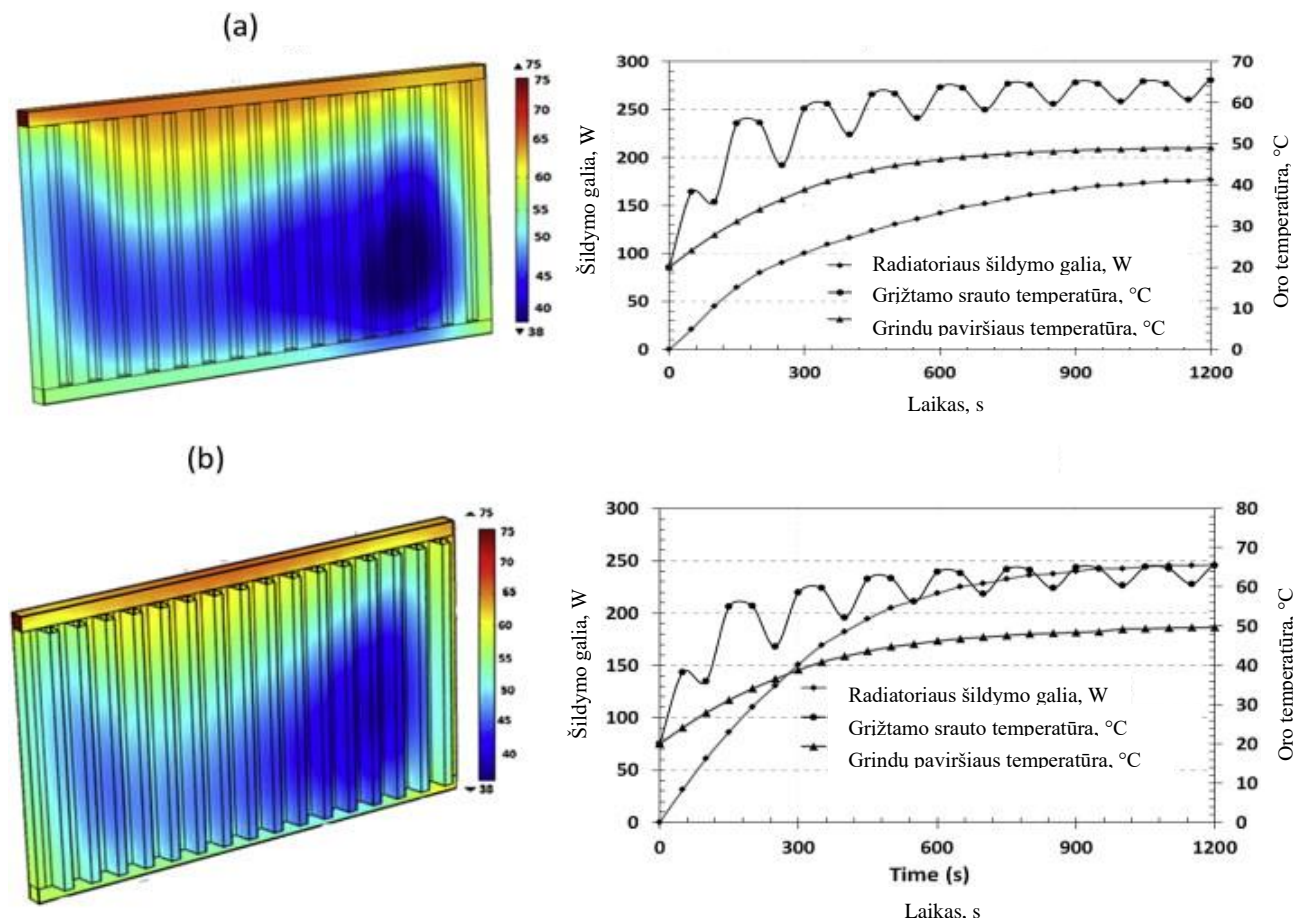
15 pav. Tyrimo šilumos mainų schema [4].

2015 metais [2] ir 2016 metais [3] buvo tirta šildymo sistema su radiatoriais baigtinių elementų metodu, kai į juos buvo tiekiamas pastovus ir pulsuojantis šilumnešio srautas. Buvo tiriami 10 ir 11 tipo (žr. 16 pav.) radiatoriai (pastate šildomame centralizuoto šildymo tinklų) naudojant CFD metodologiją ir COMSOL programine įranga.



16 pav. Paviršiaus temperatūros pasiskirstymas naudojant pastovų srautą (a) 10 tipo ir (b) 11 tipo radiatoriuose [2].

Modeliuojamos alternatyvos skyrėsi srauto greičio amplitudės dydžiu ir šilumnešio tiekimo dažniu. Rezultatai parodė, jog didesnis vidutinis šilumnešio tekėjimo greitis buvo pasiektas gretima radiatoriaus kanalų ir dėl to, lyginant su pastovaus srauto sistema, radiatoriuje į kurį buvo tiekiamas pulsuojantis srautas buvo matomas didesnis šilumos srauto tankis ties radiatoriaus sienelėmis. Įvertinus sunaudotą šilumnešio kiekį nustatyta, jog galima sutaupyti iki 17 % šiluminės energijos sąnaudų 10 tipo radiatoriuose ir iki 20 % 11 tipo radiatoriuose, šildymo prietaiso paviršiaus temperatūrai ženkliai nepakitus (žr. 17 pav.). Taip pat nustatyta jog tokiu būdu galima sumažinti šilumnešio siurblio galią iki 12 % lyginant su šilumnešio tiekimu naudojant pastovų srautą.

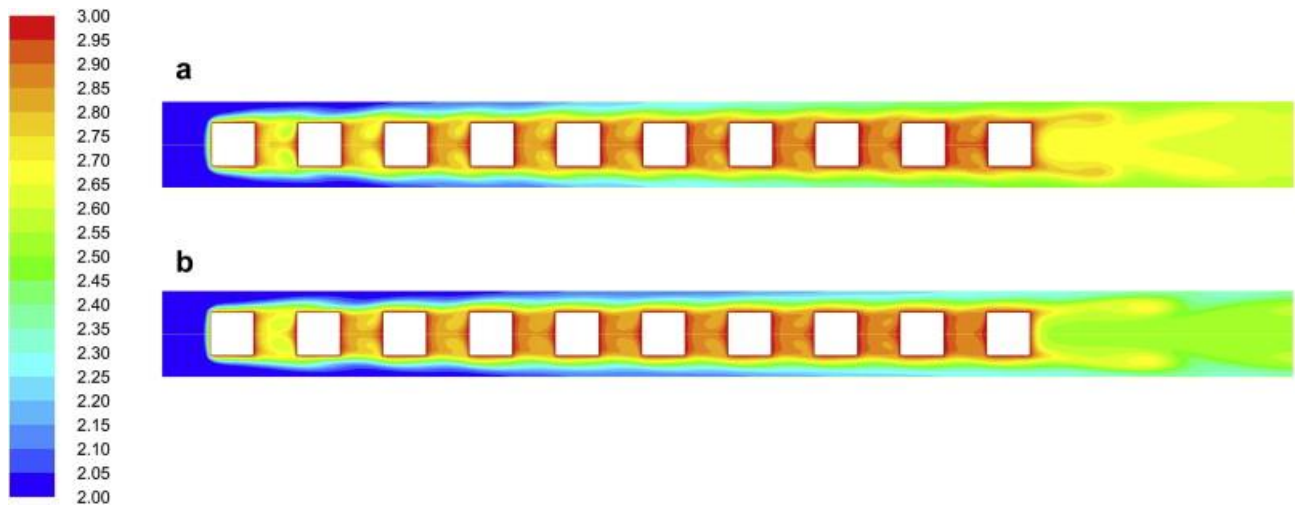


**17 pav.** Paviršiaus temperatūros pasiskirstymas naudojant pulsuojantį srautą (a) 10 tipo ir (b) 11 tipo radiatoriuose [2].

Radiatoriaus šilumos atidavimo principas pagrįstas konvekcija, dėl to nedidelis jo paviršiaus temperatūros padidėjimas neturėtų ženkliai padidinti skersvėjų rizikos ir sumažinti šiluminio komforto. Tyrime taip pat nustatyta, kad patalpos oro temperatūra naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą svyravo tik  $\pm 1,5$  °C, o oro judėjimo greitis patalpoje buvo 0,15 m/s. Tokie rezultatai skervėjo riziką padidino 15 %.

### 1.3.5. Pulsuojančio srauto poveikis šildymo prietaiso pasipriešinimui

Siekiant įvertinti pulsacijos sukurtą efektą reikia žinoti, kaip skirtingi pulsacijos parametrai veikia šilumos perdavimą. 2013 metais atliktame tyrime analizuotas laminarinio tekėjimo režimo srautas pro stačiakampio gretasienio formos kliūtis imituojant. Naudoti pulsacijos dažniai nuo 0 Hz iki 80 Hz. Reinoldso skaičius tyrimo metu svyravo nuo 50 iki 200.



