



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

**Pastato terminio masyvumo įtaka patalpų mikroklimatui bei  
energiniam efektyvumui**

Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Renaldas Kalvynas**

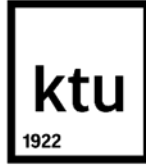
Projekto autorius

**Lekt. dr. Jurgita Černeckienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Pastato terminio masyvumo įtaka patalpų mikroklimatui bei energiniam efektyvumui**

Baigiamasis magistro studijų projektas

Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai (6211EX006)

---

**Renaldas Kalvynas**

Projekto autorius

**Lekt. dr. Jurgita Černeckienė**

Vadovė

**Prof. dr. A. Jurelionis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Renaldas Kalvynas

## **Pastato terminio masyvumo įtaka patalpų mikroklimatui bei energiniam efektyvumui**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Renaldo Kalvyno, baigiamasis projektas tema „Pastato terminio masyvumo įtaka patalpų mikroklimatui bei energiniam efektyvumui“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)





**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistrantūros studijų programa “Darnūs ir energetiškai efektyvūs pastatai”**

T000M164 MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

<b>Temos pavadinimas (lietuvių k.)</b>
Pastato terminio masyvumo įtaka patalpų mikroklimatui bei energiniam efektyvumui
<b>Temos pavadinimas (anglų k.)</b>
Influence of Building Thermal Mass on Microclimate and Energy Efficiency

<b>Trumpas projekto aprašymas</b>
<p>Magistro baigiamojo darbo projekte nagrinėjama pastato terminio masyvumo įtaka jo energetiniam efektyvumui t. y. lyginamos skirtingų medžiagiškumo konstrukcijos. Tyrimo objektas – gyvenamasis namas Kauno raj., masyvumo įtakos nustatymui naudojama kompiuterinė modeliavimo programa IDA-ICE. Lyginant energijos suvartojimą šildymui/vėdinimui šaltuoju ir šiltuoju metų laikotarpiais, leis nustatyti kuria konstrukcija geba daugiausiai absorbuoti šiluminės energijos ir reikiamu momentu ją atiduoti, siekiant pasyvaus terminės masės suvartojimo bei skatinant atsižvelgti į statyboms naudojamas konstrukcijas. Literatūros analizėje aptariama terminės masės aktyvaus ir pasyvaus panaudojimo priemonės, siekiant nustatyti kokie tyrimai, analizės yra atlikti šia tema. Sudarius individualaus gyvenamojo namo skaitmeninį modelį, patikrinti jo atitikimą su realiu pastatu bei jo energijos sąnaudomis šaltuoju laikotarpiu. Tam tikslui bus naudojamos 2018 m. vasario mėn. klimatines sąlygas Kauno rajone.</p> <p>Magistro baigiamojo darbo tikslas – išanalizuoti pastato terminio masyvumo įtaką pastato energetiniam efektyvumui bei vidaus temperatūros svyravimams šiltuoju ir šaltuoju laikotarpiu Lietuvos klimato sąlygoms.</p>
<b>Projekto pristatymo data:</b> <u>2018-12-14</u>

**Studentas**

<b>Vardas pavardė</b>	<b>Renaldas Kalvynas</b>
<b>Kontaktai</b>	<a href="mailto:renaldas.kalvynas@ktu.edu">renaldas.kalvynas@ktu.edu</a>
<b>Parašas, data</b>	

**Magistro baigiamojo projekto vadovas**

<b>Moksl. laipsnis / pedag. vardas</b>	<b>lekt. dr. Jurgita Černeckienė</b>
<b>Vardas pavardė</b>	
<b>Fakultetas</b>	<b>Statybos ir architektūros</b>
<b>Kontaktai</b>	<a href="mailto:jurgita.cerneckiene@ktu.lt">jurgita.cerneckiene@ktu.lt</a>
<b>Parašas, data</b>	

**Statinių inžinerinių sistemų studijų krypties programų komiteto sprendimas**

- Patvirtinta
- Nepatvirtinta

SPK protokolo Nr. \_\_\_\_\_

**Statinių inžinerinių sistemų studijų krypties programų vadovas**

Moksl. laipsnis / pedagog. vardas <b>Vardas pavardė</b>	<b>lekt. dr. Laura Stasiulienė</b>
<b>Fakultetas</b>	<b>Statybos ir architektūros fakultetas</b>
<b>Kontaktai</b>	<a href="mailto:laura.stasiuliene@ktu.lt">laura.stasiuliene@ktu.lt</a>
<b>Parašas, data</b>	

Patvirtina \_\_\_\_\_ dekanı įsakymu

Kalvynas, Renaldas. Pastato terminio masyvumo įtaka patalpų mikroklimatui bei energiniam efektyvumui. Magistro studijų baigiamasis projektas vadovė lekt. dr. Jurgita Černeckienė; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T).

Reikšminiai žodžiai: terminė masė, mikroklimatas, energijos poreikiai šildymui ir vėsinimui, masyvios konstrukcijos

Kaunas, 2019. 75 p.

### **Santrauka**

Magistro baigiamajame projekte nagrinėjama pastato terminio masyvumo įtaka jo energetiniam efektyvumui ir mikroklimatui, t. y. lyginamos skirtingų medžiagiškumo konstrukcijos. Literatūros analizėje aptariama terminės masės aktyvaus ir pasyvaus panaudojimo priemonės, siekiant nustatyti kokie tyrimai, simuliacijos yra atlikti šia tematika. Sudarius individualaus gyvenamojo namo skaitmeninį modelį, patikrinti jo atitikimą su realiu pastatu, lyginant energijos sąnaudas šildymui šaltuoju metų laikotarpiu. Tam tikslui bus naudojamos 2018 m. vasario mėn. klimatinės sąlygos Kauno rajone. Tyrimo objektas – gyvenamasis namas Kauno raj., siekiant nustatyti terminės masės įtaką, naudojama kompiuterinė modeliavimo programa *IDA-ICE*, kuria nagrinėjamas pirminis pastato modelis ir penkios alternatyvos. Lyginant energijos suvartojimą šildymui/vėsinimui šaltuoju ir šiltuoju metų laikotarpiais, siekiama nustatyti kuri konstrukcija geba daugiausiai absorbuoti šiluminės energijos ir reikiamu momentu ją atiduoti, siekiant pasyvaus terminės masės panaudojimo.

Kalvynas, Renaldas. Influence of Building Thermal Mass on Microclimate and Energy Efficiency. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Jurgita Černeckienė; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): technological sciences, civil engineering (02T).

Keywords: thermal mass, microclimate, energy consumption for heating and cooling, massive constructions

Kaunas, 2019. 75 pages.

### **Summary**

The Master's Final Degree Project examines the influence of the thermal mass of building on its energy efficiency and microclimate for comparisons of different materiality constructions. In the literature analysis, active and passive methods of thermal mass are discussed, in order to determine which studies, simulations are carried out on this topic. Having created a digital model of an individual dwelling house, check its relevance to the real building and its energy consumption for heating during the cold period of year. For this purpose, will be used climatic conditions of 2018 February in district of Kaunas. The object of the research is a residential house in Kaunas region, the computer modeling program *IDA-ICE* is used to determine the influence of massivity, which examines the primary model of the building and five alternatives. By comparing the energy consumption for heating / cooling for the cold and hot seasons, it will be possible to determine which construction is most capable of absorbing thermal energy and, at the right time, to give it back in order to use passive thermal mass.



## Turinys

<b>Įvadas</b> .....	16
<b>1. Literatūros analizė</b> .....	18
1.1. Pastato terminė masė .....	19
1.1.1. Pasyvus terminės masės naudojimas .....	19
1.1.2. Termiškai aktyvios pastatų sistemos .....	29
1.2. Literatūros apžvalgos išvados.....	34
<b>2. Tiriamoji dalis</b> .....	35
2.1. Tyrimo objektas.....	35
2.2. Tyrimo metodologija .....	36
2.2.1. Laiko pastovioji .....	38
2.2.2. Šiluminės inercijos dydis $D$ .....	40
2.3. Kompiuterinio pastato modelio sudarymas .....	43
2.3.1. Pastato vidaus patalpų temperatūrų nustatymas .....	43
2.3.2. Lauko oro sąlygų nustatymas .....	44
2.3.3. Pastato tūriniai ir konstrukciniai sprendimai .....	45
2.3.4. Kompiuterinio modelio patikrinimas .....	46
2.3.5. Pirminio pastato modelio vidaus temperatūros bei energijos sąnaudų analizė .....	47
2.4. Tiriamosios dalies išvados.....	50
<b>3. Alternatyvių pastato konstrukcinių sprendinių analizė</b> .....	51
3.1. Pastato vidaus temperatūros bei energijos sąnaudų analizė, kai analizuojamo pastato terminė masė padidinama .....	51
3.1.1. I alternatyva (vidaus sienos – betoninės).....	51
3.1.2. II alternatyva (išorės sienos – betoninės) .....	54
3.1.3. III alternatyva (vidaus, išorės sienos – betoninės).....	56

3.2. Pastato vidaus temperatūros bei energijos sąnaudų analizė, kai analizuojamo pastato terminė masė sumažinama .....	59
3.2.1. IV alternatyva (vidaus sienos – medinis karkasas).....	59
3.2.3. V alternatyva (vidaus, išorės sienos – medinis karkasas).....	62
3.3. Alternatyvinių pastato konstrukcinių sprendinių apibendrinimas .....	65
<b>Diskusija .....</b>	<b>68</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>69</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>70</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>73</b>

## Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Energijos šaltiniai šildymui Europos Sąjungoje 1990–2014, pagal 4 skirtingus energijos tiekimo šaltinius [3].....	18
1.2 pav. Keturių skirtingų apstatymų schemas ir keturios stebėjimo linija: a) patalpa Nr. 0; b) patalpa Nr. 1; c) patalpa Nr. 2; d) patalpa Nr. 3 [7].....	21
1.3 pav. Greičio pasiskirstymo simuliacija keturiuose skirtinguose patalpose [7].....	22
1.4 pav. Keturios skirtingos sienos detalės modifikacijos [8] .....	23
1.5 pav. Keturios skirtingos patalpos modifikacijos [8].....	23
1.6 pav. Sumažėjimo faktoriaus grafikas vasaros metu, lyginant skirtingas konstrukcijas [8].....	25
1.7 pav. Trys skirtingos konstrukcijos nagrinėjamos tyrime [9] .....	26
1.8 pav. Sienos detalės užpildyta su faze keičiančia medžiaga [11] .....	29
1.9 pav. Kiaurymėtiosios g/b perdangos plokštės su <i>Termodeck</i> ® sistema struktūra [14] .....	29
1.10 pav. Tyrime naudojamas <i>Termodeck</i> ® sistemos standas ir reikalingi komponentai [15].....	31
1.11 pav. <i>Termodeck</i> ® sistemos eksperimentinių tyrimų grafikas, išreiškiantis priklausomybę nuo dviejų parametru [15] .....	32
2.1 pav. Nagrinėjamo pastato 1-ojo aukšto planas .....	35
2.2 pav. Nagrinėjamo pastato 2-ojo aukšto planas .....	36
2.3 pav. Atstumas nuo nagrinėjamo realaus pastato iki meteorologijos stoties [25] .....	44
2.4 pav. 3D modelis, sukurtas <i>IDA-ICE</i> programa.....	45
2.5 pav. Pirminio pastato modelio išorės sienos detalė .....	45
2.6 pav. Pirminio pastato modelio vidaus sienos detalė.....	46
2.7 pav. Pirminio pastato modelio stogo detalė.....	46
2.8 pav. Pirminio pastato modelio grindų detalė.....	46
2.9 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (pirminis pastato modelis).....	48
2.10 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (pirminis pastato modelis) .....	49
3.1 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) I alternatyva.....	51
3.2 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (I alternatyva) .....	52
3.3 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (I alternatyva) .....	53
3.4 pav. Keičiama išorinė sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) II alternatyva .....	54

3.5 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (II alternatyva)	54
3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (II alternatyva)	55
3.7 pav. Keičiama išorės sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) III alternatyva	57
3.8 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) III alternatyva	57
3.9 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (III alternatyva)	57
3.10 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (III alternatyva)	58
3.11 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė b) IV alternatyva	59
3.12 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (IV alternatyva)	60
3.13 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (IV alternatyva)	61
3.14 pav. Keičiama išorės sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) V alternatyva	62
3.15 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) V alternatyva	62
3.16 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (V alternatyva)	63
3.17 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (V alternatyva)	64
3.18 pav. Metinių energijos sąnaudų šildymui diagrama	66
3.19 pav. Metinių energijos sąnaudų vėsinimui diagrama	66
1 pav. Garažo naudojimo grafikas	73
2 pav. Katilinės naudojimo grafikas	73
3 pav. Tambūro naudojimo grafikas	74
4 pav. Tualetu, vonios naudojimo grafikas	74
5 pav. Virtuvės naudojimo grafikas	74
6 pav. Svetainės naudojimo grafikas	75
7 pav. Darbo kambario naudojimo grafikas	75
8 pav. Miegamojo naudojimo grafikas	75

## Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Energijos suvartojimas šildymui, vėdinimui tiriamame pastate [2].....	20
1.2 lentelė. Atlikto tyrimo rezultatų palyginimas [8] .....	24
1.3 lentelė. Šiluminių parametru palyginimas trijų skirtingų medžiagų [9].....	26
1.4 lentelė. Konstrukcijų palyginimo lentelė [9] .....	26
1.5 lentelė. Tyrimo rezultatai lyginant tris skirtingas konstrukcijas [9].....	27
2.1 lentelė. Šiluminės inercijos dydžių palyginimas [19].....	42
2.2 lentelė. Pradinių sąlygų lentelė.....	43
2.3 lentelė. <i>HOBO</i> daviklių atliktų matavimų suvestinė .....	43
2.4 lentelė. Kauno meteorologinės stoties 2018 m. vasario mėn. duomenys, pirmoji eilutė žymi mėnesio dieną, antroji – vidutinė paros temperatūrą, °C [26].....	44
2.5 lentelė. Viršutinis dujų šilumingumas ESO Kauno skirstymo sistemoje 2018 m. vasario mėn. pirmoji eilutė žymi mėnesio dieną, antroji – dujų šilumingumą, kWh/m <sup>3</sup> [27] .....	47
2.6 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (pirminis pastato modelis) .....	49
2.7 lentelė. Nagrinėjamo pastato patalpų eksplikacija, šildymo, vėsinimo numatytosios temperatūros reikšmės .....	50
3.1 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (I alternatyva) .....	53
3.2 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (II alternatyva).....	56
3.3 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (III alternatyva) .....	58
3.4 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (IV alternatyva) .....	61
3.5 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (V alternatyva).....	64
3.6 lentelė. Metinė energijos sąnaudų, skirtų šildymui ir vėsinimui, suvestinė .....	65
3.7 lentelė. Maksimalios patalpų temperatūros, perkaitimo laikotarpiu kuomet nėra vėsinimo ...	65

## Santrumpos

- AHU – oro padavimo įrenginys (angl. *air handling unit*);
- PCM – fazę keičiančios medžiagos (angl. *phase change material*)
- PPD – numatomas nepatenkintų šilumine aplinka žmonių kiekis, procentais (angl. *percentage of dissatisfied people*)
- ŠVOK – šildymas, vėdinimas, oro kondicionavimas;
- TABS – termiškai aktyvios pastatų sistemos (angl. *thermally-activated building systems*);
- TES – šiluminės energijos akumuliacija (angl. *thermal energy storage*)
- ULWC – labai lengvas betonas (angl. *ultra-lightweight concrete*);
- $A$  – plotas, ( $m^2$ );
- $C$  – pastato vidinių paviršių aktyvioji šiluminė talpa, ( $J/K$ );
- $c$  – savitoji šiluminė talpa, ( $J/(kg \cdot K)$ );
- $c_V$  – tūrinė šiluminė talpa, ( $J/(m^3 \cdot K)$ );
- $D$  – šiluminė inercija;
- $d_{akt}$  – vidinio paviršiaus aktyvusis sluoksnis, ( $m$ );
- $H$  – pastato savitieji šilumos nuostoliai, ( $W/K$ );
- $H_T$  – pastato atitvarų savitieji šilumos nuostoliai, ( $W/K$ );
- $H_V$  – pastato vėdinimo savitieji šilumos nuostoliai, ( $W/K$ );
- $h$  – paviršiaus šilumos perdavimo koeficientas, ( $W/(m^2 \cdot K)$ );
- $R$  – šiluminė varža, ( $(m^2 \cdot K)/W$ );
- $s$  – šilumos imlumo koeficientas, ( $W/(m^2 \cdot K)$ );
- $U$  – šilumos perdavimo koeficientas, ( $W/(m^2 \cdot K)$ );
- $T$  – temperatūros svyravimo periodas, ( $s$ );
- $T_i$  – termodinaminė kūno temperatūra pradiniu laiko momentu, ( $K$ );
- $T_o$  – termodinaminė kūno temperatūra galutiniu laiko momentu, ( $K$ );
- $T_\infty$  – termodinaminė aplinkos temperatūra, ( $K$ );
- $t$  – laikas ( $s$ );
- $t_D$  – laikas iki temperatūrinio atsako, tarp priešingų atitvaros pusių ( $h$ );
- $V$  – tūris, ( $m^3$ );

$\bar{V}$  – išorės (lauko) oro patenkančio į patalpas debitas, ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  
 $\alpha$  – aušimo (šilimo) pagreitis, ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}^2$ );  
 $\chi$  – vidinio paviršiaus ploto aktyvioji šilumos talpa, ( $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ );  
 $\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas, ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ );  
 $\Delta\theta_i$  – temperatūrų skirtumas tarp kūno ir aplinkos pradinio laiko momentu, ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\Delta\theta$  – temperatūrų skirtumas tarp kūno ir aplinkos galutiniu laiko momentu, ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\rho$  – tankis, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  
 $\tau$  – laiko pastovioji, (s);  
 $\omega$  – temperatūros svyravimo dažnis, ( $1/\text{s}$ );  
 $\Psi$  – ilginio šilumos tiltelio šilumos perdavimo koeficientas, ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ).