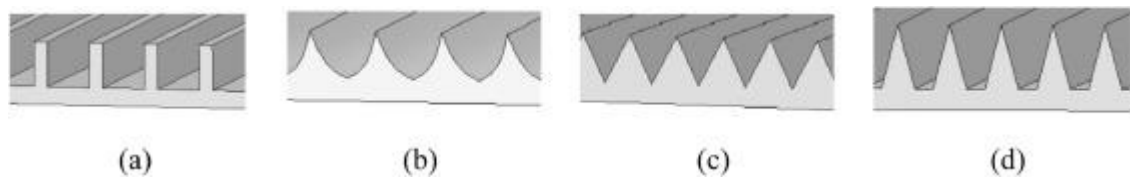
**18 pav.** Skysčio temperatūra, kai Reynoldso skaičius yra žemas (a) ir kai Reynoldso skaičius yra aukštas (b).

18 paveikslėlyje matoma jog esant žemam Reynoldso skaičiui paviršiaus temperatūra yra mažesnė nei esant aukštam Reynoldso skaičiui. Ši tendencija parodo Reynoldso ir Nusselto skaičių koreliaciją.

Nusselto skaičius parodo ryšį tarp šilumos srauto ir šilumos laidumo per tam tikro storio sluoksnį.

Tyrime nustatyta kad sukurta pulsacija padidina pasipriešinimą ties pradinėmis kliūtimis, tačiau sumažina ir net paverčia pasipriešinimą neigiamu ties tolimesnėmis kliūtimis. Pasipriešinimo koeficientas mažėjo, Reynoldso skaičiui didėjant, tačiau didėjo linijiškai didėjant pulsacijos dažniui [34].

Taip pat verta paminėti jog sukurti pulsaciją ir įveikti šildymo prietaiso pasipriešinimą galima naudojant dantyta sienelių paviršių. 2021 metais atliktame tyrime teigiama jog naudojant dantyta ar gruoblėta paviršių galima pasyviai sukelti pulsaciją sraute (žr. 19 pav.). Tačiau šiuo metu dar nėra atrasta koreliacija tarp paviršiaus geometrijos ir numatomos pulsacijos skysčio sraute, dėl to pulsacijos efektas gali būti prieitas tik analizuojant daug paviršiaus versijų ir lyginant jų sukurtos pulsacijos parametrus, taip prieinant prie veikiančio principo būtent modeliuojamai situacijai [35].



**19 pav.** Paviršių tipai naudojami tyrime [35].

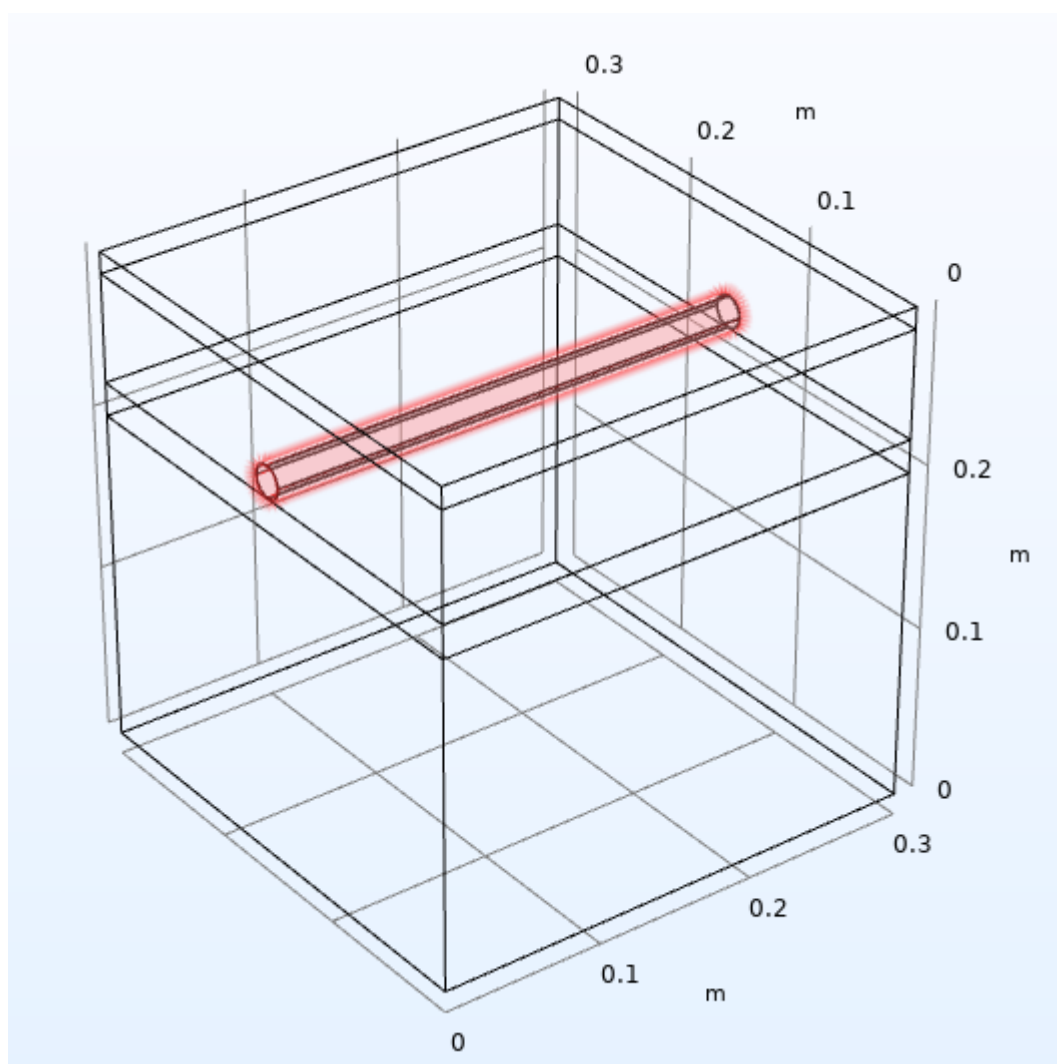
## 2. Tiriamoji dalis

### 2.1. Pulsuojančio ir pastovaus šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos parametru tyrimas baigtinių elementų metodu

Šiuo tyrimu analizuojami grindinio šildymo parametrai naudojant pulsuojantį ir pastovų šilumnešio srautą. Tam naudojama COMSOL Multiphysics baigtinių elementų tyrimo programinė įranga.

#### 2.1.1. Tyrimo objektas

Tiriama grindinio šildymo detalė (žr. 20 pav.). Ją sudaro grindų konstrukcija, perdanga po ja ir vamzdis, kuriuo tiekiamas pulsuojantis ir pastovus šilumnešio srautas. Tokio tipo tyrimo objektas pasirinktas dėl geometrijos paprastumo ir modelio skaičiavimo stabilumo.

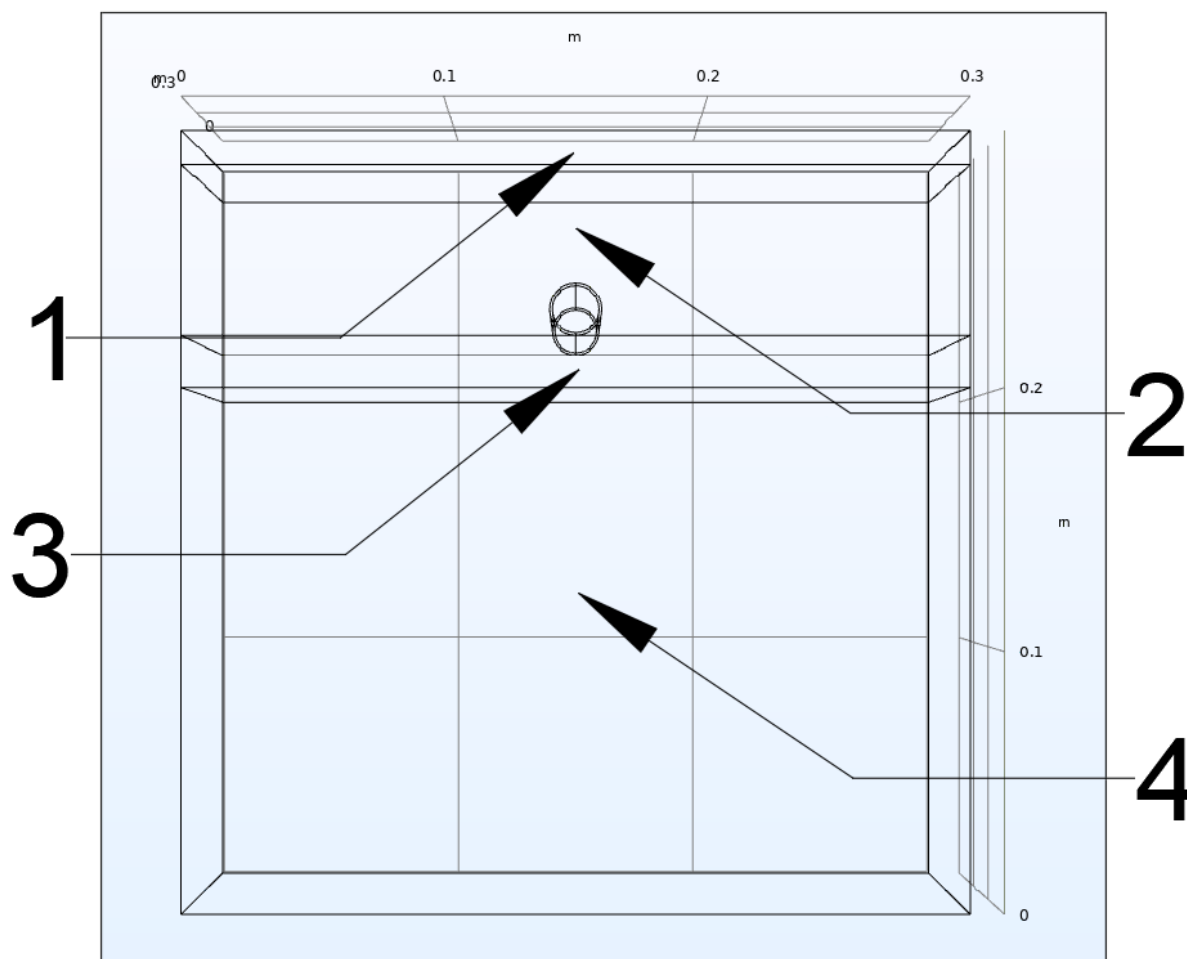


20 pav. Tyrimo objekto 3D vizualizacija COMSOL Multiphysics programinės įrangos aplinkoje.

#### 2.1.1.1. Grindų konstrukcijos geometrija ir parametrai

Kiekvienas grindų konstrukcijos sluoksnis sumodeliuotas kaip atskiras elementas. Tokiu būdu programa efektyviau geba spręsti šilumos perdavimo lygtis. Pasirinkta šlapio tipo grindinio šildymo konstrukcija dėl jos platesnio pritaikomumo pastatų šildyme, bei didesnio inertiškumo. Kiekvieno iš

sluoksnių, kuriems priskirtas numeris (žr. 21 pav.), medžiaga, jos savybės ir geometriniai matmenys pateikti 1 lentelėje:



**21 pav.** Tyrimo objekto grindų konstrukcijos sluoksnių numeracija COMSOL Multiphysics programinės įrangos aplinkoje.

Medžiagų šiluminės talpos, šilumos perdavimo koeficiento ir tankio vertės parenkamos iš statybos techninio reglamento 2.01.02:2016 lentelių 3.7, 9.2 ir 9.3 [36]. Jeigu vertės nurodytos intervale, naudojamas intervalo vidurkis.

**1 lentelė.** Sumodeliuotos grindų konstrukcijos sluoksnių parametrai.

Sluoksnių numeris	Sluoksnių pavadinimas	Šiluminė talpa, J/(kg·K)	Šilumos perdavimo koeficientas, W/m·K	Tankis, kg/m <sup>3</sup>	Ilgis, mm	Plotis, mm	Aukštis, mm
1	Keraminės plytelės	840	1,5	2300	300	300	13
2	Užpilamas betono sluoksnis (Vidutinio tankio betonas)	1000	1,15	1800	300	300	65

### 1 lentelės tęsinys.

Sluoksnio numeris	Sluoksnio pavadinimas	Šiluminė talpa, J/(kg·K)	Šilumos perdavimo koeficientas, W/m·K	Tankis, kg/m <sup>3</sup>	Ilgis, mm	Plotis, mm	Aukštis, mm
3	XPS polistireninio putplasčio izoliacinė plokštė	1450	0,037	42,5	300	300	20
4	Perdengimo plokštė (Armuotas Betonas (su 2 % plieno))	1000	2,5	2400	300	300	200

#### 2.1.1.2. Vamzdžio geometrija ir parametrai

Pasirinktas tipiškai grindų šildymo sistemose naudojamas  $\varnothing 18\text{mm}$  PE-X (polietileninis) vamzdis, kurio sienelės storis 2mm. Jam priskirtos šie parametrai:

- Šiluminė talpa – 1550 J/(kg·K);
- Tankis – 300 kg/m<sup>3</sup>;
- Šilumos perdavimo koeficientas – 0,41 W/(m·K)

Vamzdžio šiluminė talpa ir tankis parinkti iš statybos techninio reglamento 2.01.02:2016 lentelių 3.7, 9.2 ir 9.3 [36]. Vamzdžio šilumos perdavimo koeficientas parinktas pagal Danfoss gamintojo pateiktas specifikacijas [37].

#### 2.1.1.3. Šilumnešio parametrai

Norint apibūdinti šilumnešį tyrimui reikalingi parametrai yra:

- Šilumnešio šilumos perdavimo koeficientas;
- Šiluminė talpa;
- Specifinės šilumos koeficientas;
- Dinaminė klampa;
- Tankis.

Šilumnešio tekėjimo pobūdžiui nustatyti reikalingi:

- Tekėjimo greitis;
- Tekėjimo greičio amplitudė;
- Hidraulinis diametras;
- Pulsacijos dažnis.

Priimti vandens šilumnešio parametrai pateikti 2 lentelėje:



**2 lentelė.** Šilumnešio parametrai naudojami tyrime.

Šilumnešio parametras	Vertė
Šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$	0,644
Šiluminė talpa, $J/(kg \cdot K)$	4200
Specifinės šilumos koeficientas	1
Dinaminė klampa (50 °C vandens), $Pa \cdot s$	$5,474 \cdot 10^{-4}$
Tankis (50 °C vandens), $kg/m^3$	998,1
Temperatūra, K	323,15

Pasirenkant šilumnešio greitį svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog naudojant vienfazę pulsaciją, šilumos perdavimo padidinimo efektas yra didžiausias laminariniam ir neapibrėžtajame tekėjimo režime. Didinant pulsacijos dažnį turbulentiškame sraute, šilumos perdavimo koeficientas beveik nesiskiria nuo pastovaus srauto esant tam pačiam vidutiniam šilumnešio tekėjimo greičiui. Dėl šios priežasties pasirenkamas Reinoldso skaičius neapibrėžtajame režime. Remiantis rekomenduojamu 1 l/min šilumnešio srautu naudojant šilumos siurblių oras – vanduo šilumnešio gamybai [38], nustatomas 1 m/s tiekiamo srauto greitis aukščiausiam amplitudės taške. Dėl per mažo ar per didelio turbulentiškumo, pasirinktas tyrimo skaičiavimo metodas susiduria su nestabilumu. Iš 2 formulės išvedama 3 formulė šilumnešio tekėjimo greičiui  $u$  nustatyti:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu} = \frac{998,1 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,018 m \cdot 1 m/s}{5,474 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s} = 3282 \quad (3)$$

čia:

$\rho$  – skysčio tankis,  $kg/m^3$ ;

$Re$  – tėkmės greitis, m/s;

$L$  – vamzdžio diametras, m;

$\mu$  – dinaminė skysčio klampa,  $Pa \cdot s$ .

Skaičiavimuose hidraulinis diametras priimamas, kaip vamzdžio diametras. Atlikus skaičiavimus nustatytas Reinoldso skaičius 3282 parodo jog srautas yra neapibrėžtajame tekėjimo režime.

Tiekiamo šilumnešio amplitudė yra parenkama intervale 0,01 – 0,1 m/s. Intervalas prasideda ne nuo nulinės vertės dėl programinės įrangos nestabilumo esant visiškam srauto sustojimui. Amplitudė atitinka pulsaciją vamzdžiui esant šalia vandens siurblio. Esant tokiai amplitudei, srauto tiekimo greičio vidurkis, jam tekant 18 mm vidinio diametro vamzdžiu atitinka 1,18 l/min.