## Ivadas

Kasmet Europoje griežtėja reikalavimai naujai statomiems pastatams ir jų energiniam efektyvumui. Šios direktyvos taip pat galioja ir Lietuvoje, kurioje nuo 2018 m. sausio 1 d. įsigaliojo nauji teisės aktai, reglamentuojantys, jog visų naujai statomų pastatų arba tų, kuriems išduoti statybos leidimai po šios datos, energetinio efektyvumo klasė turi būti ne žemesnė kaip A+. Iki 2016 m. lapkričio 1 d. statiniai turėjo atitikti B energetinio efektyvumo klasę, šilumos perdavimo koeficiento reikšmė gyvenamojo pastato stogui turėjo būti ne didesnė kaip  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , ta pati reikšmė nuo 2018 m. pradžios privalo būti ne didesnė kaip  $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [1]. Masyvesnės pastato atitvaros bei vidaus konstrukcijos didina pastato vidaus šiluminę talpą, trumpina šildymo laikotarpį, mažina energijos išteklius pastatui šildyti bei leidžia sumažinti pastato perkaitinimą karštuoju metų laikotarpiu. Projektuojant efektyviausius energetinio naudingumo pastatus, pirmenybė turėtų būti teikiama masyvioms konstrukcijoms tiek lauke, tiek viduje [1]. Akivaizdu, jog reikalavimai per dvejus metus išaugo beveik du kartus, todėl reikia ieškoti aktyvių bei pasyvių priemonių, kaip būtų galima pagerinti statinių šiluminių poreikių reikalavimus, išlaikant jiems numatytą energetinio efektyvumo klasę.

Šiame magistro baigiamajame darbe bus nagrinėjama tema, kurios tikslas – išsiaiškinti, kokią įtaką pastato masyvumas turi patalpų mikroklimatui ir energiniam efektyvumui. Ši tema išlieka labai aktuali, kadangi modeliavimo rezultatai skiriasi nuo klimatinės zonos, taip pat rezultatams įtakos turi ir kiti veiksniai: langų orientavimas šalių kryptimis, namo išdėstymo vieta kitų sklypų atžvilgiu, konstrukcijų medžiagiškumas. Toks terminės masės panaudojimo būdas yra priskiriamas prie pasyvių priemonių, pagrindiniai du veiksniai, apibrėžiantys šį procesą, yra: 1) savitoji šiluminė talpa – kiek medžiaga savyje gali sugerti šilumos kiekio; 2) terminis sugeriamumas – medžiagos savybė sugerti šilumą iš aplinkos ir laiko periodu atiduoti tą šilumą į supančią aplinką [2].

**Magistro baigiamojo darbo tikslas** – išanalizuoti pastato terminio masyvumo įtaką pastato energiniam efektyvumui ir vidaus temperatūros svyravimams šiltuoju ir šaltuoju laikotarpiu Lietuvos klimato sąlygomis.

### **Darbo uždaviniai:**

1. atlikti mokslinės literatūros analizę tema – pastatų terminio masyvumo įtaka pastato mikroklimatui bei energiniam efektyvumui. Išnagrinėti pastatų terminės masės aktyvaus bei pasyvaus naudojimo priemones;



2. sumodeliuoti individualaus gyvenamojo namo skaitmeninį modelį kompiuterine programa *IDA-ICE* ir patikrinti jo atitikimą realiam pastatui bei jo energijos sąnaudomis šaltuoju laikotarpiu. Šiam uždaviniui atlikti pasirinktos 2018 m. vasario mėnesio klimatinės sąlygos Kauno mieste;
3. keičiant skaitmeninio modelio vidaus atitvarų charakteristikas, išanalizuoti individualaus gyvenamojo namo šiltojo ir šaltojo laikotarpio energijos sąnaudas bei jų kiekybinę priklausomybę nuo pastato terminės masės.

**Magistro baigiamojo darbo tezės:**

1. masyvios vidaus konstrukcijos geba absorbuoti daugiau šiluminės energijos ir per ilgesnį laiko tarpą atiduoti į supančią aplinką lyginant su lengvomis konstrukcijomis;
2. terminis masiškumas turi didesnę teigiamą efektą pastato vėsinimo poreikiams užtikrinti negu šildymui.

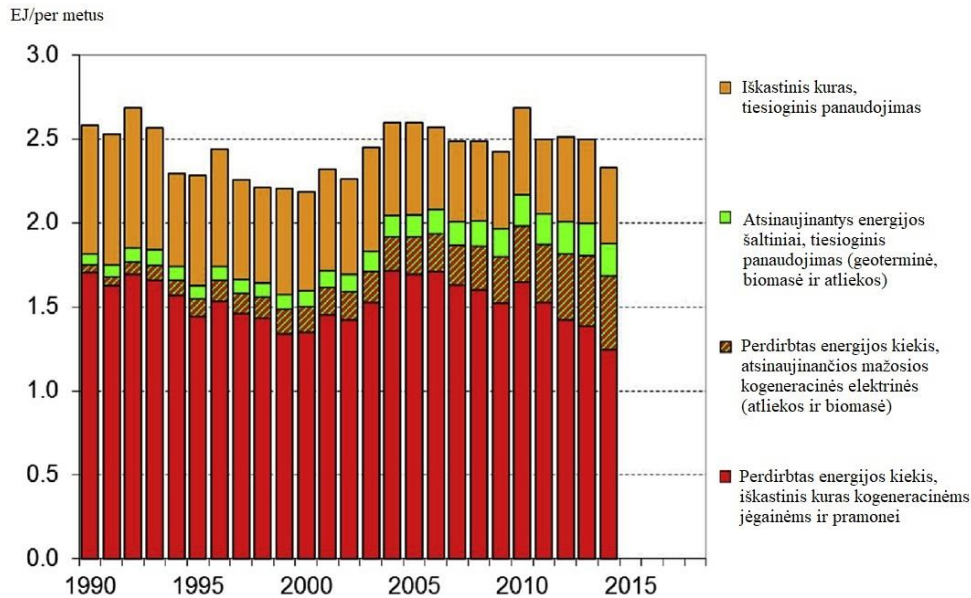
Praktiškai pritaikius šią temą, paaiškėja, jog naujai statomiems pastatams griežtėja energetinio efektyvumo reikalavimai, taip pat valstybė subsidijomis skatina pereiti prie alternatyvių energijos šaltinių. Visgi mažai užsimenama apie pastato masyvo panaudojimą jo energetiniam efektyvumui, todėl šios temos analizė ir modeliavimas padėtų lengviau apsispręsti dėl pasyvių priemonių, siekiant užtikrinti geresnius energetinius rodiklius bei tikslingai panaudoti esamą pastato konstruktyvą. Taip pat ekonomiškai įvertinus, būtų galimybė pasirinkti alternatyvias konstrukcijas, kurios išsisaugotų daugiau šiluminės energijos ir leistų tinkamai panaudoti saulės energiją įvairiais metų laikais.

Šia tematika Lietuvos klimato sąlygomis nebuvo atlikta modeliavimo tyrimų, kuriuose būtų eksperimentiškai nustatyta kokią įtaką terminė masė turi mikroklimatui ir energetiniam efektyvumui. Magistro baigiamajame darbe modeliuojamas pastatas, kurio patikimumas yra patikrinamas su realiomis energijos sąnaudomis tam tikru laikotarpiu. Galima prilyginti, jog darbe nagrinėjamas modelis yra arti realybės, todėl yra galimybė nustatyti kokios konstrukcijos turėtų didžiausią naudą pastato eksploatavimo laikotarpiu.

## 1. Literatūros analizė

Šio darbo literatūros analizės tikslas – išnagrinėti atliktus mokslinius tyrimus, kuriuose yra aptarinėjama pastato masyvo įtaka jo energiniam efektyvumui. Taip pat supažindinti, kiek energijos yra suvartojama pastatų vėdinimui ir šildymui ir kaip šiuos rodiklius būtų galima pagerinti, pasitelkiant pastato masyvumą. Pastato šiluminė būklė nėra statiška, ji nuolat kinta per tam tikrą laiką ir veikiama daugelio veiksnių: oro temperatūros lauke, saulės spinduliuotės, tenkančios atitvaroms, infiltracijos, bendro pastato sandarumo ir kitų veiksnių. Šiluma yra nepastovi ir kintanti, priklausomai nuo patalpose naudojamų vidinių konstrukcijų medžiagų ir jų šiluminių savybių.

Didžiąją dalį visų pastatų sudaro gyvenamieji ir administracinės paskirties pastatai, kurie daugiausiai energijos sunaudoja patalpų mikroklimatui užtikrinti, t. y. šildymo ir vėdinimo procesams. Reikia ieškoti aktyvių būdų, kaip sumažinti iškastinio kuro suvartojimą bei padidinti atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimą patalpų šildymui ir vėdinimui. Taip pat būtina ieškoti pasyvių sprendimo būdų, pavyzdžiui, kaip išnaudoti pastato konstrukcijų terminę masę tinkama linkme.



1.1 pav. Energijos šaltiniai šildymui Europos Sąjungoje 1990–2014, pagal 4 skirtingus energijos tiekimo šaltinius [3]

Daugelis Europos miestų, miestelių naudoja centralizuotą šildymo sistemą, todėl matoma, kad didžiausias energijos kiekis yra iš perdirbto iškastinio kuro, skirto kogeneracinėms jėgainėms ir pramonei (žr. 1.1 pav.). Puikius rodiklius pasiekusios Islandija, Danija, Švedija, Suomija, Estija,

Latvija, Lietuva, Lenkija, Rusija ir šiaurinė Kinija, šiose šalyse centrinio šildymo panaudojimas viršija 50 % nuo viso energijos suvartojimo. Gamtinės dujos – tai pagrindinis namų šildymo šaltinis, kuris užima 41 % visos rinkos. Tiesioginis atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimo padidėjimas yra jaučiamas ir ženklus, lyginant 14-os metų pastatų šildymo statistikos duomenis [3]. Pastebima, jog atsinaujinantys energijos šaltiniai vis labiau įsitvirtina ir plačiau panaudojami, tačiau bendrasis energijos poreikis nemažėja. Reikia ieškoti alternatyvių sprendimų būdų, kurie ateityje leistų sutaupyti energijos, todėl pagrindinis dėmesys šiame darbe bus skiriamas pastato masyvo terminės masės panaudojimui.

## **1.1. Pastato terminė masė**

### **1.1.1. Pasyvus terminės masės naudojimas**

Pirmiausia, terminė masė leidžia padidinti pastato inertiškumą ir sumažinti priklausomybę nuo išorės oro ir dėl to pastato vidaus temperatūra mažiau kinta. Visgi šių terminių išteklių panaudojimas turi ir neigiamą padarinį – pastatas tampa energijos „saugykla“. Kaip ir buvo minima įvade, terminė masė priklauso nuo dviejų pagrindinių veiksnių: savitosios šiluminės talpos ir šilumos perdavimo koeficiento (angl. *thermal admittance*) [2]. Masyvios konstrukcijos, tokios kaip gelžbetonio perdangos, kolonos, pertvaros, pasižymi žema terminės masės difuzija, vadinasi, šiluma lėtai perduodama per medžiagą, gali išsaugoti didelius šilumos kiekius ir mažiau jautriai reaguoja į temperatūros pasikeitimus supančioje aplinkoje. Lengvos konstrukcijos – medinis karkasas, aliuminio profiliai ir gipso kartono plokštės, gaunančios tiesioginių saulės spindulių, greitai sušyla ir atiduoda šilumą į patalpą konvekcijos būdu. Sunkios konstrukcijos geba absorbuoti daugiau šilumos, išlaikydamos pastovią medžiagos temperatūrą [4].

Mokslininkų Alonso ir Mathiseno [2] atliktame tyrime buvo nagrinėjamas administracinės paskirties pastatas. 1985 m. statytas, tačiau 2013–2014 metais renovuotas statinys buvo priskirtas prie nulinės energijos pastatų (angl. *zero emission buildings*), kurie pasižymi aukšta šilumine varža ir sandarumu. Tai pirmas toks pastatas Norvegijoje, kuris po renovacijos priskirtas prie tokių mažai energijos vartojančių pastatų. Pagrindinis tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kiek galima sutaupyti energijos panaudojant pastato vidaus konstrukcijų terminę masę [2]. Per 15 dienų buvo surinkti pradiniai duomenys, reikalingi modeliui, t. y., atitvarų temperatūros, orientuotos skirtingų pasaulio šalių atžvilgiu. Taip pat buvo vertinamas darbuotojų skaičius pastate, kadangi padidėja CO<sub>2</sub> dujų koncentracija, reikalingas geresnis vėdinimas. Pagrindiniai trūkumai, kurie galėjo lemti klaidos tikimybę, buvo neatlikti matavimai: saulės spinduliuotės, debesuotumo bei šešėliavimo [2].

Modeliavimui buvo pasirinkta kompiuterinio modeliavimo programa *IDA-ICE*, kuri skirta šiluminiam pastatų mikroklimatui nustatyti, įvertinant energijos suvartojimus visam statiniui [5]. Tyrime buvo lyginami keturi skirtingi vidaus konstruktyvai: (1) konstrukcijos, esančios realiame pastate, (2) visos vidinės sienos – betoninės, (3) medinis karkasas, (4) betoninės sienos su kontroliuojamais langais [2].