Strauhalo skaičiaus vertė svyruoja nuo nulio iki vieneto, pasiekus vienatę šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas yra didžiausias. Tuo remiantis tyrime Strauhlo skaičiumi laikoma 0,9, o iš 1 formulės išvesta 4 formulė skirta pulsacijos dažniui  $f$  nustatyti:

$$f = \frac{S_t \cdot U}{L} = \frac{0,9 \cdot 0,1 \text{ m/s}}{0,018 \text{ m}} = 5 \text{ Hz} \quad (4)$$

čia:

$S_t$  – Strauhalo skaičius;

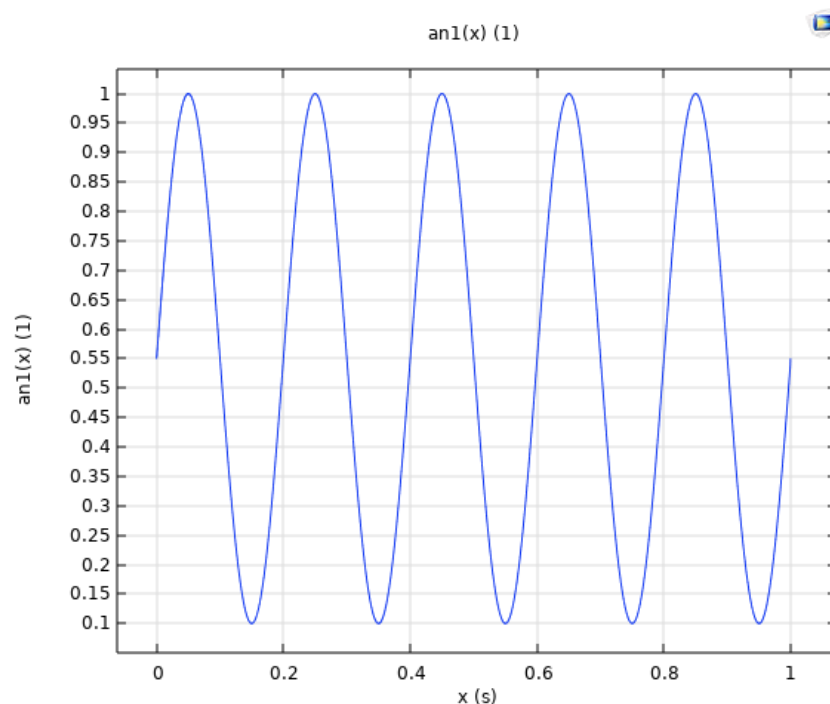
$L$  – hidraulinis diametras, m;

$U$  – skysčio tekėjimo amplitudės aukščiausia vertė, m/s.

Šilumnešio greitis esant pastoviam šilumnešio srautui nustatomas pagal pulsuojančio šilumnešio srauto tiekimo greičio vidurkį.

### 2.1.2. Tyrimo metodologija

Tyrimas atliekamas su COMSOL Multiphysics programine įranga. Darbas pradedamas sukuriant naują tyrimo failą ir sukuriant tyrimui reikalingus kintamuosius. Pulsuojančio srauto atveju tai yra pulsacijos lygtis. Pulsacijos lygtis modeliuojama atsižvelgiant jog gautas šilumnešio Reinoldso skaičius yra neapibrėžtajame tekėjimo režime, kuriam rekomenduojamas vienkryptė pulsacija. Pulsacijai naudojama sinusoidinė lygtis atitinka srauto tiekimo amplitudę iškart už vandens siurblio:  $0,45 \cdot \sin(20x \cdot (\pi/2)) + 0,55$ , lygtyje  $x$  yra laikas, matuojamas sekundėmis. Šia lygtimi atvaizduojamas diafragminio vandens siurblio veikimo principas dėl jo efektyvumo esant vienkrypčiai pulsacijai, lygtis pateikta grafiškai 22 paveikslėlyje. Pulsacija yra periodiškai kartojama iki tyrimo pabaigos.



**22 pav.** Sinusoidinė pulsacijos lygtis naudojama tyrime tekant pulsuojančiam šilumnešio srautui.

Toliau yra pradedama modeliuoti geometrija. Patariama atlikti šį žingsnį naudojantis Solidworks programine įranga. Naudojantis šia programa, esant simetriškai geometrijai, galima įkelti per pusę perskeltą modelį. Tuomet naudojantis veidrodinio skaičiavimo funkcija galima padvigubinti modelio skaičiavimo trukmę ir sumažinti nestabilumą, nes rezultatai yra atkartojami veidrodžio principu.

Šiame tyrime detalę pasirinkta modeliuoti naudojantis integruotais COMSOL geometrijos kūrimo įrankiais nenaudojant veidrodinio skaičiavimo funkcijos dėl skysčiui taikomos gravitacijos poveikio (žr. 18 pav.).

Einant programos pateikta tvarka numatytas sekantis žingsnis yra medžiagų ir jų savybių priskyrimas geometrijai. Šiame žingsnyje patartina pridėti tik medžiagos pavadinimą, be parametrų. Vėliau, kai bus sukonfigūruota modelyje skaičiuojama fizika, grįžus prie medžiagų, bus nurodyta kokie parametrai yra reikalingi simuliacijai atlikti. Taip galima išvengti spėliojimo, perteklinių duomenų ir laiko gaišimo, analizuojant kokių parametrų gali prireikti.

Vienas svarbiausių žingsnių yra sukonfigūruoti sprendimo būdą pridedant, apjungiant ir apibūdinant skirtingus fizikos reiškinius. Šiame tyrime pasirenkami trys fizikiniai reiškiniai, kuriuos modelis turi įvertinti:

- 1) Turbulencija sraute naudojantis žemo Reinoldso skaičiaus  $k-\epsilon$  skaičiavimo modeliu;
- 2) Šilumos perdavimas skystos ir kietos agregatinės būsenos objektuose;
- 3) Šilumos perdavimas neizoterminiu srautu vertinant gautus pirmų dviejų reiškinių rezultatus.

Turbulentiškumo tyrimo modelyje nurodomos srauto įtekėjimo ir ištekėjimo vietos geometrijoje, srautą apribojančios vamzdžio sienelės. Tuomet, prie srauto įtekėjimo parametrų nurodomas šilumnešio tekėjimo greitis, o pulsuojančio srauto atveju papildomai vertė dauginama su anksčiau apibūdinta sinusoidinė lygtimi, kuriai taikoma priklausomybė nuo laiko. Taip pat, įvedamos sraute esančio slėgio vertės tiek prie pradinių tyrimo verčių, tiek prie srauto ištekėjimo angos.

Šilumos perdavimo modelyje svarbu teisingai nurodyti pradines geometrijos ir srauto temperatūras, šilumos įtekėjimo ir ištekėjimo angas, pažymėti kuris geometrinis elementas yra skystis. Taip pat ne mažiau svarbus aspektas yra teisingai nurodyti ribas, kur šilumos mainai nevyksta, modelyje tai vadinama izoliacija.

Galiausiai neizoterminio šilumos perdavimo modelyje reikia nurodyti pirmus 2 modelius ir kuriais parametrais reikia vadovautis esant pasikartojančioms tų pačių parametrų vertėms.

Vėliau nustatomas tinklelio dydis, pagal kurį bus vertinami parametrai. COMSOL turi funkciją, kuri automatiškai gali sugeneruoti tinklelį pagal pasirinktus fizikos modulius, kas labai paspartina modelio kūrimo procesą. Tačiau esant pulsacijai šilumnešio sraute ši funkcija yra netinkama ir tinklelį reikia koreguoti rankiniu būdu, kad tinklelis būtų daug tankesnis ties vamzdžio sienelėmis.

Galiausia reikia pasirinkti sprendimo tipą. Priklausomas nuo laiko ir stacionarus sprendimo tipai yra pagrindiniai, tačiau yra begalės pasirinkimų, priklausomai nuo naudojamų fizikos modulių. Tyrimas atliktas naudojant priklausomą nuo laiko sprendimo tipą, tačiau jis yra išdalintas į du žingsnius. Pirmiau yra tiriamas turbulentiškumas sraute, tuomet sekančiu žingsniu, naudojant šiuos rezultatus sprendžiamas šilumos perdavimas. Tiriant pulsuojančią šilumnešio srautą reikalinga atlikti papildomus žingsnius, įsigilinant į sprendimo būdų rezultatų ir klaidų toleranciją, skaičiavimo programas bei jų tikslumą. Net ir modeliui esant itin stabiliam, tokios simuliacijos užtrunka paras ar net savaites, priklausomai nuo naudojamos pulsacijos dažnio ir amplitudės, dėl to tyrimo trukmė nustatoma atsižvelgiant į laiko sąnaudų galimybes.

Plačiau kiekvienas žingsnis modelio kūrimo ir problemos sprendimo žingsnis aprašytas išsamiauose vartotojo žinyuose [39, 40, 41].

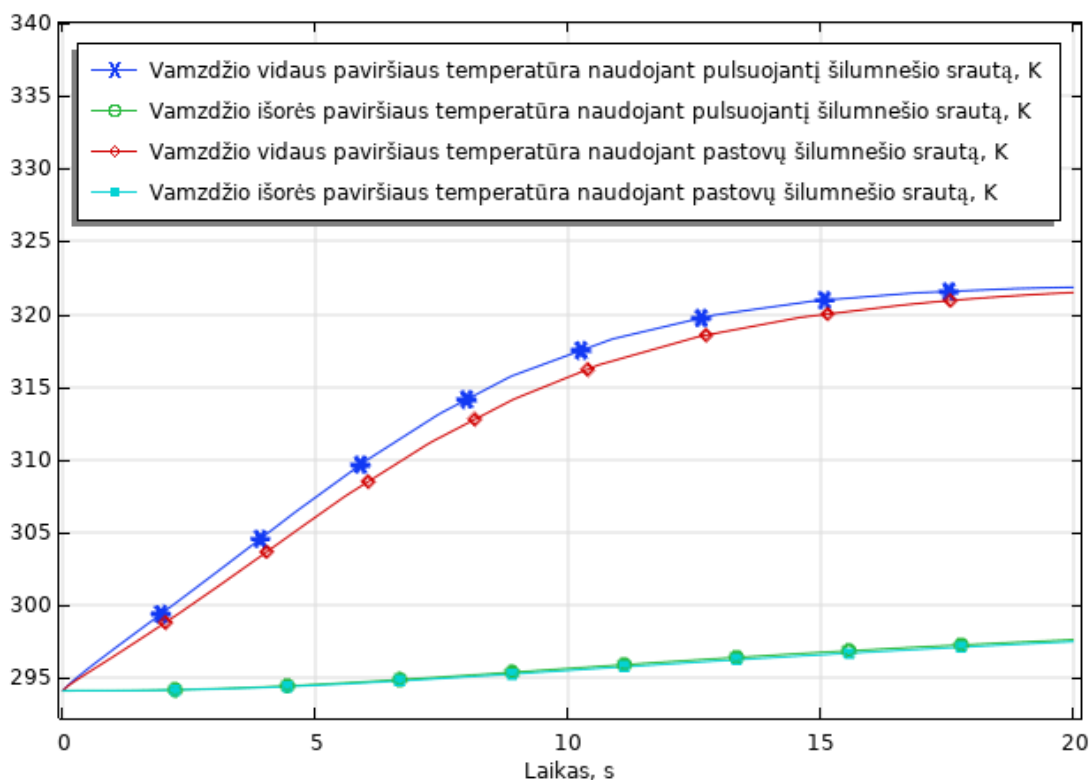
### 2.1.3. Rezultatų palyginimas

Dėl itin didelių skaičiavimo laiko sąnaudų pulsuojančio ir pastovaus šilumnešio srauto simuliacijų trukmė yra 20 sekundžių. Tyrimo metu rezultatams pilnai nusistovėti laiko neužtenka, tačiau dėl matomų tendencijų ji yra pakankama tyrimo išvadoms nustatyti.

Simuliacijai pasibaigus iš duomenų rinkinio apskaičiuojami ir pateikiami vamzdžio vidaus ir išorės paviršiaus temperatūros rezultatai naudojantis COMSOL integruotais įrankiais (žr. 23 pav.).

Rezultatuose matoma jog vamzdžio vidaus paviršiaus temperatūra naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą įšilimo metu yra nežymiai didesnė, tačiau link tyrimo pabaigos susivienodina su pastovaus šilumnešio srauto sistema. Naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą vidutinė vamzdžio vidaus paviršiaus temperatūra, vertinant visą tyrimo trukmę, yra 0,34 % didesnė nei pastovaus šilumnešio srauto.

Vamzdžio išorės paviršiaus temperatūra beveik nesiskiria tarp pulsuojančio ir pastovaus šilumnešio srauto sistemų. Naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą vidutinė vamzdžio išorės paviršiaus temperatūra, vertinant visą tyrimo trukmę, yra 0,03 % didesnė nei pastovaus šilumnešio srauto.

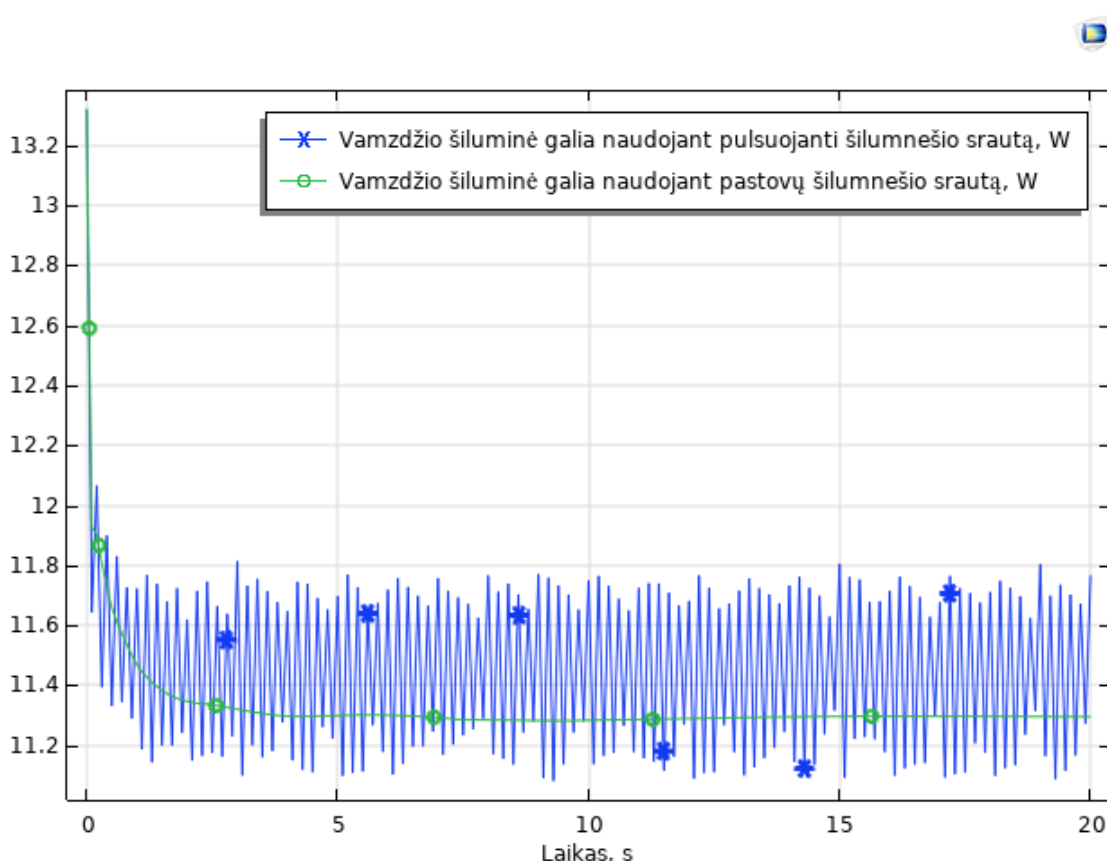


23 pav. Vamzdžio vidaus ir išorės paviršiaus temperatūros naudojant pastovų ir pulsuojantį šilumnešio srautą.

Pulsacijos sukurtas efektas yra matomas vamzdžio vidaus paviršiaus temperatūroje, tačiau jis išnyksta vamzdžiui ribojantis su užpilamo betono sluoksniu. Tai parodo jog užpilamos betono sluoksnis negeba pakankamai sparčiai priimti šiluminės energijos.

Taip pat lyginama momentinė vamzdžio skleidžiama šiluminė galia naudojant pastovų ir pulsuojantį šilumnešio srautą (žr. 24 pav.).

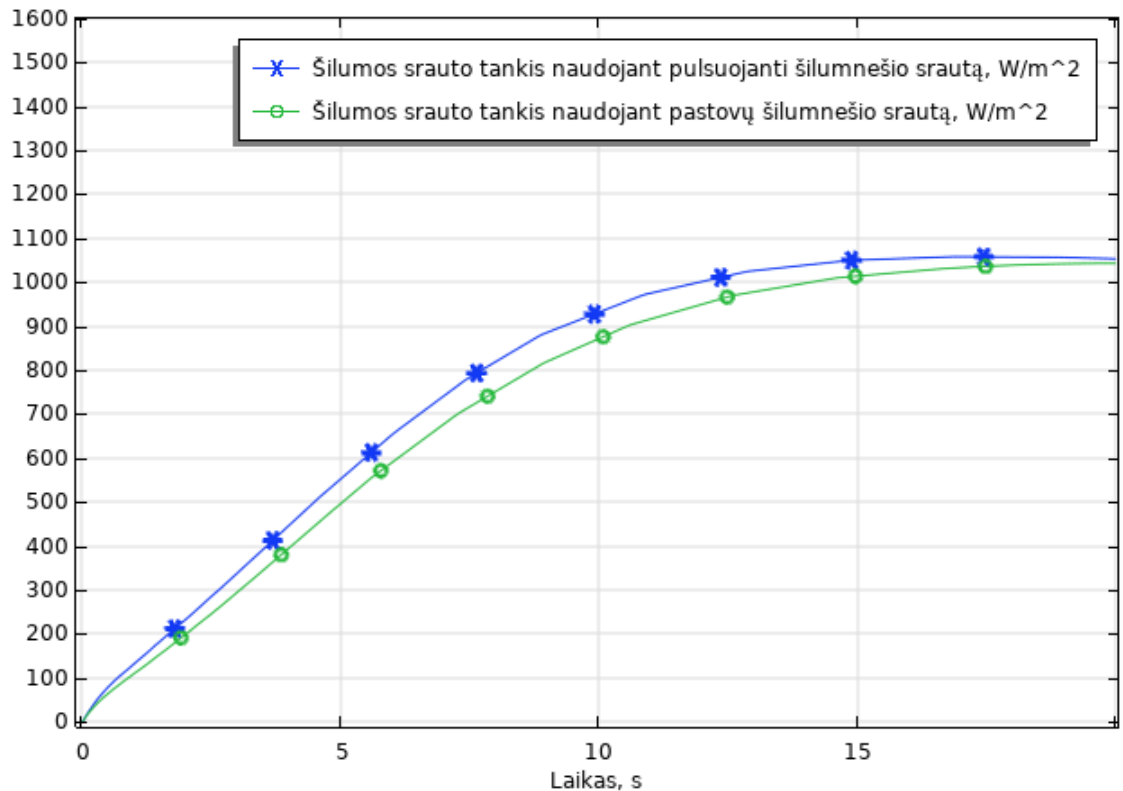
Pateiktame grafike matoma jog naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą vamzdis vidutiniškai geba skleisti daugiau šiluminės galios. Naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą vidutinė vamzdžio skleidžiama šiluminė galia, vertinant visą tyrimo trukmę, 1,17 % didesnė nei pastovaus šilumnešio srauto.