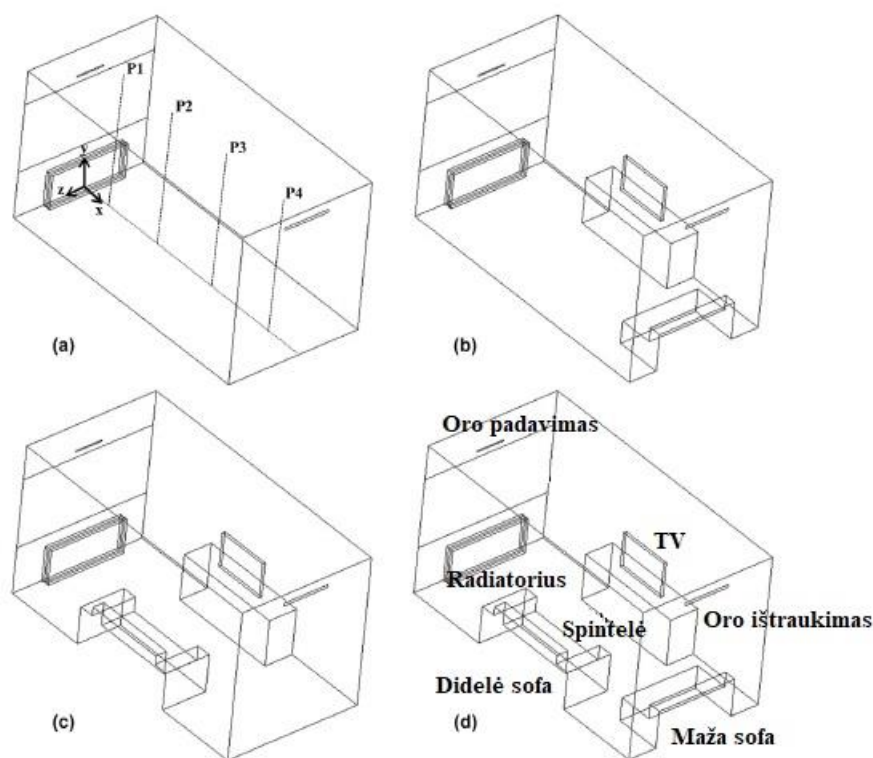
1.1 lentelė. Energijos suvartojimas šildymui, vėdinimui tiriamame pastate [2]

Pastato vidaus konstruktyvai	Šildytuvų, veikiančių be energijos nuostolių, energijos suma	Šildytuvų, veikiančių per vėdinimo įrenginį energijos suma	Vėdinimo įrenginių energijos suma	Vėdinimo įrenginių, veikiančių be energijos nuostolių energijos suma	Energija iš sienų, skirta šildymui	Energija iš sienų, skirta vėdinimui
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
(1)	102059	92031	12034	9	790	1286
(2)	92659	99109	11192	310	2059	1630
(3)	106020	91879	12044	6	-130	730,03
(4)	104207	91932	10590	4	2350	1747

Šio tyrimo išvadose yra teigiama, jog tik naudojant masyvias konstrukcijas su kontroliuojamu vėdinimu (šiuo atveju su automatiniu langų atidarymu) galima sumažinti mažą dalį energijos kiekio, skirtą šildymui, tačiau net iki 12 % galima sumažinti energijos sąnaudas vėdinimui. Ši išvada negali būti pritaikoma kitoms šalims, kurioms būdingos skirtingos klimato sąlygos, vidaus temperatūros ir saulės spinduliuotė. Kai yra projektuojamas nulinės energijos pastatas, pasitelkus šią sistemą nėra pasiekiami numatyti reikalavimai, todėl reikėtų panaudoti kitas priemones, norint pasiekti nulinės energijos pastato statusą. Sprendimai turėtų būti kombinuojami su ventiliuojamomis vėdinimo sistemomis, laisvai žeme judančiu vėdinimu bei masyviomis konstrukcijomis, kuriuos sujungiant turėtų būti padaryti papildomi tyrimai [2].

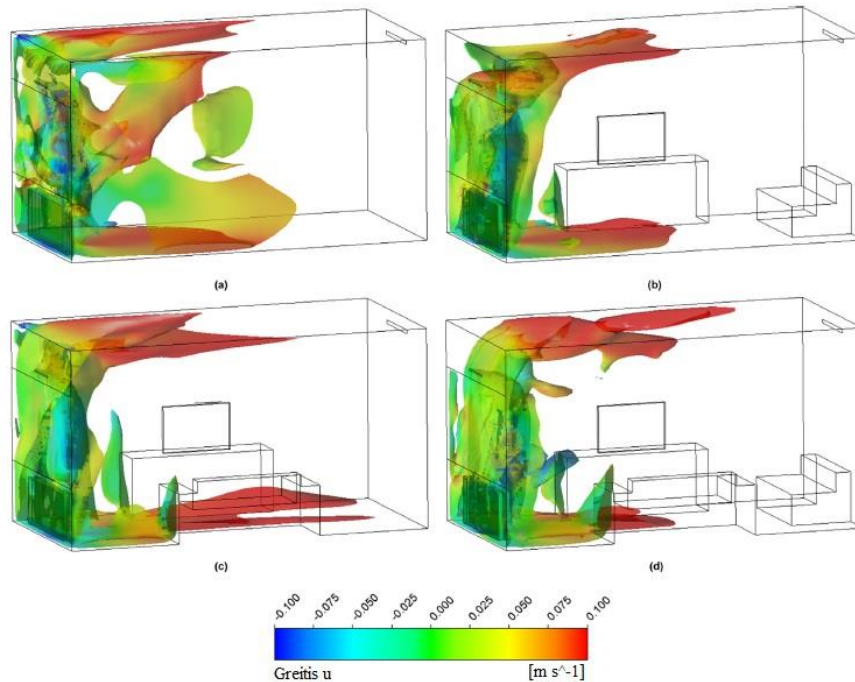
Termodinamikoje pastatas dažniausiai apibrėžiamas kaip surenkamas iš atskirų sistemų arba terminių zonų. Kiekviena iš jų sudaryta iš tam tikro laidumo ir šiluminės inercijos. Pastato terminės masės pasiskirstymui didelę įtaką turi patalpoje esantys baldai ir jų išdėstymas, kadangi šilumos mainai vyksta konvekcijos būdu, kai patalpoje esantis oras susimaišo su tiekiamu šviežiu oru. Taip pat šiluma sklinda bangomis, kurios kryptį gali sutrukdyti baldai ar kita buitinė technika. Įrengimai, esantys patalpoje, gali pakeisti oro srautą ir turėti įtakos vėdinimo efektyvumui ir konvekcijos būdu perduodamai šilumai. Taip pat baldai gali atspindėti, skleisti ar sugerti saulės spinduliavimą, vidinį šilumos perteklių greitai išleisti į aplinką [6].

Y. Horikiri atliktame tyrime [7], modeliuojant kompiuterinių fluidų dinamikos programa *ANSYS Fluent*, buvo vertinama baldų apstatymo įtaka patalpos vietiniam šiluminiam komfortui. Buvo apskaičiuojamas oro pritekėjimas ir temperatūros pasiskirstymas trijų dimensijų modeliavimo patalpoje, naudojant reguliuojamą tęstinumą, impulso ir energijos lygtis. Tyrime siekiama išaiškinti, kokią įtaką patalpoje esantys baldai turi terminei dinamikai. 1.2 pav. yra pavaizduota nagrinėjamo tyrimo eksperimentinė-modeliuojama dalis, paveiksle išskiriamos keturios skirtingos nagrinėjamos situacijos: 1) patalpa be apstatytų baldų, tik su šilumos šaltiniu; 2) patalpa su staliuku, televizoriumi ir maža sofa; 3) patalpa su staliuku, televizoriumi ir didele sofa; 4) pilnai apstatyta patalpa.



1.2 pav. Keturių skirtingų apstatymų schemas ir keturios stebėjimo linija: a) patalpa Nr. 0; b) patalpa Nr. 1; c) patalpa Nr. 2; d) patalpa Nr. 3 [7]

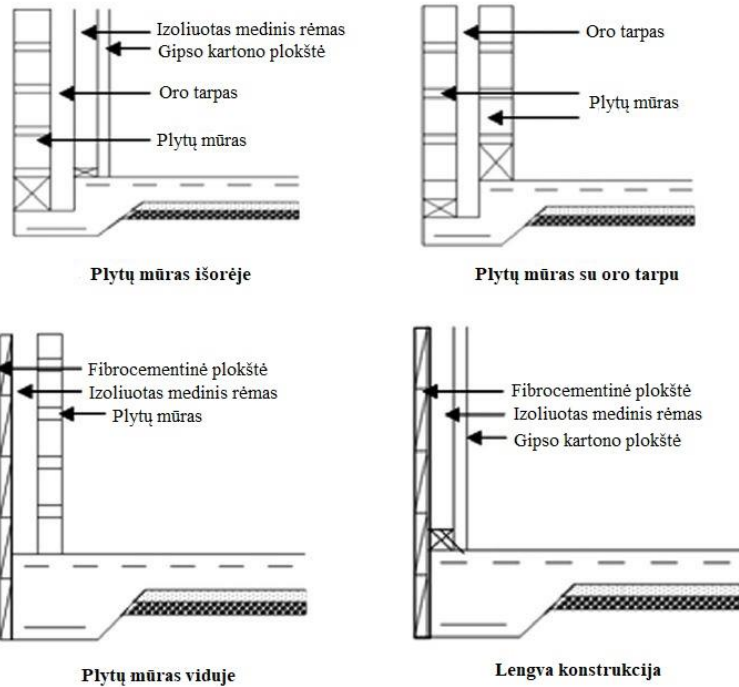
Taip pat nagrinėjamoje patalpa yra vertinami dveji žmonės, sėdintys ant skirtingų sofų. Tam tikslui yra įvertinami rodikliai: prognozuojama vidutinė reikšmė (angl. *predicted mean vote (PMV)*) ir prognozuojama nepasitenkinusių dalis (angl. *predicted percentage of dissatisfied (PPD)*).



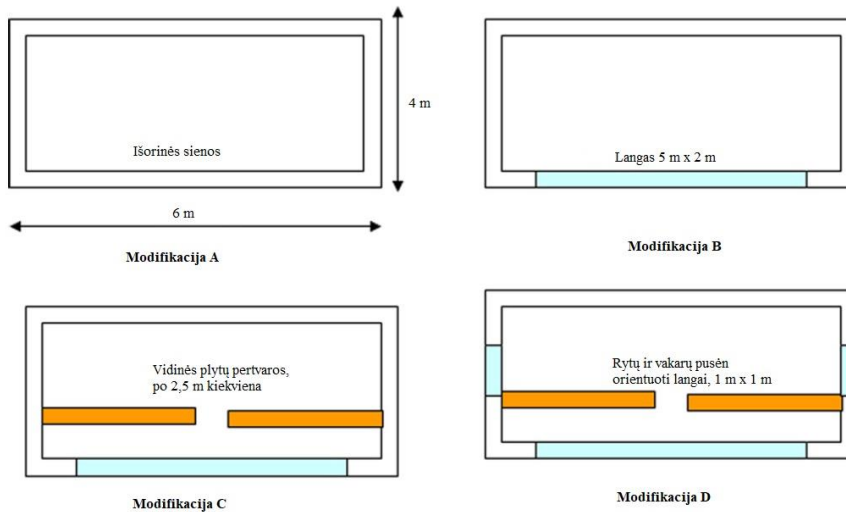
1.3 pav. Greičio pasiskirstymo simuliacija keturiose skirtingose patalpose [7]

Atliktas tyrimas nurodo, jog baldai kambario temperatūrai ir oro srauto pasiskirstymui turi nedidelę įtaką. Daugiau įtakos sudaro patalpose esantis žmogus ir televizorius, kurie išskiria šiluminę energiją, turinčią įtakos patalpos komfortinei temperatūrai. Lyginant neapstatytą patalpą ir apstatytą su įjungtu televizoriumi, žmonės jaučia temperatūros pasikeitimą, todėl turima įtakos *PPD* rodikliui, kuris pakyla 8.6 % ir tai reiškia, kad toks procentas apklaustųjų jaučiasi nekomfortiškai tokioje aplinkoje. Toks modeliavimas yra naudingas paprastiems gyventojams, kurie nori atrasti balansą tarp šiluminio komforto ir energijos taupymo [7].

Moghtaderi ir Gregory [8] atliktame modeliavimo tyrime buvo nagrinėjamos keturios skirtingos sienų detalės, paplitusios Australijoje statomuose namuose, pavaizduotos 1.4 pav. Taip pat nagrinėjami keturių skirtingų modifikacijų pastato modeliai, kurie pateikiami 1.5 pav., siekiant įvertinti terminės masės įtaką, kai yra naudojamos atitvaros – langai. Tyrimo tikslas – nustatyti kokią įtaką pastato mikroklimatui ir energetiniam efektyvumui turi išorės ir vidaus sienos. Modeliavimas atliekamas Australijos klimato sąlygomis, kas lemia, jog yra dideli temperatūriniai svyravimai dienos ir nakties metu, kada temperatūros skirtumas gali siekti virš 20 °C. Tyrimas aktualus statybininkams ir architektams, siekiantiems darnaus ir tvaraus statybinių konstrukcijų panaudojimo, gaunant didesnę pastato pridėtinę vertę ir mažinant energijos sąnaudas šildymui ir vėsinimui.



1.4 pav. Keturios skirtingos sienos detalės modifikacijos [8]



1.5 pav. Keturios skirtingos patalpos modifikacijos [8]

Atliekami skaitmeniniai skaičiavimai programinės įrangos paketu *AccuRate*, kuris leidžia nustatyti, koks energijos poreikis yra reikalingas šildymo ir vėsinimo procesams patenkinti, siekiant užtikrinti nustatytas temperatūras pagal patalpos mikroklimatą. Pagal energijos suvartojimus vienam kvadratiniam metrui pastato, programa skiria įvertinamą dešimties balų sistemoje. Aukščiausiu įvertinimu vertinami pastatai, sunaudojantys labai mažai energijos arba visai nenaudojantys (pasyvūs) namai, pavyzdžiui, Niukaslo mieste Australijoje 10 balų yra įvertintas pastatas, kurio per metus energijos sąnaudos tesiekia  $6 \text{ MJ/m}^2$ , o vienetu įvertintu pastato

energijos sąnaudos yra net 58 kartus didesnės lyginant su energetiškai labai efektyviu pastatu, t. y. net 349 MJ/m<sup>2</sup>. Siekiant vienodų sąlygų modeliavimui, pastato vieta ir orientacija pasaulio šalių atžvilgiu išlaikoma ta pati, taip pat grindys ir stogas visose keturiose modifikacijos yra vienodi, t. y. 100 mm gelžbetonio storio grindys ir 22° medinių gegnių konstruktyvas [8]. Atlikto tyrimo rezultatai yra pateikiami 1.2 lent.

1.2 lentelė. Atlikto tyrimo rezultatų palyginimas [8]

Modifikacija	Plytų mūras išorėje		Plytų mūras viduje		Plytų mūras su oro tarpu		Lengva konstrukcija	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
	MJ/m <sup>2</sup>	balai	MJ/m <sup>2</sup>	balai	MJ/m <sup>2</sup>	balai	MJ/m <sup>2</sup>	balai
A	70,9	5,8	75,3	5,5	140,6	3,4	79,6	5,3
B	105,4	4,3	79,5	5,3	100,1	4,4	90,7	4,8
C	69,3	5,9	56,0	6,6	67,1	5,9	77,9	5,4
D	93,1	4,7	74,4	5,5	90,5	4,8	102,3	4,4

1.2 lent. pirmame stulpelyje yra pateikiamos energijos sąnaudos šildymui ir vėsinimui per metus, antrame – *AccuRate* programa atliktas vertinimas dešimties balų skalėje, pagal numatytus Australijos normatyvus. Iš rezultatų galima spręsti, jog mažiausias energijos sąnaudų ir didžiausias vertinimas pasiekiamas, kai yra naudojamas plytų mūras viduje ir pastatas neturi langų vakarų ir rytų kryptimis. Taip pat sienos konfigūracija su plytų mūrų viduje turi mažiausius energijos nuokrypius lyginant skirtingos modifikacijos pastatus, kas lemia šios konstrukcijos pastovumą skirtingomis sąlygomis. Lyginant šios konstrukcijos sienas su lengvomis konstrukcijomis, yra pasiekiamas 28 % mažesnis energijos suvartojimas, kas lemia geresnius mikroklimato ir energetinio efektyvumo rodiklius [8]. Plytų mūro konstrukcijos patikimumą apibrėžia sumažėjimo faktorius, kuris išreiškiamas formule:

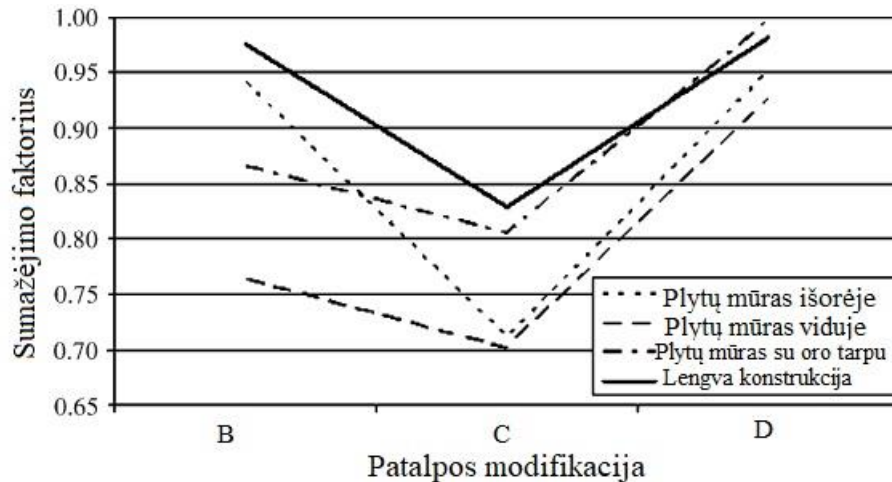
$$\text{sumažėjimo faktorius} = \frac{T_i - T_D}{T_o - T_D}; \quad (1.1)$$

čia  $T_i$  – vidutinė paros temperatūra patalpos viduje (°C);

$T_D$  – siekiama vidaus patalpos temperatūra (°C);

$T_o$  – vidutinė paros temperatūra lauke (°C).





1.6 pav. Sumažėjimo faktoriaus grafikas vasaros metu, lyginant skirtingas konstrukcijas [8]

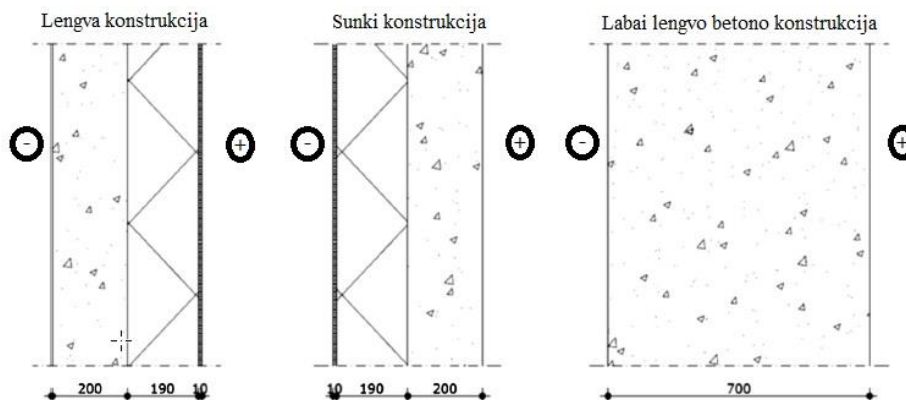
Pateiktame 1.6 pav. galima matyti, jog plytų mūro, esančio patalpos viduje, sumažėjimo faktorius yra mažiausias, kas lemia didesnius absorbuojamos energijos kiekius dienos metu, taip pat jos atidavimą nakties periodu, kada nukrinta lauko temperatūra. Šis faktorius apibrėžia terminės masės išsiskyrimą patalpoje ir yra atvirkščiai proporcingas šiluminės energijos išsiskyrimui nagrinėjamoje patalpoje t. y. kuo sumažėjimo faktorius mažesnis, tuo daugiau energijos konstrukcija gali atiduoti į supančią aplinką, pasiekiamas geresnis mikroklimato rodiklis ir sutaupoma daugiau energijos [8].

Prieš tai aprašytuose tyrimuose masyvi konstrukcija – gelžbetonis dominuoja kaip pagrindinė terminės masės medžiaga, kuri gali didelį energijos kiekį sugerti ir per laiko tarpą atiduoti į supančią aplinką. Visgi, iškyla problema, kad tokioms konstrukcijoms reikia daugiau laiko įšilti ir atvėsti, taip pat iš konstrukcinės pusės žiūrint joms reikia ir stipresnių pagrindų, kas perspektyvoje padidina statybos kaštus. Analizuojant literatūrą, buvo aptiktas vienas mokslinis straipsnis, kuriame nagrinėjamas labai lengvo betono panaudojimas. Ši medžiaga dar nėra pritaikoma praktikoje, kol kas yra nagrinėjama teoriškai ir siekiama nustatyti jos pritaikymo galimybės realiomis sąlygomis. Labai lengvas betonai – tai įprastinis cemento mišinys, kurio užpildai: smėlis ir žvirgždas, pakeičiami perdirbtu stiklu ir mikro silicio dioksidu. Tai leidžia padidinti oro ertmes, kadangi oro tarpai pasidaro didesni, taip pagerinamas medžiagos šilumos laidumas. Tokio betono stipris gniuždant siekia iki  $10 \text{ N/mm}^2$ , šis rodiklis yra dvigubai geresnis lyginant su keramzitbetonio blokelių stipriu, kuris tesiekia iki  $5 \text{ N/mm}^2$  [9]. Pagrindiniai terminę masę apibrėžiantys parametrai pateikiami ir palyginami 1.3 lent.

1.3 lentelė. Šiluminių parametrų palyginimas trijų skirtingų medžiagų [9]

Parametras	Žymuo	Matavimo vienetas	Labai lengvas betonas	Izoliacinė medžiaga	Betonas
Šilumos laidumas	$\lambda$	W/(m·K)	0,14	0,04	2,0
Tankis	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	800	20	2400
Savitoji šiluminė talpa	$c_p$	J/(kg·K)	870	840	850
Šiluminė difuzija	$\alpha$	mm <sup>2</sup> /s	0,20	2,37	0,97
Šiluminė efuzija	$\varepsilon$	J/(K·m <sup>0,5</sup> ·s <sup>0,5</sup> )	312	26	2019

Labai lengvo betono tankio reikšmė yra tris kartus mažesnė negu įprasto betono, o savitoji šiluminė talpa yra šiek tiek geresnė. Šiame tyrime bus nagrinėjamos ir lyginamos trys skirtingos konstrukcijos: 1) lengva konstrukcija; 2) masyvi konstrukcija – betoninė siena; 3) labai lengvo betono konstrukcija. Šios trys skirtingos detalės yra pateikiamos 1.7 pav. o charakteristikos apibūdinamos 1.4 lent.



1.7 pav. Trys skirtingos konstrukcijos nagrinėjamos tyrime [9]

1.4 lentelė. Konstrukcijų palyginimo lentelė [9]

Konstrukcija	Storis, m	Šilumos laidumas, W/(m·K)	Šilumos laidumo koeficientas W/(m <sup>2</sup> ·K)	Vidinio paviršiaus šiluminė talpa kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
<b>Lengva:</b>	0,4	-	0,20	11
Betonas	0,2	2,0		
Izoliacinė medžiaga	0,19	0,04		
Tinkas	0,01	0,14		
<b>Sunki:</b>	0,4	-	0,20	94
Tinkas	0,01	0,14		
Izoliacinė medžiaga	0,19	0,04		
Betonas	0,2	2		
Labai lengvas betonas	0,7	0,14	0,19	30

Kaip matome iš pateiktos 1.4 lent. labai lengvas betonas pasižymi geromis šiluminėmis savybėmis, tačiau sienos storis išauga iki 700 mm, kas sumažina patalpos naudingąjį plotą. Tyrime

nagrinėjamas administracinės paskirties pastatas, modeliavimui pasirinkta *EnergyPlus* programa, kurios pagalba bus nustatomas energijos suvartojimas lyginant tris konstrukcijas. Tyrimui įvedamas papildomas parametras – nakties vėdinimas, kuomet patalpos nakties metu yra išvėdinamos ir susikaupęs užterštas oras yra pašalinamas [9]. Nakties vėdinimo strategija turi didelę teigiamą įtaką terminės masės efektyvumui pastatuose [10]. Nagrinėjamas pastatas yra Amsterdame Olandijoje, įprastinė ŠVOK sistema yra pakeičiama idealiomis sąlygomis veikiančia sistema, kuri įprastai yra naudojama modeliavimo tyrimuose. Šildymui ir vėsinimui reikalingos energijos kiekis yra pateikiamas 1.5 lent. Šiame gerai apšildytame pastate su dideliais vidiniais pritekėjimais didžiausią įtaką turi energija, skirta vėsinimo poreikiams užtikrinti. Lengvos konstrukcijos sienos yra apšildytos iš vidaus, kas ženkliai sumažina išorinius ir vidinius pritekėjimus į konstrukciją, ir ženkliai padidina energijos sąnaudas, skirtas vėsinimui. Galima pastebėti, kad patalpų vėdinimas naktį turi ženklų įtaką bendram energijos suvartojimui, nepaisant to, kad suvartojamos šilumos poreikis išauga.

1.5 lentelė. Tyrimo rezultatai lyginant tris skirtingas konstrukcijas [9]

		Lengva konstrukcija	Sunki konstrukcija	Labai lengvo betono konstrukcija
Šildymas (kW·h/m <sup>2</sup> )	Be vėdinimo naktį	4,7	7,8	7,3
	Su vėdinimui naktį	8,3	9,0	8,4
Vėsinimas (kW·h/m <sup>2</sup> )	Be vėdinimo naktį	33,2	22,5	23,4
	Su vėdinimui naktį	12,4	12,4	13,7

Bendros energijos sąnaudos su vėdinimu naktį (kW·h/m<sup>2</sup>):

- lengvos konstrukcijos – 20,7;
- sunkios konstrukcijos – 21,4;
- labai lengvo betono konstrukcijos – 22,1.

Bendros energijos sąnaudos be vėdinimo naktį (kW·h/m<sup>2</sup>):

- lengvos konstrukcijos – 37,9;
- sunkios konstrukcijos – 30,3;
- labai lengvo betono konstrukcijos – 30,7.

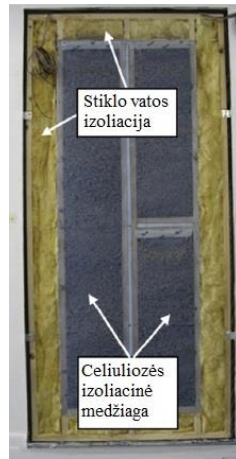
Galima daryti prielaidą, jog geriausias rezultatas pasiekiamas su labai lengvu betonu, kai nėra vėdinimo naktį, tada energijos sąnaudos yra 19 % mažesnės lyginant su lengvomis konstrukcijomis, tačiau 6 % didesnės, kai yra vėdinamos patalpos nakties metu.

Vis dažniau pastatuose ir pramonės sektoriuje yra naudojamos šiluminės energijos akumuliacijos (TES) sistemos, vis plačiau yra pritaikomos fazę keičiančios medžiagos. Šios

medžiagos pasižymi savybe savo tūryje kaupti šilumą ir kai temperatūra nukrinta, ją atiduoti į aplinką [11]. Fazę keičiančios medžiagos (PCM) yra klasifikuojamos į tris pagrindines grupes: organines, neorganines ir eutektinio mišinio. Eutektinis mišinys – tai dviejų skirtingų medžiagų kombinacija, kaip pavyzdžiui, organinis-organinis, neorganinis-neorganinis ir šių dviejų tipų mišinys. PCM organinės medžiagos gali būti: parafinai, riebalų rūgštys, polietilenglikolis, alkoholiai ir jų produktai. Šie cheminiai produktai yra pranašesnis lyginant su neorganiniais junginiais, kadangi jie pasižymi geresnėmis šiluminėmis savybėmis, taip pat jų panaudojimas ir pritaikymas yra saugesnis. Plačiausiai naudojamas parafinas, kaip TES medžiaga. Nevisos PCM medžiagos gali būti naudojamos pastatuose, skirtingos cheminės sudėties elementai, turi skirtingas šilumines savybes [12]. Pagrindinės termodinaminės šių medžiagų savybės yra šios:

1. lydymosi temperatūra – priimama kaip numatytoji patalpos temperatūra, kurioje PCM medžiaga veiks;
2. didelis šiluminės sintezės kiekis leidžia pasiekti geresnius šiluminius rodiklius, sunaudojant mažiau medžiagos;
3. didelis tankis užtikrina, jog mažiau medžiagos bus sunaudota konstrukcijoje;
4. aukšta savitoji šiluminė talpa leidžia geriau akumuliuoti šilumą;
5. didelis šilumos laidumas leidžia reaguoti į net menkiausius temperatūrinius pasikeitimus, o tai padeda medžiagai greičiau įšilti ar atiduoti šilumą;
6. maži tūrio pasikeitimai, fazės keitimosi metu ir mažas garų slėgis, reguliuojant temperatūrą, leidžia išvengti medžiagos izoliavimo problemų.

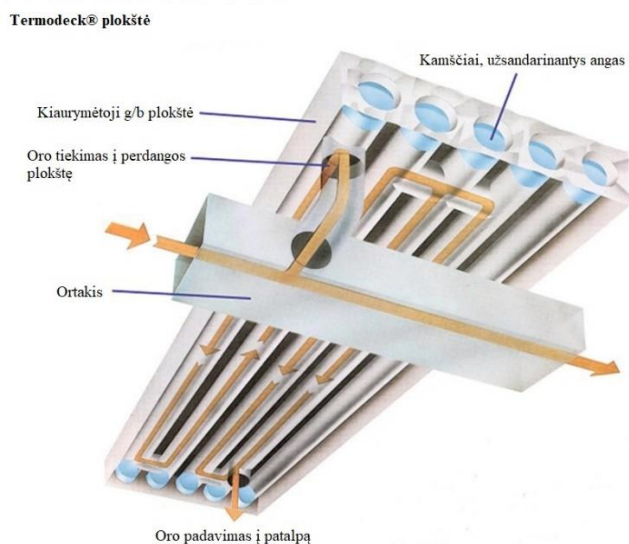
Fazę keičiančios medžiagos jau yra naudojamos statyboje, puikus to pavyzdys yra gipso kartono konstrukcija, kurios vidinė ertmė yra užpildyta celiuliozės izoliacija tarpuose, o pats apvaskalas sudarytas iš stiklo vatos izoliacinės medžiagos (žr. 1.8 pav.).



1.8 pav. Sienos detalės užpildyta su faze keičiančia medžiaga [11]

### 1.1.2. Termiškai aktyvios pastatų sistemos

Termiškai aktyvios pastatų sistemos yra plačiai paplitusios pasaulyje ir naudojamos pastatuose. Dažnai šios sistemos negali veikti vienos pastatuose, todėl reikalingos papildomos šildymo-vėdinimo sistemos. Tyrime nagrinėjama *Termodeck*® sistema, kuri pateikiama 1.4 pav., šios sistemos veikimo principas – panaudoti medžiagos savybę, išlaikyti/atiduoti šilumą, g/b kiaurymėtose perdangos plokštėse, išnaudojant vasaros ir žiemos oro sąlygas. Gelžbetonis labai gerai akumuliuoja šilumą, t. y. ją geba sugerti iš aplinkos ir savyje absorbuoti bei atiduoti į aplinką, kai jos temperatūra nukrenta. Perteklinė šiluma – sklindanti iš žmogaus kūno, apšvietimo, kompiuterių, saulės, gali būti perduodama į perdangos plokštę, jos temperatūra gali pakilti 2-3 °C dienos metu, taip nesukuriant jokio šalutinio poveikio aplinkoje esantiems žmonėms [13].