**24 pav.** Vamzdžio skleidžiama šiluminė galia naudojant pastovų ir pulsuojantį šilumnešio srautą.

Gautas rezultatas patvirtina jog sukurtas pulsacijos efektas padidina vamzdžio šiluminę galią.

Galiausia vertinamas svarbiausias parametras pulsacijos sukurtam efektui vertinti – šilumos srauto tankis (žr. 25 pav.). Grafike matoma jog išilimo metu srauto tankis yra didesnis naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą, tačiau vėliau susilygina su pastovaus šilumnešio šilumos srauto tankiu. Naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą vidutinis vamzdžio vidaus paviršiaus šiluminio srauto tankis vertinant visą tyrimo trukmę yra 5,8 % didesnis nei pastovaus šilumnešio srauto.



**25 pav.** Vamzdžio vidaus paviršiaus šilumos srauto tankis naudojant pastovų ir pulsuojančią šilumnešio srautą.

Toks rezultatas parodo jog lyginant su literatūros analizėje tyrinėtiais šaltiniais, pulsacijos efektas yra daug mažesnis. Vertinant tai jog temperatūros vamzdžio išorėje beveik nekito, o šilumos srauto tankis ir momentinė šiluminė galia susivienodino tyrimui besibaigiant, konstatuojama jog pulsacijos sukurtas efektas yra, tačiau jis yra apribotas išorinių veiksnių. Šie išoriniai veiksniai yra didelė grindų konstrukcijos šiluminė inercija ir talpa. Nors padidėjusi šiluminė galia ir šiluminis srauto tankis padidėja atsiradus pulsacijai, tačiau vamzdį supantis betonas, dėl palyginus ženkliai didesnės šiluminės masės negali pakankamai greitai priimti šilumos.

Atliekant tolimesnius pulsuojančio srauto pastatų šildymo sistemose verta daugiau dėmesio skirti mažos šiluminės masės šildymo įrenginiams, tokiems kaip konvektoriai ar aktyvaus tipo šalčio sijos.

## 2.2. Pastovaus ir pulsuojančio šilumnešio srauto grindinio šildymo sistemos energetinių parametru tyrimas baigtinių elementų metodu

Šio tyrimo tikslas – išanalizuoti, kaip skirtingi grindinio šildymo parametrai veikia bendras sistemos energijos sąnaudas. Tyrimui atlikti naudojama EQUA IDA-ICE programinė įranga.

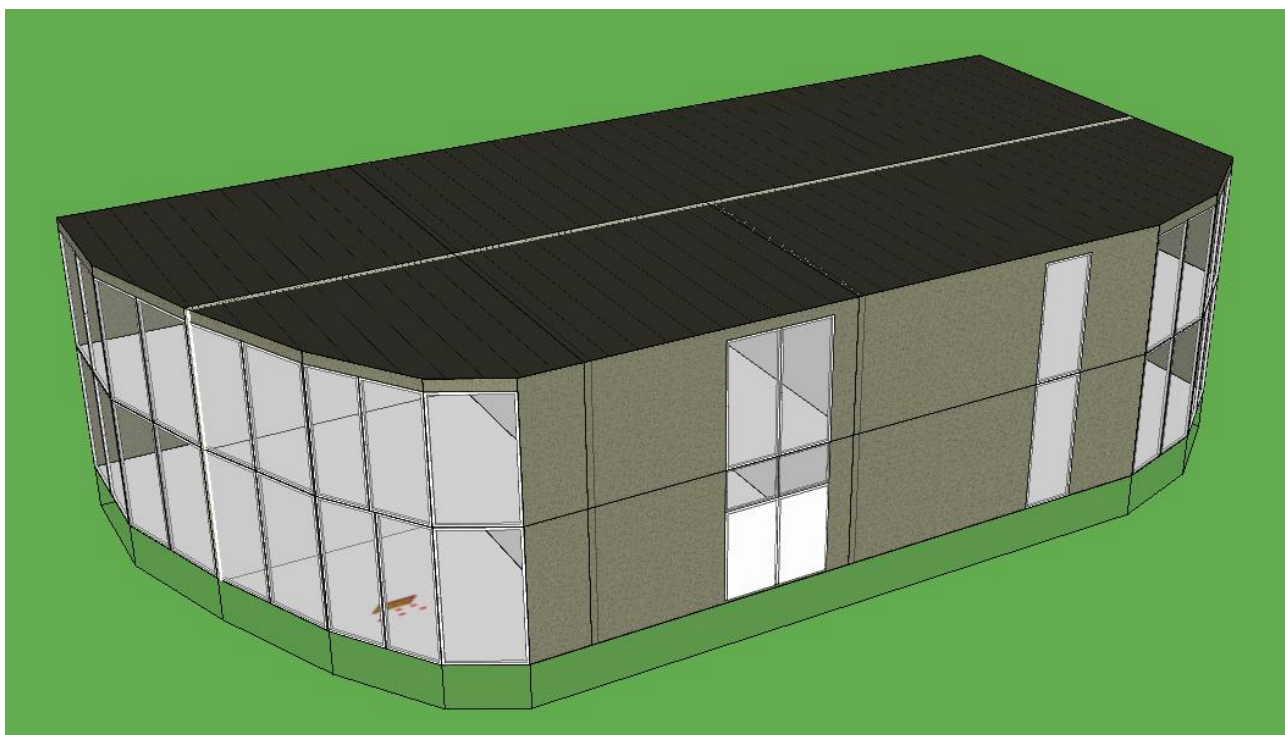
### 2.2.1. Tyrimo objektas

Tiriamas administracinės paskirties dviaukštis pastatas (žr. 26 pav.), kurio pagrindiniai geometriniai duomenys pateikti 3 lentelėje:

**3 lentelė.** Tiriama pastato geometriniai duomenys.

Parametras	Matmuo
Pastato plotas, m <sup>2</sup>	401,79
Pastato patalpų tūris, m <sup>3</sup>	1416,19
Aukštis nuo žemės paviršiaus iki lubų, m	5,75
Pastato ilgis, m	25,81
Pastato plotis, m	13

Pastatas yra dviejų aukštų su didelėmis stiklinėmis atitvaromis. Šiluminės energijos gamybai numatytas šildymas kuru, o šildymo prietaisas – grindinis šildymas.



**26 pav.** Tiriama pastato 3D vizualizacija EQUA IDA-ICE programinės įrangos aplinkoje.

### 2.2.2. Tyrimo metodologija

Tyrimui sumodeliuojama reikalinga geometrija ir įvedamos reikalingos šiluminės vertės. Pastato konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai pateikti 4 lentelėje:

**4 lentelė.** Tiriama pastato konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai ir storiai.

<b>Konstrukcijos tipas</b>	<b>Šilumos perdavimo koeficientas U, W/m<sup>2</sup>·K</b>	<b>Konstrukcijos storis, m</b>
Išorinė siena	0,1138	0,79
Stogas	0,0965	0,56
Betono perdanga	0,1665	0,62
Langai	0,9	-

Kiekvienai patalpai yra priskiriamas grindinio šildymo kontūras, kaip šildymo prietaisas. Visiems grindinio šildymo kontūrams nustatoma 40 w/m<sup>2</sup> galia ir 10 °C skirtumas tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio temperatūrų. Tiekiamo šilumnešio temperatūra nustatoma į 50 °C kaip pirmame tyrime atliktame su COMSOL programine įranga.

Patalpos oro sąlygoms kontroliuoti numatomas santykinės oro drėgmės reguliavimas nuo 20 % iki 80 %, o CO<sub>2</sub> lygis kontroliuojamas jog palaikyti nuo 700 ppm iki 1100 ppm. Taip pat pastato šildymu numatomas temperatūrinis grafikas nuo 8 val. iki 22 val. palaikant 22 °C patalpos oro temperatūrą, o nuo 22 val. iki 8 val. 19°C patalpos oro temperatūrą.