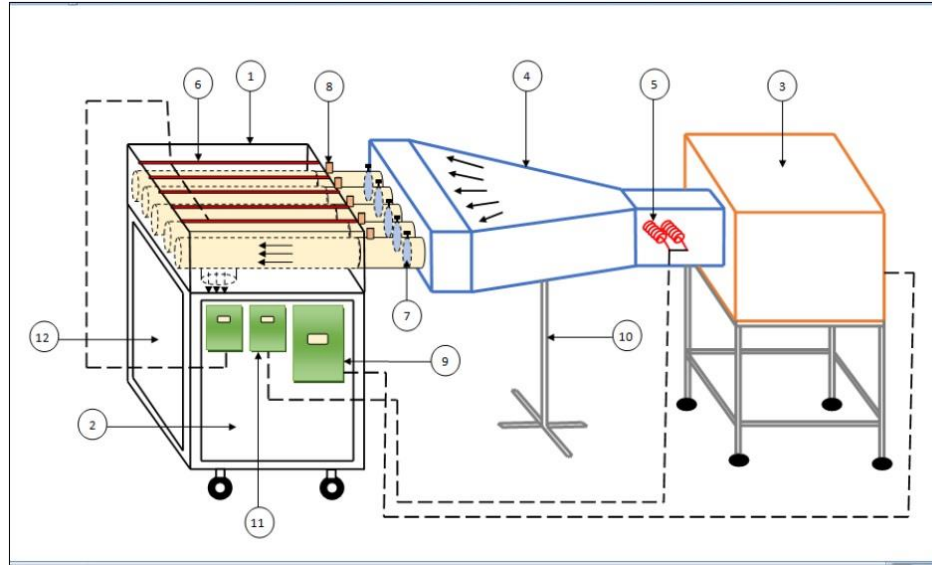


1.9 pav. Kiaurymėtosios g/b perdangos plokštės su *Termodeck*® sistema struktūra [14]

Šiame eksperimente yra naudojama *Termodeck*® sistema, esanti stačiakampio formos kambaryje su vėdinimo įrenginiu, šio eksperimento veikimo schema yra parodyta 1.5 pav. Bandymo stendas naudojamas dviem veikimo parametrų poveikiams iširti, pirmasis – oro greitis gelžbetoninės plokštės ortakiuose, antrasis – oro įėjimo temperatūra iki išeinant iš ortakių. Nustatomos šios sistemos galimybės karštame Irako klimate [15]. Tyrime bus naudojama surenkamojo gelžbetonio kiaurymėtoji plokštė, kurios pagrindiniai parametrai:

- ilgis – 1000 mm;
- plotis – 1200 mm;
- aukštis – 240 mm;
- kiaurymės skersmuo – 160 mm.

Skylės plokštės užbaigimo galuose yra uždaromos pluoštinės medienos medžiaga, todėl oras patenka į bandymų patalpą per alkūnę to paties skersmens ortakiu. Penki konvekciniai šildytuvai yra dedami viršutinėje plokštės pusėje, kurių ilgis maždaug 1000 mm, kad imituotų saulės šilumos padidėjimą, įprasto vėdinamųjų plokščių sistemos kasdieninio veikimo metu. Atliekant šiuos bandymus, kambario šilumos padidėjimas buvo imituojamas maždaug 800 W/m<sup>2</sup> galingumo konvektoriaus šildytuvų išėjimuose, kadangi didžiausias saulės šilumos energijos padidėjimas vasaros sezono metu yra liepos 21 d. Visi šildytuvai yra prijungti prie esamo valdiklio, kad sistema atitiktų reikalingą energiją. Visa sistema yra padengta dviem sluoksniais iš stiklo vatos izoliacijos, kiekvieno sluoksnio storis – 20 mm, o šilumos laidumas – 0,04 W/m·°C, kad būtų išvengta galimų šilumos nuostolių [15].



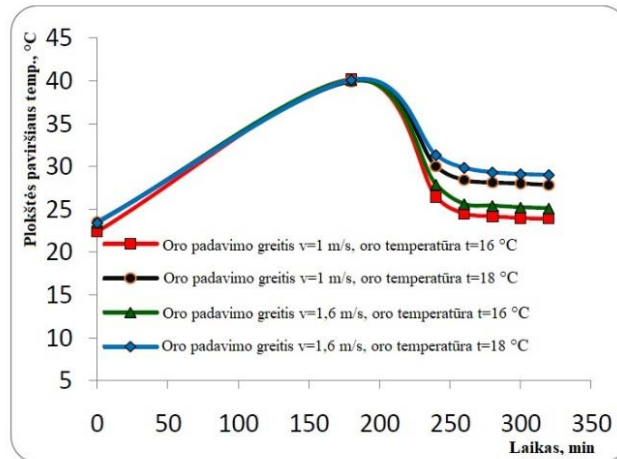
1	Termodeck® sistema	4	Oro padavimo ortakis	7	Oro slopintuvas	10	Stendas
2	Bandymų patalpa	5	Ortakių šildytuvai	8	Karščio nustatymo indikatorius	11	Nuolatinė kontrolė
3	Oro kondicionierius	6	Termodeck® šildytuvai	9	Valdymo pultas	12	Patalpos siena (polistirenas)

1.10 pav. Tyrime naudojamas *Termodeck®* sistemos stendas ir reikalingi komponentai [15]

Šiame tyrime buvo nagrinėjami du atvejai: pirmasis – buvo be išorinės apkrovos (nakties metu), šiuo atveju oro padavimo temperatūra, greitis ir vidinė apkrova buvo įvairūs. Antrasis atvejis – buvo atliekamas su išorine apkrova  $800 \text{ W/m}^2$  (dienos metu). Temperatūros matavimai buvo atliekami, kas 20 minučių ties oro padavimo anga plokštėje. Taip buvo matuojama pačios plokštės absorbuojama temperatūra, siekiant išaiškinti kiek *Termodeck®* sistemos plokštė geba pasisavinti šiluminės energijos iš išorinės aplinkos. Remiantis matavimais, kiekvieno atvejo (dienos ir nakties metu) maksimalus, stabilus našumas yra pasiekiamas per 90-150 minučių. Matavimai buvo atlikti 2013 m. spalio mėn., bandymų patalpoje Kabalos universiteto laboratorijoje, todėl bandymo salė yra išorinė aplinka tyrimo objektui [15].

Remiantis šio darbo rezultatais, pateikiamos tokios darbo išvados [15]:

1. eksperimentai parodė, jog šiluminį komfortą galima pasiekti, kai oro padavimo temperatūra yra tarp  $18$  ir  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , kai oro judėjimo greitis  $\sim 1 \text{ m/s}$ , o didelė išorės apkrova yra apie  $800 \text{ W/m}^2$ ;
2. oro padavimo greitis ir temperatūra yra labai reikšmingi plokštei, kadangi sumažinus paduodamo oro temperatūra nuo  $18$  iki  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , rezultatai parodė, jog didelis šilumos kiekis iš patalpos yra pašalinamas per žymiai trumpesnę laiką, kai  $T_{ai}=16 \text{ }^\circ\text{C}$  ir  $u_{ai}=1 \text{ m/s}$ , tai pasiekiami geresni rezultatai ir patalpa geriau atvėsinama.



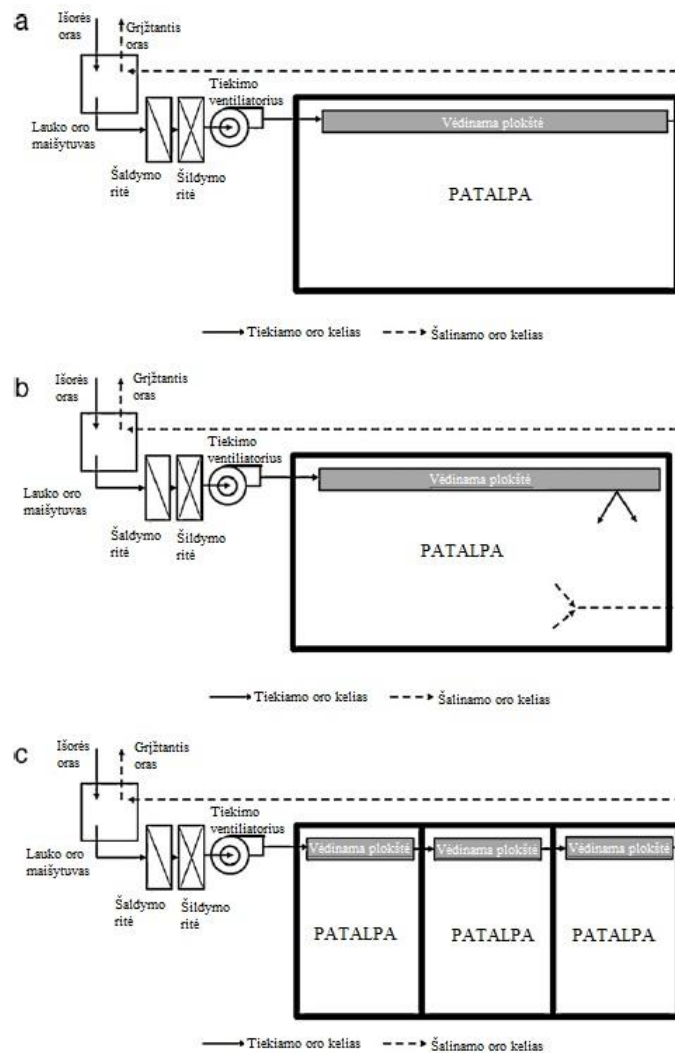
1.11 pav. *Termodeck*® sistemos eksperimentinių tyrimų grafikas, išreiškiantis priklausomybę nuo dviejų parametru [15]

S. Corgnati ir A. Kindinis (2006) atliko kompiuterinio modeliavimo tyrimą, kurio metu buvo nagrinėjamas laisvojo aušinimo vėdinimo sistemų efektyvumas kartu su terminės masės aktyvavimu, siekiant sumažinti didžiausias vėdinimo sukeltas apkrovas. Kiekybinė temperatūros pasiskirstymo simuliacija buvo atliekama liepos mėn. biuro pastato, įsikūrusio Milane, Italijoje. Yra naudojamas dinaminis modelis, modeliavimas atliekamas kompiuterine programa *Simulinks*®. Nėra oro kondicionavimo sistemos, tačiau yra analizuojamos ir lyginamos dvi skirtingos laisvojo oro padavimo sistemos. Abi sistemos veikia kaip pirminės, atliekančios savo funkciją ir dieną, ir naktį. Pirmoji – tradicinė oro maišymo vėdinimo sistema, o kita – yra terminio masės aktyvavimo sistema, t. y. vėdinamas lauko oras, prieš patekdamas į kambarį, yra praleidžiamas per kiaurymėtosios gelžbetonio perdangos plokštės angas [16]. Iš šio tyrimo bus plačiau aprašomas atvejis, kuriame nagrinėjamas laisvasis oro judėjimas, paduodamas per prie plokštės pritvirtintą ortakį.

Vėdinamųjų plokščių sistemos energijos modelis šiame tyrime, kurio pagrindiniai komponentai – papildomas vėdinimo įrenginys ir išorinio oro maišytuvas, yra pavaizduotas 1.7 pav. Taip pat modelį sudaro: šildymo ir šaldymo sekcijos, tiekimo ventiliatorius ir kiaurymėtoji perdangos plokštė su angomis. Modelis leidžia vartotojui kontroliuoti tiekiamą išorės orą, kai lauko oro įvesties sąlyga yra nustatoma pagal vartotojo poreikius, oras yra tiekiamas tolydžiai keliaudamas per plokštės angas. Šiam variantui yra trys skirtingi oro padavimo būdai: 1) oras paduodamas per plokštę; 2) oras paduodamas per plokštę ir papildomą zoną; 3) oras paduodamas per skirtingas plokštes [16].



Šis modelis sudarytas iš plokštės, kuri panaudoja sukauptą išorinę energiją, tiekiamam orui pašildyti iki reikiamos temperatūros, kad būtų palaikomos palankios sąlygos patalpoje esantiems žmonėms. Nagrinėjant šią sistemą yra plačios valdymo pritaikymo funkcijos, tokios kaip sistemos veikimo grafikas, oro tiekimo pasiskirstymas, lauko oro srauto greitis ir projektuojamos oro temperatūros. Taip pat leidžia vartotojui turėti labai reikalingą lankstumą, valdyti sistemas įvairiomis sąlygomis. Nagrinėjant šio tyrimo rezultatus, nustatyta, jog išvystytas modelis gali būti pritaikytas atlikti tolimesnius tyrimus susijusius su šia tematika, įvertinant vidaus temperatūros skirtumus ir vėdinimo energijos potencialo išnaudojimą.



1.12 pav. Trys skirtingas modeliutos sistemos: a) oras tiekiamas per plokštę, b) oras paduodamas per plokštę ir per papildomą zoną, c) oras tiekiamas per skirtingas plokštes, į skirtingas patalpas [16]

## 1.2. Literatūros apžvalgos išvados

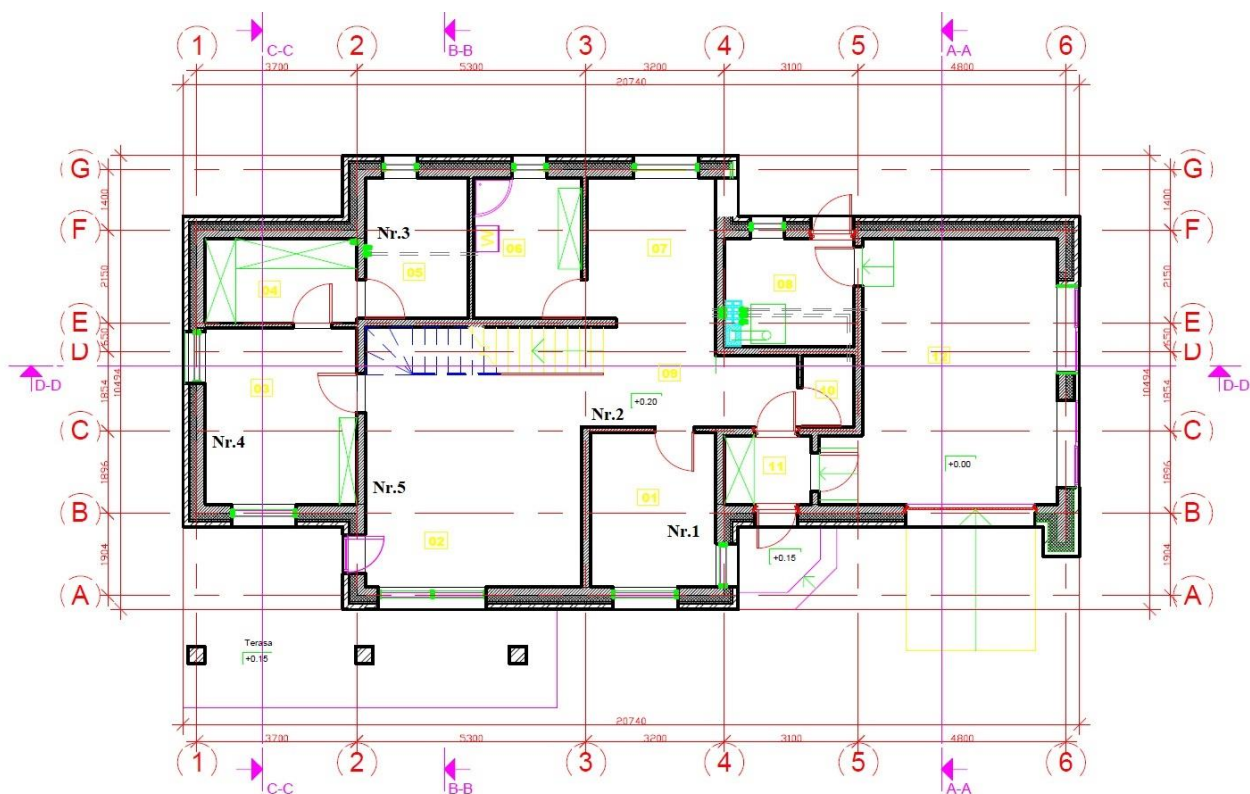
Literatūros apžvalgoje buvo nagrinėjamos pasyvios ir aktyvios terminės masės panaudojimo priemonės, kadangi magistro baigiamasis darbas orientuotas į pastato konstrukcijų modeliavimą, todėl plačiau buvo aprašomos pasyvios terminės masės panaudojimo priemonės. Išanalizavus straipsnius pateikiamos svarbiausios literatūros analizės išvados:

1. naudojant masyvias konstrukcijas su automatiniu langų atidarymu, galima 12 % sumažinti energijos sąnaudas, skirtas patalpų vėdinimui, lyginant su realiomis pastate esančiomis konstrukcijomis [2];
2. lyginant neapstatytą patalpą ir apstatytą su įjungtu televizoriumi, žmonės jaučia temperatūros pasikeitimą, todėl turima įtakos PPD rodikliui, kuris pakyla 8.6 % ir tai reiškia, kad toks procentas apklaustųjų jaučiasi nekomfortiškai tokioje aplinkoje [7];
3. bendros energijos sąnaudos šildymui ir vėsinimui dvejose skirtingose konstrukcijose: 1) plytų mūras patalpos viduje – 56 MJ/m<sup>2</sup>; 2) lengvos konstrukcijos – 77,9 MJ/m<sup>2</sup>. O tai rodo, jog pasirinkus masyvesnę konstrukciją energijos suvartojimą galima sumažinti 28 % [8];
4. geriausias rezultatas pasiekiamas su labai lengvu betonu, kai nėra vėdinimo naktį, tada energijos sąnaudos, skirtos šildymui ir vėsinimui, yra 19 % mažesnės lyginant su lengvomis konstrukcijomis, tačiau 6 % didesnės, kai patalpos yra vėdinamos nakties metu [9];
5. fazę keičiančios medžiagos pasižymi dideliu šilumos laidumu, kas leidžia reaguoti į net menkiausius temperatūrinius pasikeitimus, o tai padeda medžiagai greičiau išilti ar atiduoti šilumą [12];
6. eksperimentais nustatyta, jog šiluminį komfortą su *Termodeck*® sistema galima pasiekti, kai oro padavimo temperatūra yra tarp 18 ir 20 °C, kai oro judėjimo greitis ~1 m/s, o didelė išorės apkrova yra apie 800 W/m<sup>2</sup> [15].

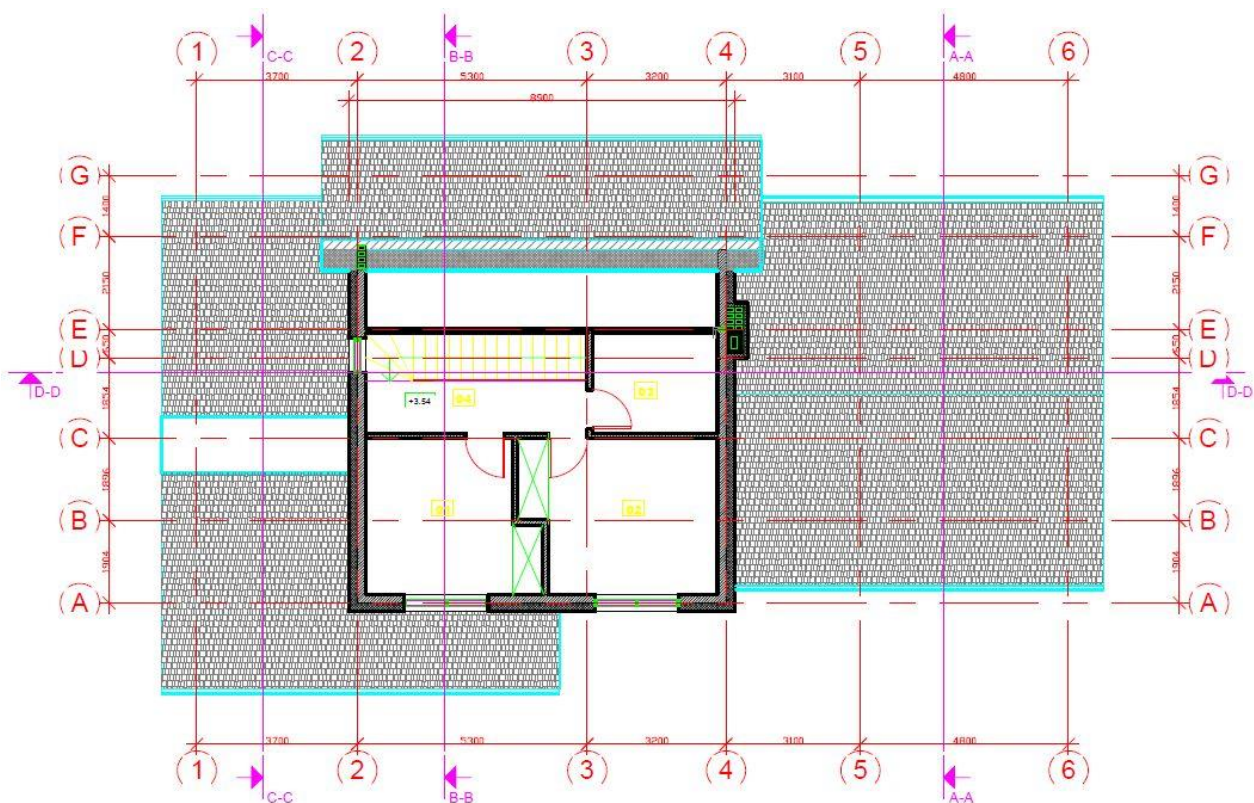
## 2. Tiriamoji dalis

### 2.1. Tyrimo objektas

Magistro baigiamajame projekte nagrinėjamas dviejų aukštų gyvenamasis namas, esantis Noreikiškių kaime Kauno raj. Remiantis architektūriniais brėžiniais, sukurtas identiškas pastato modelis kompiuterinės programos *IDA-ICE* aplinkoje. Ši programa yra skirta nagrinėti pastato mikroklimatą, įvertinti energijos poreikius, skirtus šildymui ir vėsinimui. Architektūriniai brėžiniai pateikiami 2.1 ir 2.2 pav.



2.1 pav. Nagrinėjamo pastato 1-ojo aukšto planas



2.2 pav. Nagrinėjamo pastato 2-ojo aukšto planas

## 2.2. Tyrimo metodologija

Tyrimui bus naudojamas skaitmeninio modeliavimo metodas, nes baigiamajame darbe yra siekiama išanalizuoti pastato masyvo įtaką jo energetiniam efektyvumui. Siekiant gauti kuo tikslesnius atliekamo tyrimo rezultatus, naudojama kompiuterinė modeliavimo programa *IDA-ICE*. Sumodeliavus pastatą, bus keičiamas pastato konstruktyvas: vidaus ir išorės sienos, lyginant energijos suvartojimo rodiklius, kiekybiškai bus patikrinti skirtingų alternatyvų rezultatai ir išskiriami efektyviausi sprendiniai, siekiant sumažinti pastato energijos poreikius. Prieš atliekant alternatyvių pastato konstrukcijų analizę, pirminio pastato modelio energijos sąnaudos bus patikrinamos su realiomis pastato sąnaudoms šildymui 2018 m. vasario mėn., siekiant nustatyti modelio patikimumą.

Kompiuterinio modeliavimo programa *IDA-ICE* yra priskiriama prie pastato eksploatacinių savybių modeliavimo (angl. *building performance simulation*) programų, ji paremta neutraliu modelio formatu (angl. *neutral model format*). Skaičiavimams yra naudojamas *Modelica* programavimo kalba, kuri yra priskiriama deklaraciniam programavimui. Šis programavimas – kompiuterių programų struktūros ir elementų kūrimo stilius, kuris išreiškia skaičiavimo logiką,

neapibūdinant jo valdymo srauto [17]. Programa yra paremta baigtinių elementų metodu ir matematinės lygtis sprendžia iteracijų metodu t. y. sprendimas randamas priartėjimu būdu, kada gaunami rezultatai tenkina tyrimą atliekančius žmonės. Skaičiavimai yra baigiami, kuomet rezultatai pasiekia konvergencija, kai skirtumas tarp gaunamų išvesties parametrų yra sąlyginai mažas arba lygus absoliučiam nuliui, tačiau kartais skaičiavimai yra nutraukiami kuomet funkcijų parametrų priklausomybės nėra ir negalima apskaičiuoti reikšmių. *IDA-ICE* yra daugialypė programa, siūlanti skirtingą sąsają vartotojams [18]:

- valdiklio sąsajos leidžia vartotojui pasirinkti konkretų nagrinėjamos srities modelį;
- standartinė sąsaja skirta apibrėžti simuliacinį modeliavimą, nustatant skirtingas erdves ir objektus, įvertinant kaip zonas, radiatorius ar langus;
- pažengusio lygmuo – vartotojo galimybės pačiam naršyti ir keisti matematinio modelio išraiškas sistemoje;
- neutralus modelio formatas ir *Modelica* programavimo kalba yra skirti programos kūrėjams.

Siekiant nustatyti pastato masyvumo įtaką jo energetiniam efektyvumui ir mikroklimatui bus naudojama *IDA-ICE* programinė įranga su standartine sąsaja, pastato kambarius suskirstant į skirtingas zonas, įvertinant vidaus patalpų temperatūrą.

Pagrindiniai įvesties duomenys:

1. gyvenamojo pastato architektūrinės dalies brėžiniai;
2. Kauno meteorologijos stoties, esančios Rapsų g. 5 Noreikiškėse, 2018 metų vasario mėnesio duomenys, kuriuose pateikiama: 1) vidutinė paros oro temperatūra (°C);
3. energijos sąnaudos šildymui t. y. dujų suvartojimas 2018 m. vasario mėnesį.

Numatomos tyrimo prielaidos leis tiksliau siekti rezultatų apdorojimo ir sužinoti ar tyrimas atitinka keliamą problemą ir pateisina lūkesčius. Pagal atliktus kitų mokslininkų tyrimus ir teorines žinias, geriausiai šilumą akumuliuoja sunkios konstrukcijos t. y. gelžbetonio konstruktyvas, turintis vieną geriausią šiluminės talpos rodiklį lyginant su kitomis statybinėmis medžiagomis. Pradiniame tyrime labai svarbu tinkamai sumodeliuoti pastatą, siekiant artimesnio realybei rezultato, todėl labai svarbu pirminiame etape tinkamai apdoroti duomenis ir įsisavinti turimą informaciją.

Šio tyrimo imtis yra vienas kalendorinis mėnesis, t. y. 2018 metų vasaris, kuris pasižymi žemomis lauko temperatūromis, todėl išauga pastato poreikis šildymui. Tikslingiausia yra lyginti energijos suvartojimą, kada šiluminės energijos kiekiai yra didžiausi, tada realiausiai išryškėja

nuokrypis realaus pastato nuo modeliujamo ir galima daryti atitinkamas išvadas bei keisti pastato konstruktyvą ir ieškoti geriausio sprendimo, siekiant užtikrinti pastato energetinį efektyvumą.

### 2.2.1. Laiko pastovioji

Šiluminė inercija viena pagrindinių sąvokų apibrėžianti pastatytų masyvumo įtaka energetiniam efektyvumui, kuri apibūdina medžiagos savybės išlaikyti/atiduoti sukauptą šilumą per laiko vienetą. Laiko pastovioji (angl. *time constant*) – dydis nusakantis nagrinėjamo kūno šiluminę inerciją. Šis dydis apibrėžia laiko periodą, kurio metu (nutraukus šildymo/vėdinimo procesus) temperatūros skirtumas tarp išorės ir vidaus patalpų pradiniu laiko momentu  $\theta_i$ , santykis su temperatūrų skirtumu tarp išorės (lauko) ir vidaus (patalpų) galutiniu laiko momentu  $\theta$  lygus natūrinio logaritmo pagrindo dydžiui  $e = 2,71828$  [19].

$$\tau = \frac{t}{\ln \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta}}, (s); \quad (2.1)$$

$$\tau = t; \text{ kai } \ln \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta} = \ln(e); \quad (2.2)$$

čia  $\tau$  – kūno laiko pastovioji, (s);

$t$  – laikas iki kūno atvėsimo (sušilimo), (s);

$\Delta\theta_i$  – temperatūrų skirtumas tarp kūno ir aplinkos pradiniu laiko momentu, (°C);

$\Delta\theta$  – temperatūrų skirtumas tarp kūno ir aplinkos galutiniu laiko momentu, (°C).

Laiko pastovioji, visose mokslo srityse žymima simboliu  $\tau$ , o matuojama sekundėmis (s), tačiau praktinėje ir inžinerinėje veikloje patogiau matuoti valandomis (h). Šis šiluminės inercijos dydis dažnai naudojamas pastato šildomosios erdvės šiluminės inercijos lygiui nustatyti. Jis naudojamas Lietuvos (LST), Europos (EN) bei tarptautiniuose (ISO) standartuose energijos sąnaudų, šilumos nuostolių ir šildymo sistemos galios skaičiavimuose kaip šiluminę inerciją apibūdinantis parametras [20].

Dažniausiai pastato laiko pastovioji išreiškiama kaip pastato viduje egzistuojančių paviršių (baldu, daiktų, vidinių sienų paviršių) aktyviosios šiluminės talpos  $C$  ir to pačio pastato savitųjų šilumos nuostolių koeficiento  $H$  santykiu [20]:

$$\tau = \frac{C}{H}, (s); \quad (2.3)$$

čia  $C$  – pastato vidinių paviršių aktyvioji šiluminė talpa, (J/K);

$H$  – pastato savitieji šilumos nuostoliai, (W/K).

Pastato savitieji šilumos nuostoliai nustatomi pagal išraišką [1]:

$$H = H_T + H_V, (W/K); \quad (2.4)$$

čia  $H_T$  – atitvarų savitieji šilumos nuostoliai, (W/K);

$H_V$  – vėdinimo savitieji šilumos nuostoliai, (W/K).

$$H_T = \sum A \cdot U + \sum \Psi \cdot l, (W/K); \quad (2.5)$$

čia  $U$  – atitvaros šilumos perdavimo koeficientas, (W/(m<sup>2</sup>·K)), kurios plotas  $A$ , (m<sup>2</sup>);

$\Psi$  – ilginio šilumos tiltelio šilumos perdavimo koeficientas, (W/(m·K)), kurio ilgis  $l$ , (m).

$$H_V = c_{V,oro} \cdot \bar{V}, (W/K); \quad (2.6)$$

čia  $c_{V,oro}$  – oro tūrinė šiluminė talpa, (J/(m<sup>3</sup>·K));

$\bar{V}$  – išorės (lauko) oro patenkančio į patalpas debitas, (m<sup>3</sup>/s).

Pastato vidinių paviršių aktyvioji šiluminė talpa  $C$  nustatoma, sumuojant pastato elementų vidinių paviršių, esančių sąlytyje su vidaus patalpų oru, šilumines talpas [21]:

$$C = \sum \chi \cdot A, (J/K); \quad (2.7)$$

čia  $A$  – pastato vidinio paviršiaus elemento plotas, (m<sup>2</sup>);

$\chi$  – pastato elemento vidinio paviršiaus ploto aktyvioji šilumos talpa, (J/(m<sup>2</sup>·K));.

Pastato vidinio paviršiaus ploto aktyvioji šilumos talpa nustatoma:

$$\chi = \sum \rho \cdot c \cdot d_{akt}, (J/(m^2 \cdot K)); \quad (2.8)$$

čia  $\rho$  – vidinio paviršiaus sluoksnio medžiagos tankis, (kg/m<sup>3</sup>);

$c$  – vidinio paviršiaus sluoksnio medžiagos savitoji šiluminė talpa, (J/(kg·K));

$d_{akt}$  – vidinio paviršiaus aktyviojo sluoksnio storis, (m).

Laiko pastoviosios išraišką, kaip šiluminės inercijos parametą galime priversti ir vienetinio ploto atitvarai [22]:

$$\tau_c = \chi \cdot R, (s); \quad (2.9)$$

čia  $\chi$  – atitvaros vidinio paviršiaus ploto aktyvioji šilumos talpa, (J/(m<sup>2</sup>·K));

$R$  – atitvaros visuminė šiluminė varža, ((m<sup>2</sup>·K)/W).

**Gabalinės šiluminės talpos metodas.** Paprasčiausiu atveju, laikas iki kūno įnešto į skirtingos nei kūno temperatūros aplinką, apibrėžiamas gabalinės šiluminės talpos metodu (angl. *the lumped capacitance method*). Šis metodas yra vienas paprasčiausių temperatūros kitimą laike apibūdinančių metodų, kuris išreiškiamas [23]:

$$t = \tau \cdot \ln \frac{\Delta\theta_i}{\theta}, (s); \quad (2.10)$$

čia  $\tau$  – kūno laiko pastovioji, (s);

$\Delta\theta_i$  – temperatūrų skirtumas tarp kūno ir aplinkos pradiniu laiko momentu, (°C);

$\Delta\theta$  – temperatūrų skirtumas tarp kūno ir aplinkos galutiniu laiko momentu, (°C).

$$t = \frac{\rho \cdot V \cdot c}{h \cdot A_s} \cdot \ln \frac{T_i - T_\infty}{T_o - T_\infty}, (s); \quad (2.11)$$

čia  $\rho$  – kūno tankis, (kg /m<sup>3</sup>);

$V$  – kūno tūris, (m<sup>3</sup>);

$c$  – kūno savitoji šiluminė talpa, (J/(kg·K));

$h$  – kūno paviršiaus šilumos perdavimo koeficientas, (W/(m<sup>2</sup>·K));

$A_s$  – kūno paviršiaus plotas, (m<sup>2</sup>);

$T_i$  – termodinaminė kūno temperatūra pradiniu laiko momentu, (K);

$T_o$  – termodinaminė kūno temperatūra galutiniu laiko momentu, (K);

$T_\infty$  – termodinaminė aplinkos temperatūra, (K).

### 2.2.2. Šiluminės inercijos dydis $D$

Šiluminės inercijos dydis  $D$  apibrėžiamas metodu, kuris paremtas vertinant temperatūros svyravimo ir šilumos vertes, galima apspręsti patalpų šiluminio pastovumo klausimus. Plačiai naudojama šiluminę inerciją apibūdinančio dydžio išraiška  $D$ , kuri suprantama kaip sąlyginio sluoksnio storis, kuriame vyksta apčiuopiami temperatūros svyravimai [19]:



$$D = R \cdot s; \quad (2.12)$$

čia  $R$  – atitvaros šiluminė varža,  $((m^2 \cdot K)/W)$ ;

$s$  – atitvaros medžiagos šilumos imlumo koeficientas,  $(W/(m^2 \cdot K))$ .

Šilumos imlumo koeficientas susijęs su nestacionariuoju šilumos perdavimu bei temperatūros svyravimu medžiagoje. Šis dydis yra medžiaginė savybė, kuriai įtakos turi šilumos akumulatorius – šiluminė talpa; šilumos perdavimo koeficientas apibūdina konstrukcijos savybę perduoti šilumą ir gali būti vertinamas tik tada, kuomet nusistovi stacionarus šilumos perdavimas per atitvarą. Šilumos imlumo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę [19]:

$$s = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}{T}}, (W/(m^2 \cdot K)); \quad (2.13)$$

čia  $\lambda$  – medžiagos šilumos laidumo koeficientas,  $(W/(m \cdot K))$ ;

$c$  – medžiagos savitoji šiluminė talpa,  $(J/(kg \cdot K))$ ;

$\rho$  – medžiagos tankis,  $(kg/m^3)$ ;

$T$  – temperatūrinės bangos svyravimo periodas, (s).

Medžiagos šilumos imlumo koeficiento fizikinė prasmė parodo, kaip intensyviai medžiaga sugeria šilumą, vykstant temperatūros svyravimui ant jos paviršiaus. Dažniausiai priimama, kad šiluminė banga svyruoja 1 paros = 24 valandų periodu, tuomet lygtis (2.13) atrodytų [1]:

$$s_{24} = 0,0085 \cdot \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}, (W/(m^2 \cdot K)); \quad (2.14)$$

Kūno šilumos įsisavinimą apibrėžia temperatūrinis laidis  $a$ , kuris apskaičiuojamas:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, (m^2/s); \quad (2.15)$$

Šiluminio imlumo  $\zeta$  išraiška:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\rho \cdot c \cdot 2 \cdot \pi}}, (m); \quad (2.16)$$

čia  $\alpha$  – temperatūrinis laidis,  $(m^2/s)$ ;

$\omega$  – temperatūros svyravimo dažnis,  $(1/s)$ . ( $\omega = 2 \cdot \pi/T$ ).

ς nusako sąlyginį gylį kuriame vyksta tolygus kūno šilimas arba vėsimas, temperatūrai ant paviršiaus kintant periodiškai. Laikas iki temperatūrinio atsako tarp atitvaros priešingų pusių  $t_D$ :

$$t_D = 2,7 \cdot D - 0,4, (h); \quad (2.17)$$

čia  $t_D$  – laikas iki temperatūrinio atsako, tarp priešingų atitvaros pusių (h).

2.1 lentelė. Šiluminės inercijos dydžių palyginimas [19]

Pastato šiluminę inerciją apibūdinantys dydžiai	<i>Teigiami aspektai</i>	<i>Neigiami aspektai</i>
<b>Laiko pastovioji <math>\tau</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompleksiškai įvertinamas viso pastato inertiškumas šilumai;</li> <li>• Įvertinamos pertvarų ir baldų šiluminės akumuliacijos savybės;</li> <li>• Įvertinama vėdinimo įtaka;</li> <li>• Apskaičiuodami savituosius šilumos nuostolius <math>H</math>, paprastai įvertinamas pastato energijos suvartojimas, parenkamas šilumos šaltinis bei jo galia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sudėtingas skaičiavimas;</li> <li>• Nėra reglamentuotos, tikslios aktyviojo sluoksnio storio <math>d_{akt}</math> nustatymo metodikos;</li> <li>• Nevertinamas išorinis žymių temperatūros svyravimų sluoksnis ir jo įtaka vidiniam aktyviajam sluoksniui.</li> </ul>
<b>Šiluminės inercijos dydis <math>D</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nesudėtingas skaičiavimas;</li> <li>• Kartu nustatomos atitvarų šiluminių varžų vertės;</li> <li>• Įvertinamas lauko oro temperatūros svyravimas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nevertinama vėdinimo ar infiltracijos įtaka;</li> <li>• Nevertinama vidaus pertvarų ir baldų šiluminės inercijos įtaka pastatui.</li> </ul>

Šie du nagrinėjami parametrai yra vieni pagrindinių, siekiant nustatyti pastato masyvumo įtaką jo energiniam efektyvumui, todėl jais bus remiamasi tolimesnėje šio darbo eigoje. Tyrimo metodas pasirinktas kompiuterinis modeliavimas, todėl rankiniu būdu šie du dydžiai nebus skaičiuojami, kadangi skaitmeninė kompiuterinė modeliavimo programa *IDA-ICE* atlieka begalę iteracijų, kurios leidžia gauti kuo tikslesnį rezultatą, todėl duomenys bus lyginami tiksliau ir efektyviau.

### 2.3. Kompiuterinio pastato modelio sudarymas

Modeliuojamo pastato įvesties sąlygos yra pateikiamos 2.2 lent., remiantis šiais duomenis yra sukuriamas modelis *IDA-ICE* aplinkoje. Modeliavimui pasirenkami idealūs šildymo ir vėsinimo prietaisai (angl. *ideal heater*, *ideal cooler*), kurie veikia pagal nustatytus temperatūros rodiklius, pavyzdžiui, nukritus temperatūrai iki tam tikros ribos pradeda šildyti ir atvirkščiai.

2.2 lentelė. Pradinių sąlygų lentelė

Pastato šildymas	Iš programos pasirenkama <i>ideal heater</i>
Pastato vėsinimas	Vėsinamos patalpos esančios pietinėje fasado pusėje, t. y. svetainė, miegamasis, darbo kambarys ir abudu vaikų kambariai. Vėsinimui iš programos pasirenkamas <i>ideal cooler</i>
Vėdinimo sistema	Pastatas modeliuojamas su natūralia vėdinimo sistema, priimama 0,2 h <sup>-1</sup> oro apykaita
Temperatūros nustatymas	Patalpoms, kurių temperatūra tiriama, priimama kintanti temperatūra pagal tyrimo duomenis, likusioms patalpoms – pagal HN 42:2009 reikalavimus
Vidinių šilumos pritekėjimų įvertinimas: nuo žmonių, dėl apšvietimo, dėl vidaus įrangos	Pateikiami 1 priede pagal atitinkamą patalpą
Langų/sienų plotų santykis:	
1) Šiaurės pusėje	9,06/90,94 %
2) Pietų pusėje	17,60/82,40 %
3) Vakarų pusėje	10,10/89,90 %
4) Rytų pusėje	6,52/93,48 %

#### 2.3.1. Pastato vidaus patalpų temperatūrų nustatymas

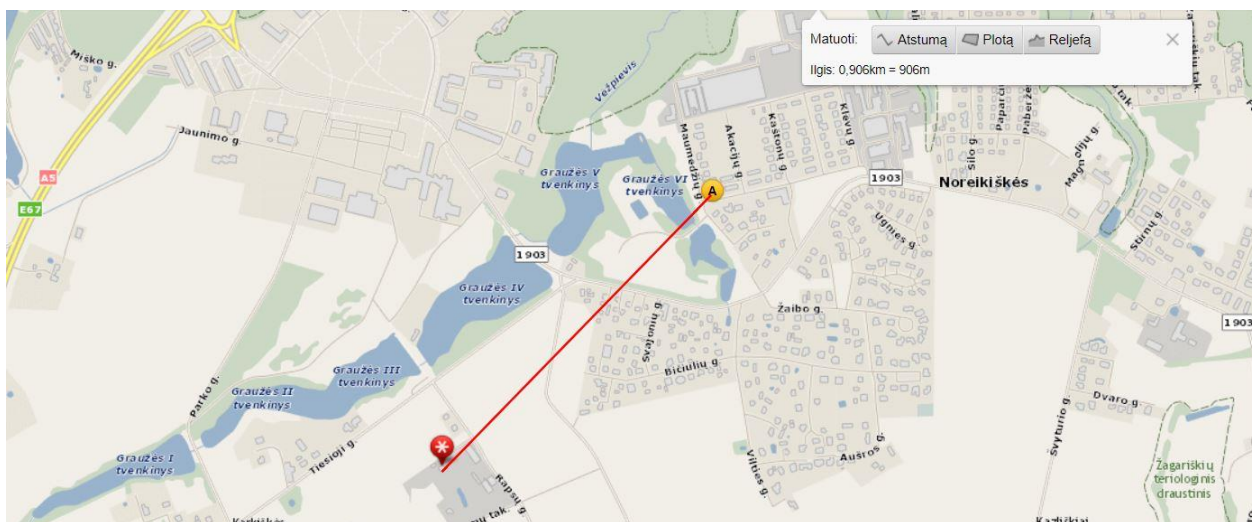
Temperatūra yra analizuojama pasitelkus *HOBO* daviklius, kurių išdėstymas patalpose yra pateikiamas 2.1 pav. Duomenys buvo nuskaitomi 2018 m. vasario mėn., atlikti 4032 matavimai kas 10 minučių. Iš šių atliktų temperatūros matavimų (žr. 2.3 lent.), buvo išvestas kiekvienos patalpos vidurkis, naudojamas modeliavimo programoje, kaip numatoma kambario temperatūra, siekiant sukurti modelį, kuris atitinka realų pastatą. Patalpose, kuriuose nebuvo atliekami šie matavimai, buvo priimta šių penkių vidurkių vidurkis, kuris yra lygus 23,24 °C, tačiau garažo, katilinės, tambūro, palėpės temperatūros buvo priimtose remiantis HN 42:2009 reikalavimais [24].

2.3 lentelė. *HOBO* daviklių atliktų matavimų suvestinė

Daviklio numeris	Matavimų skaičius	Vidutinė patalpos oro temperatūra, °C	Vidutinis patalpos oro drėgnis, %
Nr. 1	4032	23,08	36,31
Nr. 2		23,37	-
Nr. 3		22,51	37,56
Nr. 4		23,88	40,55
Nr. 5		23,34	35,84

## 2.3.2. Lauko oro sąlygų nustatymas

Modelio kūrimui pasirinktas Kauno duomenų klimato failas iš *IDA-ICE* programos, vidutinę oro temperatūrą keičiant 2018 m. vasario mėn. duomenimis, kurie pateikti 2.4 lent., gautais iš arčiausiai nagrinėjamo pastato, esančios Kauno meteorologijos stoties Noreikiškėse. Atstumas nuo meteorologijos stoties iki pastato yra 0,9 km (žr. 2.3 pav.).



2.3 pav. Atstumas nuo nagrinėjamo realaus pastato iki meteorologijos stoties [25]

2.4 lentelė. Kauno meteorologinės stoties 2018 m. vasario mėn. duomenys, pirmoji eilutė žymi mėnesio dieną, antroji – vidutinė paros temperatūra, °C [26]

1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2)	0,8	0,4	0	-1,5	-6	-5,1	-5,6	-5	-5,9	-6,2	-4,6	-1,8	-0,6	-1,7
1)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
2)	-4,5	-3,9	-0,8	-2,9	-1,5	-3,2	-8,5	-12	-	13,4	11,3	14,5	-15	-
													<b>Vid.</b>	<b>-5,84</b>

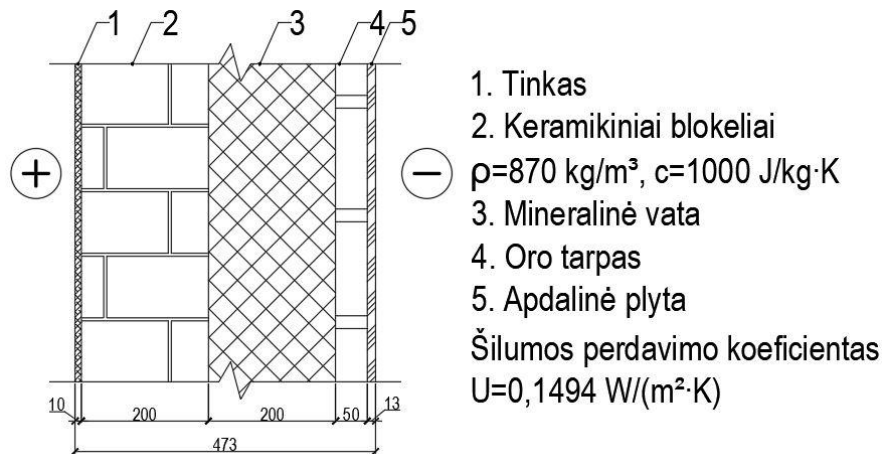
Nagrinėjamo realaus pastato modelis *IDA-ICE* programos aplinkoje yra pateikiamas 2.4 pav., nagrinėjant alternatyvas pastato modelio vaizdas išlieka toks pat, kadangi yra keičiamos sienų konstrukcijų detalės, didinant arba mažinant terminį masyvumą, norint nustatyti kokią įtaką jis turi energetiniam efektyvumui ir patalpų mikroklimatui.