Pastatui atliekami tyrimai keičiant grindinio šildymo konfigūraciją. Siekiant įvertinti pulsuojančio šilumnešio srauto sukurtą efektą pritaikoma gauta 1,17 % didesnė galia, kaip vidinis šilumos išsiskyrimas iš įrangos, apskaičiuavus vertę pagal patalpų plotą. Lygiagrečiai vertinami galimi vidiniai šilumos išsiskyrimai dėl apšvietimo, žmonių aktyvumo ir numatytos įrangos. Tyrimas atliekamas pagal 2018 metų meteorologinius duomenis, jo trukmė yra nuo 2018-01-01 iki 2018-12-31. Tyrimo alternatyvos pateiktos 5 lentelėje:

**5 lentelė.** Tyrimo alternatyvos.

<b>Užpilamo betono sluoksnio storis, mm</b>	<b>Alternatyvos numeris</b>	
	<b>Pastovus šilumnešio srautas</b>	<b>Pulsuojantis šilumnešio srautas</b>
0 (sauso tipo)	1A	1B
65	2A	2B
70	3A	3B
75	4A	4B



### 2.2.3. Tyrimo rezultatai taikant pastovų šilumnešio srautą

Taikant pastovaus šilumnešio srauto parametrų vertes gauti suminiai energijos sąnaudų rezultatai pateikti 6 lentelėje:

**6 lentelė.** Suminis šilumos energijos suvartojimas naudojant pastovų šilumnešio srautą.

Alternatyvos numeris	Suminis metų šilumos energijos suvartojimas, kWh
1A	34606,0
2A	<b>37521,3</b>
3A	37583,1
4A	37653,0

Matoma jog didinant užpilamo betono sluoksnio storį didėja ir energijos sąnaudos šildymui, dėl to jog padidėjus konstrukcijos šiluminei talpai, lėtėja sistemos atsakas į besikeičiančią patalpų oro temperatūrą ir patalpų oras yra peršildomas vis daugiau.

Numatant sauso tipo grindis matomas ryškus energijos sąnaudų sumažėjimas. Lyginant su mažiausias energijos sąnaudas turinčia šlapio tipo konstrukcijos sistema, naudojant sauso tipo grindų konstrukciją yra sutaupoma 8.42 % energijos sąnaudų šildymui.

### 2.2.4. Tyrimo rezultatai taikant pulsuojantį šilumnešio srautą

Taikant pulsuojančio šilumnešio srauto parametrų vertes gauti suminiai energijos sąnaudų rezultatai pateikti 7 lentelėje:

**7 lentelė.** Suminis šilumos energijos suvartojimas naudojant pulsuojantį šilumnešio srautą.

Alternatyvos numeris	Suminis metų šilumos energijos suvartojimas, kWh
1B	33526,9
2B	<b>36394,9</b>
3B	36451,3
4B	36523,9

Taikant pulsuojančio sukurtą efektą taip pat matoma jog didinant betono sluoksnio storį didėja energijos sąnaudos šildymui.

Numatant sauso tipo grindis ir taikant pulsuojantį šilumnešio srautą taip pat matomas energijos sąnaudų šildymui sutaupymas. Lyginant su mažiausias energijos sąnaudas turinčia šlapio tipo konstrukcijos sistema, naudojant sauso tipo grindų konstrukciją yra sutaupoma 8,55 % energijos sąnaudų šildymui.

### **2.2.5. Rezultatų palyginimas**

Numatant šlapio tipo grindinio šildymo sistemą su 65 mm storio užpilamo betono sluoksniu ir pritaikant pulsuojančio šilumnešio srauto sukurtą efektą nustatytas 3 % energijos sąnaudų šildymui sutaupymas lyginant su tokių pačių parametų pastovaus šilumnešio srauto sistema. Šis skirtumas tiriamam pastatui sudaro 1126,4 kWh per metus.

Numatant sauso tipo grindinio šildymo sistemą ir pritaikant pulsuojančio šilumnešio srauto sukurtą efektą nustatytas 3,12 % energijos sąnaudų šildymui sutaupymas lyginant su tokių pačių parametų pastovaus šilumnešio srauto sistema. Šis skirtumas tiriamam pastatui sudaro 1079,1 kWh per metus.

Pagal gautus rezultatus galima teigti jog pulsuojančio šilumnešio srauto naudojimas sauso tipo grindinio šildymo sistemose yra efektyvesnis, dėl didesnio energijos sąnaudų pastato šildymui sutaupymo.

## Diskusija

Atlikus literatūros analizę priimta prielaida jog pulsuojančio šilumnešio srauto technologijos taikymas pastatų šildymo prietaisuose gali ženkliai sumažinti pastato energijos sąnaudas šildymui. Tačiau atlikus tyrimus nustatytos energijos sąnaudos šildymui grindinio šildymo sistemoje naudojant pulsuojančią šilumnešio srautą parodė, kad toks principas nėra itin efektyvus lyginant su kitų tyrėjų atliktais tyrimais naudojant pulsuojančią šilumnešio srautą tokiuose šildymo prietaisuose, kaip radiatoriai.

Priklausomai nuo radiatoriaus tipo tyrimuose [2, 3, 4] nustatytas iki 20 % energijos sąnaudų šildymui sutaupymas atlikus tyrimą naudojant pulsuojančią šilumnešio srautą grindinio šildymo sistemoje nustatytas vos 3 % energijos sąnaudų šildymui sutaupymas. Toks atradimas parodo jog pulsacijos sukurtas efektas yra pastato energijos sąnaudoms yra apribojamas. Dėl tokios didelio skirtumo galima priimti dvi prielaidas – šilumnešio srauto Reinoldso skaičiaus vertė nepriklausomai nuo teorinių skaičiavimų buvo turbulentiško srauto režime ir šilumos laidumą apribojo grindų konstrukcijos šiluminė talpa ir laidumo dydis. Tačiau nepaisant rezultatų tyrime atrasta patikima pulsuojančio šilumnešio srauto analizavimo šildymo prietaisuose metodologija. Lyginant su metodologija naudota kituose tyrimuose [2, 3, 4, 32, 34, 42], metodologija suformuota šiame tyrime turi ženkliai mažesnį sprendimo laiką ir tikslesnį rezultatą.

Nors rezultatai buvo mažesni nei tikėtasi, užsibrėžti tikslai ir uždaviniai buvo įvykdyti. Siekiant efektyviausių sprendinių 3 % energijos sąnaudų sutaupymas irgi yra reikšmingas. Tyrimas suteikia tvirtesnius pagrindus tolimesniems pulsuojančio šilumnešio srauto tyrimams pastatų šildymo ir vėsinimo sistemose. Verta paminėti jog didesnę dėmesį derėtų kreipti į mažos šiluminės talpos šildymo prietaisus, ypač pasiekiamą konvekcija, kaip pagrindiniu šilumos atidavimo būdu ir į eksperimentinius technologijos tyrimus.

## Išvados

1. Nustatyta [43], jog pulsuojančio šilumnešio srauto tekėjimo greitis turėtų būti laminarinio arba neapibrėžtojo režimų, dėl to, jog esant aukštam Reinoldso skaičiui, kuris indikuoja turbulentišką tekėjimo režimą, pulsacijos efektas šilumos laidumui tampa nebereikšmingas ir lyginant su pastoviu šilumnešio srautu, skirtumas yra nepastebimas.
2. Vertinant skirtingus faktorius nulemiančius grindinio šildymo sistemos inertiškumą nustatyta, kad didžiausią efektą turi vamzdžių išdėliojimo žingsnis. Mažinant žingsnio dydį yra didinamas vamzdžių kontūrų ilgis, tokiu būdu padidinant šildymo prietaiso paviršiaus plotą [25].
3. Atlikus analitinį tyrimą naudojantis COMSOL Multiphysics programine įranga nustatytas 1,17 % sistemos šiluminės galios padidėjimas. Taip pat nustatytas 5,8 % šilumos srauto tankio ir 0,34 % vamzdžio vidaus paviršiaus temperatūros padidėjimas lyginant pulsuojančią srautą su pastoviu. Tačiau vamzdžio išorės paviršiaus temperatūra beveik nepakito. Tai indikuoja jog nors pulsacijos sukurtas efektas pagerino šilumos laidumą, tačiau didelė užpilamo betono sluoksnio storio šiluminė masė ir šiluminis laidumas riboja tolimesnį šilumos perdavimą.
4. Pulsuojančio šilumnešio srauto naudojimas grindinio šildymo sistemos inertiškumui mažinti yra reikšmingas tik didelės galios sistemose. Nors šilumos srauto tankio padidėjimas yra, šį efektą slopina grindų konstrukcijos šiluminė masė ir šiluminis laidumas. Pulsuojančio šilumnešio srauto technologiją vertėtų plačiau tirti šildymo prietaisuose, kurių neriboja didelės šiluminės masės objektai.
5. Numatant šlapio tipo grindinio šildymo sistemą su 65 mm storio užpilamo betono sluoksniu ir pritaikant pulsuojančio šilumnešio srauto sukurtą efektą nustatytas 3 % energijos sąnaudų šildymui sutaupymas. Tačiau numatant sauso tipo grindinio šildymo sistemą ir pritaikant pulsuojančio šilumnešio srauto sukurtą efektą nustatytas 3,12 % energijos sąnaudų šildymui sutaupymas lyginant su tokių pačių parametrų pastovaus šilumnešio srauto sistema. Tai parodo jog pulsuojančio šilumnešio srauto naudojimas yra efektyvesnis sauso tipo grindinio šildymo sistemose.

## Literatūros sąrašas

1. DING, P., et al. Study on Heating Capacity and Heat Loss of Capillary Radiant Floor Heating Systems [interaktyvus]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 165, 114618 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114618>.
2. EMBAYE, M., AL-DADAH, R.K. and MAHMOUD, S. Thermal Performance of Hydronic Radiator with Flow Pulsation – Numerical Investigation [interaktyvus]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80, 109-117 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.056>.
3. EMBAYE, M., AL-DADAH, R.K. and MAHMOUD, S. Numerical Evaluation of Indoor Thermal Comfort and Energy Saving by Operating the Heating Panel Radiator at Different Flow Strategies [interaktyvus]. *Energy and Buildings*, 2016, 121, 298-308 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.042>.
4. EMBAYE, M., AL-DADAH, R.K. and MAHMOUD, S. Effect of Flow Pulsation on Energy Consumption of a Radiator in a Centrally Heated Building [interaktyvus]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2014, 11(1), 119-129 [žiūrėta 10/24/2021]. Prieiga per: 10.1093/ijlct/ctu024.
5. Microsoft Corp. Word [programinė įranga]. 2021 gruodžio 16 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/word>.
6. Microsoft Corp. Excel [programinė įranga]. 2021 gruodžio 16 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>.
7. *Ansys Programinės Įrangos Aprašas [Interaktyvus]*. ANSYS Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.ansys.com/content/dam/product/fluids/fluent/ansys-fluent-brochure-140.pdf>.
8. Ansys Inc. Ansys [programinė įranga]. 2021 liepos 20 [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.ansys.com/>.
9. *Ansys Vartotojo Sąsaja [Interaktyvus]*. ANSYS Inc. [žiūrėta 2021-11-15]. Prieiga per: <https://www.ansys.com/blog/solving-larger-more-complex-systems-2021-r1>.
10. COMSOL Inc. COMSOL Multiphysics 5.6 [programinė įranga]. 2020 lapkričio 11 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/>.
11. *COMSOL Multiphysics Programinės Įrangos Aprašymas [Interaktyvus]*. COMSOL Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
12. *COMSOL Multiphysics Vartotojo Sąsaja [Interaktyvus]*. COMSOL Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-use-comsol-multiphysics-a-tutorial-video/>.
13. *IDA ICE Getting Started [Interaktyvus]*. EQUA Simulations AB. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <http://www.equaonline.com/iceuser/pdf/ICE48GettingStartedEng.pdf>.
14. EQUA Simulation AB. Ida-Ice [programinė įranga]. 2020 rugsėjo 11 [žiūrėta 2021-10-12]. Prieiga per: <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
15. *EQUA IDA-ICE 4.8 SP2 Vartotojo Sąsaja [Interaktyvus]*. EQUA Simulations AB. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.equa.se/en/ida-ice>.
16. CHEN, Q., LI, N. and FENG, W. Model Predictive Control Optimization for Rapid Response and Energy Efficiency Based on the State-Space Model of a Radiant Floor Heating System [interaktyvus]. *Energy and Buildings*, 2021, 238, 110832 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110832>.
17. CHEN, T.Y. Application of Adaptive Predictive Control to a Floor Heating System with a Large Thermal Lag [interaktyvus]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(1), 45-51 [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00076-7).
18. CHOLEWA, T., et al. On the Heat Transfer Coefficients between Heated/Cooled Radiant Floor and Room [interaktyvus]. *Energy and Buildings*, 2013, 66, 599-606 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.065>.
19. *Underfloor Heating Floor Construction Types and Installation Methods [Interaktyvus]*. EcoHeatCool Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://ecoheatcool.co.uk/underfloor-heating/underfloor-heating-floor-construction/>.
20. *Dry Or Wet? Radiant Heating System Choices [Interaktyvus]*. Andy Fiefhaus and Kerry Hacker. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://www.pmenginner.com/articles/87872-dry-or-wet-radiant-heating-system-choices>.
21. MYHREN, J.A. and HOLMBERG, S. Flow Patterns and Thermal Comfort in a Room with Panel, Floor and Wall Heating [interaktyvus]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(4), 524-536 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.011>.

22. LIN, B., et al. Evaluation and Comparison of Thermal Comfort of Convective and Radiant Heating Terminals in Office Buildings [interaktyvus]. *Building and Environment*, 2016, 106, 91-102 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.015>.
23. ZHAO, K., LIU, X. and JIANG, Y. Application of Radiant Floor Cooling in Large Space Buildings – A Review [interaktyvus]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55, 1083-1096 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.028>.
24. RHEE, K. and KIM, K.W. A 50 Year Review of Basic and Applied Research in Radiant Heating and Cooling Systems for the Built Environment [interaktyvus]. *Building and Environment*, 2015, 91, 166-190 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.040>.
25. WANG, D., LIU, Y., WANG, Y. and LIU, J. Numerical and Experimental Analysis of Floor Heat Storage and Release during an Intermittent in-Slab Floor Heating Process [interaktyvus]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2), 398-406 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.028>.
26. LIU, Y., WANG, D. and LIU, J. Study on Heat Transfer Process for in-Slab Heating Floor [interaktyvus]. *Building and Environment*, 2012, 54, 77-85 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.007>.
27. SATTARI, S. and FARHANIEH, B. A Parametric Study on Radiant Floor Heating System Performance [interaktyvus]. *Renewable Energy*, 2006, 31(10), 1617-1626 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.009>.
28. JIN, X., ZHANG, X., LUO, Y. and CAO, R. Numerical Simulation of Radiant Floor Cooling System: The Effects of Thermal Resistance of Pipe and Water Velocity on the Performance [interaktyvus]. *Building and Environment*, 2010, 45(11), 2545-2552 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.016>.
29. YE, Q., ZHANG, Y. and WEI, J. A Comprehensive Review of Pulsating Flow on Heat Transfer Enhancement [interaktyvus]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 196, 117275 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275>.
30. ALBERTO, M.B., JESÚS MANUEL, F.O. and ANDRÉS, M. Numerical Methodology for the CFD Simulation of Diaphragm Volumetric Pumps [interaktyvus]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 150, 322-336 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.039>.
31. STEWART, M. 4 - Reciprocating Pumps [interaktyvus]. *Surface Production Operations*, 2019, 311-414 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809895-0.00004-1>.
32. A.E. Zohir. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows [interaktyvus]. *New York Science Journal*, 2011, 4(6)(1554-0200), 61-71 [žiūrėta 2021-10-29].
33. LUKIANAS, A., PEKUS, R. and SABAS, G. *Skysčių Mechanika Ir Vandentiekis: Vadovėlis*. 3-oji laida. Vilnius: Technika, 2009 ISBN 9789986059752.
34. MULCAHEY, T.I., PATHAK, M.G. and GHIAASIAAN, S.M. The Effect of Flow Pulsation on Drag and Heat Transfer in an Array of Heated Square Cylinders [interaktyvus]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 64, 105-120 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.017>.
35. SOLEIMANI, S. and ECKELS, S. A Review of Drag Reduction and Heat Transfer Enhancement by Riblet Surfaces in Closed and Open Channel Flow [interaktyvus]. *International Journal of Thermofluids*, 2021, 9, 100053. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053>.
36. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.01.02:2016, *Pastatų Energinio Naudingumo Projektavimas Ir Sertifikavimas [Interaktyvus]*. TAR, 2020-09-28, Nr. 20131 [žiūrėta 2021-12-05]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185/asr>.
37. Danfoss PEX Vamzdžio Techniniai Parametrai [Interaktyvus]. UAB Danfoss. [žiūrėta 2021-12-07]. Prieiga per: <https://store.danfoss.com/lt/lt/Climate-Solutions-for-heating/Grind%C5%B3-%C5%A1ildymas-vandeniu/Vamzd%C5%BEiai/PEX-vamzd%C5%BEiai%2C-20-mm%2C-120-00-m%2C-6-bar/p/088X0959>.
38. *Underfloor Heating Flow Rate Adjustment [Interaktyvus]*. Jamie Pringle. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://floorheating-direct.co.uk/2018/10/02/underfloor-heating-flow-rate-adjustment/>.
39. *CFD Module User's Guide [Interaktyvus]*. COMSOL Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>.
40. *Introduction to COMSOL Multiphysics [Interaktyvus]*. COMSOL Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: <https://cdn.comsol.com/doc/5.6/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.
41. *COMSOL Multiphysics Reference Manual [Interaktyvus]*. COMSOL Inc. [žiūrėta 2021-11-16]. Prieiga per: [https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL\\_ReferenceManual.pdf](https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf).

42. YE, Q., ZHANG, Y. and WEI, J. A Comprehensive Review of Pulsating Flow on Heat Transfer Enhancement [interaktyvus]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 196, 117275 [žiūrėta 2021-10-29]. Priega per: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275>.
43. MULCAHEY, T.I., PATHAK, M.G. and GHIAASIAAN, S.M. The Effect of Flow Pulsation on Drag and Heat Transfer in an Array of Heated Square Cylinders [interaktyvus]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 64, 105-120 [žiūrėta 2021-10-29]. Priega per: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.017>.