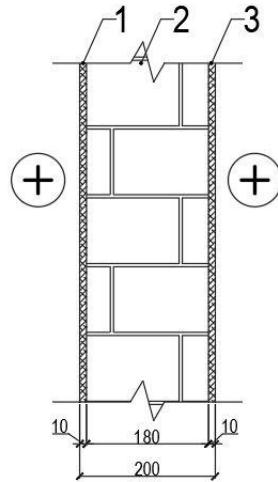
2.4 pav. 3D modelis, sukurtas *IDA-ICE* programa

### 2.3.3. Pastato tūriniai ir konstrukciniai sprendimai

Kiekviena pastato patalpa yra įvardinama programoje kaip atskira zona, kurioje užduodama tam tikra temperatūra, priskiriamos skirtingos konstrukcijos. Pradinės konstrukcijos detalės yra nustatomos pagal realaus pastato mazgus, siekiant sukurti kuo tikslesnį modelį, šios detalės yra pateikiamos 2.5 – 2.8 pav.

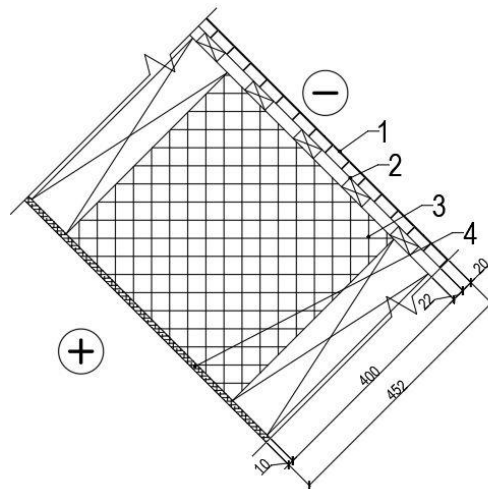


2.5 pav. Pirminio pastato modelio išorės sienos detalė



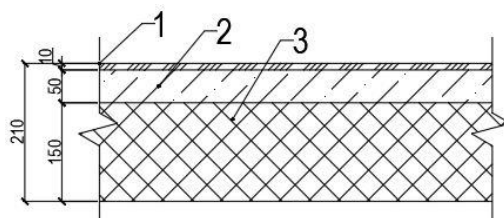
1. Tinkas
  2. Keraminiai blokėliai  
 $\rho=870 \text{ kg/m}^3$ ,  $c=1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
  3. Tinkas
- Šilumos perdavimo koeficientas  
 $U=1,028 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

2.6 pav. Pirminio pastato modelio vidaus sienos detalė



1. Stogo danga
  2. Grebėstai
  3. Gėgnės su izoliacine medžiaga,  
 $c=600 \text{ mm}$
  4. Tinkas
- Šilumos perdavimo koeficientas  
 $U=0,096 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

2.7 pav. Pirminio pastato modelio stogo detalė



1. Išlyginamasis sluoksnis
  2. Betonas
  3. Izoliacinė medžiaga
- Šilumos perdavimo koeficientas  
 $U=0,229 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

2.8 pav. Pirminio pastato modelio grindų detalė

### 2.3.4. Kompiuterinio modelio patikrinimas

Sukurto modelio energijos sąnaudos šildymui yra lyginamos su realiomis pastato sąnaudos 2018 m. vasario mėn. (žr. 2.4 lent.). Žinant suvartotų dujų kiekį šildymui, apskaičiuojamas koks energijos poreikis yra reikalingas pastatui apšildyti:

$$Q = c \cdot m, (kWh); \tag{2.18}$$

čia  $c$  – dujų šilumingumas (kWh/m<sup>3</sup>) [27];

$m$  – suvartotų dujų kiekis pagal skaitliuką (m<sup>3</sup>).

Skaičiavimuose naudojamas viršutinis dujų šilumingumas, kuris parodo šilumos kiekį, taip pat įskaičiuojama ir šiluma, kuri išsiskiria kondensuojantis degimo produktuose esančiam vandens garu, kadangi pastate yra kondensacinis katilas ir grindinio šildymo sistema, leidžianti maksimaliai išnaudoti kondensacinio katilo privalumus.

2.5 lentelė. Viršutinis dujų šilumingumas ESO Kauno skirstymo sistemoje 2018 m. vasario mėn. pirmoji eilutė žymi mėnesio dieną, antroji – dujų šilumingumą, kWh/m<sup>3</sup> [27]

1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2)	10,4 3	10,4 3	10,4 4	10,4 3	10,4 3	10,4 4	10,4 4	10,4 4	10,4 5	10,4 5	10,4 5	10,4 3	10,4 3	10,4 3
1)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
2)	10,4 3	10,4 3	10,4 3	10,4 3	10,4 4	10,4 3	10,4 3	10,4 4	10,4 5	10,4 4	10,4 5	10,4 5	10,4 5	10,4 5
													<b>Vid.</b>	<b>10,4 4</b>

Analizuojame pastate, 2018 m. vasario mėn. suvartotos šilumos kiekis:

$$Q = 10,44 \cdot 290 = 3027,31 \text{ kWh}$$

Eksperimentiškai nustatytos pastato energijos sąnaudos lyginamos su *IDA-ICE* programa gautais rezultatais 2.9 pav. Pateikiama metinė šiluminės energijos sąnaudų skaičiavimo ataskaita, iš kurios matome, kad analizuojamu laikotarpiu (2018 m. vasario mėn.) pastato energijos sąnaudos šildymui ir karšto vandens ruošimui sudaro 3034 kWh. Faktinių duomenų ir kompiuterinio modeliavimo neatitikimas sudaro 0,28 %, priimama, kad modelis tikslus ir gali būti naudojamas tolimesnei alternatyvų analizei. Atlikus modelio įvertinamą su realiu pastatu, galima teigti, jog šiluminės aplinkos parametrai atitinka realaus pastato energijos suvartojimus.

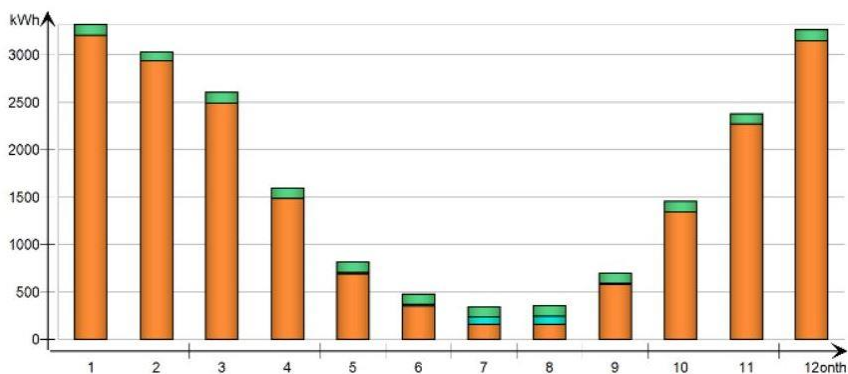
### 2.3.5. Pirminio pastato modelio vidaus temperatūros bei energijos sąnaudų analizė

Atliekant energijos sąnaudų analizę ir lyginant kaip kinta vidaus patalpų temperatūra, bus lyginamos ir vertinamos metinės sąnaudos šildymui, vėsinimui (žr. 2.9 pav.). Pirminio pastato modelio metinės energijos sąnaudos šildymui – 18842 kWh, o vėsinimui – 216,2 kWh.

## Energijos sąnaudos

kWh

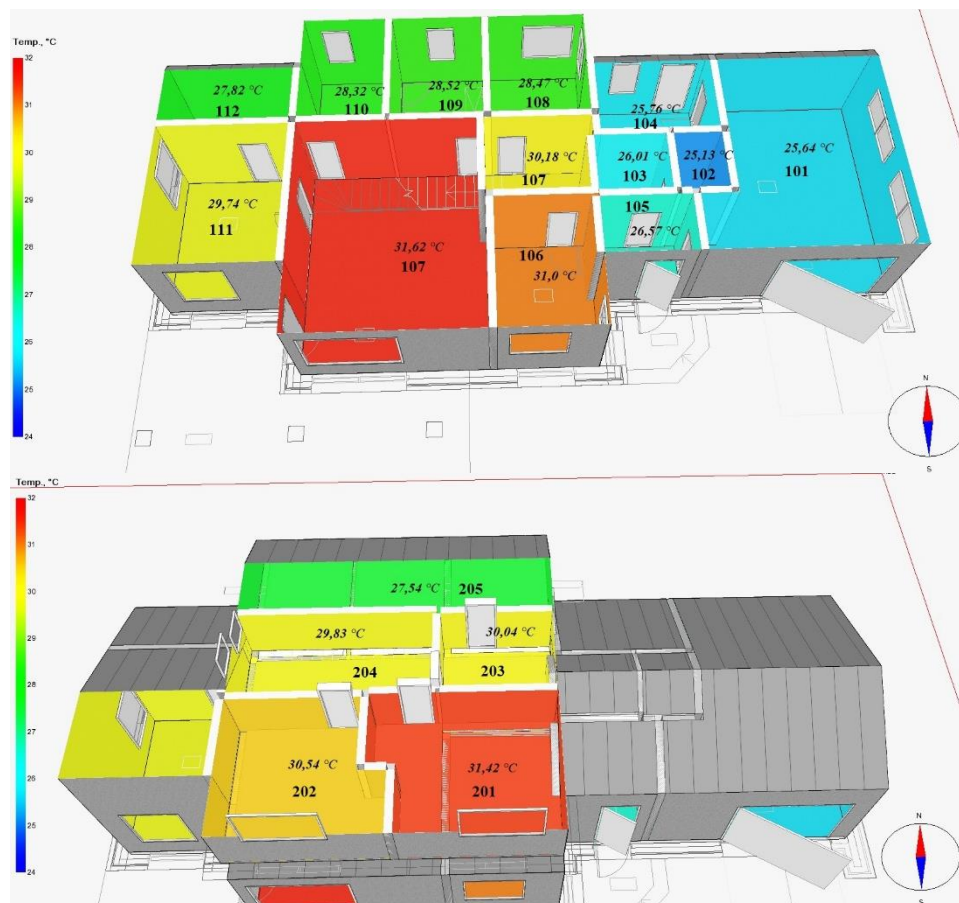
Mėnuo	Patalpų šildymas	Patalpų vėsinimas	AHU šildymas	AHU vėsinimas	Karšto vandens ruoš.
1	3211.0	0.0	0.0	0.0	108.5
2	2936.0	0.0	0.0	0.0	98.0
3	2496.0	0.3	0.0	0.0	108.5
4	1484.0	6.8	0.0	0.0	105.0
5	693.2	13.3	0.0	0.0	108.5
6	348.9	24.2	0.0	0.0	105.0
7	162.5	71.7	0.0	0.0	108.5
8	163.6	81.7	0.0	0.0	108.5
9	579.8	14.5	0.0	0.0	105.0
10	1340.0	3.6	0.0	0.0	108.5
11	2273.0	0.1	0.0	0.0	105.0
12	3154.0	0.0	0.0	0.0	108.5
<b>Viso</b>	<b>18842.0</b>	<b>216.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1277.5</b>



2.9 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (pirminis pastato modelis)

Vėsinimo prietaisai yra parenkami patalpoms, esančioms pietinėje pastato pusėje, t. y. svetainė, miegamasis, darbo kambarys ir abudu vaikų kambariai. 2.10 pav. yra sužymėtos patalpos, 2.7 lent. pateikiama eksplikacija su patalpų plotais, tūriais, nustatytais temperatūromis šildymo, vėsinimo poreikiams tenkinti. Lentelėje nurodytos reikšmės yra naudojamos visose modeliavimo alternatyvose, reikšmės nesikeis. Vidaus patalpų temperatūra daugiausiai pakyla svetainės ir vaikų kambaryje Nr.1, kuriose temperatūra pasiekia 30,90 °C ir 31,42 °C atitinkamai. Mažiausiai patalpų temperatūra išauga, kurios yra šiaurinėje pastato pusėje. Todėl vėsinimo poreikis yra parenkamas būtent toms patalpoms, kurios daugiausiai perkaista. Toliau darbe šis modelis bus vadinamas – pirminis pastato modelis, siekiant atskirti jį nuo nagrinėjamų alternatyvų. Trečiame skyriuje bus nagrinėjamos alternatyvos, kuomet terminė masė didinama arba mažinama ir lyginama su pirminiu pastato modeliu, siekiant nustatyti terminės masės įtaką energetiniam efektyvumui ir vidaus patalpų mikroklimatui.





2.10 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (pirminis pastato modelis)

2.6 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (pirminis pastato modelis)

Patalpos Nr.	Patalpa	Temperatūra, °C
101	Garažas	25,64
102	Sandėliukas Nr. 1	25,13
103	Sandėliukas Nr. 2	26,01
104	Katilinė	25,76
105	Tambūras	26,57
106	Darbo kambarys	31,00
107	Svetainė	30,90
108	Virtuvė	28,47
109	Tualetu pagalbinė patalpa	28,52
110	Tualetas/vonia	28,32
111	Miegamasis	29,74
112	Drabužinė	27,82
201	Vaikų kambarys Nr. 1	31,42
202	Vaikų kambarys Nr. 2	30,54
203	Tualetas/vonia	30,04
204	Koridorius	29,83
205	Palėpė	27,54

2.7 lentelė. Nagrinėjamo pastato patalpų eksplikacija, šildymo, vėsinimo numatytosios temperatūros reikšmės

Patalpos Nr.	Pavadinimas	Plotas, m <sup>2</sup>	Tūris, m <sup>3</sup>	Numatytoji temperatūra šildymui, °C	Numatytoji temperatūra vėsinimui, °C
101	Garažas	29,97	108,00	12	-
102	Sandėliukas Nr. 1	1,99	8,45	12	-
103	Sandėliukas Nr. 2	3,29	14,01	12	-
104	Katilinė	8,00	27,27	12	-
105	Tambūras	3,81	13,35	16	-
106	Darbo kambarys	9,67	28,99	23,08	26
107	Svetainė	36,56	109,68	23,36	24
108	Virtuvė	8,78	26,34	23,24	-
109	Tualetų pagalbinė patalpa	8,19	24,57	22,51	-
110	Tualetas/vonia	7,74	23,21	22,51	-
111	Miegamasis	14,28	66,14	23,88	26
112	Drabužinė	6,55	21,51	23,88	-
201	Vaikų kambarys Nr. 1	15,36	59,63	23,88	26
202	Vaikų kambarys Nr. 2	13,30	49,69	23,88	26
203	Tualetas/vonia	6,60	17,94	22,51	-
204	Koridorius	11,67	30,74	23,24	-
205	Palėpė	23,80	40,84	12	-
<b>Viso:</b>		<b>209,56</b>	<b>670,36</b>		

#### 2.4. Tiriamosios dalies išvados

1. Analizuojamo pastato vidutinė vidaus patalpų vidaus temperatūra nustatyta 23,24 °C.
2. Nagrinėjamo pastato dujų suvartojimas 2018 m. vasario mėn. šildymui ir karšto vandens ruošimui yra 290 m<sup>3</sup> gamtinių dujų, o tai sudaro 3027,31 kWh šiluminės energijos. Modelio, sukurto *IDA-ICE* programine įranga, sąnaudos šildymui ir karšto vandens ruošimui yra 3034 kWh. Modelio neatitikimas su realiu pastato yra 0,28 %.
3. Analitiškai nagrinėjamo pirminio pastato modelio nustatytos metinės energijos sąnaudos šildymui – 18842 kWh.
4. Kai pastate nemodeliuojama vėsinimo sistema, pietinėje fasado pusėje esančių patalpų temperatūra siekia iki 31 °C. Patalpų, esančių pietinėje fasado pusėje (svetainė, miegamasis, darbo kambarys ir abudu vaikų kambariai), metinis energijos poreikis vėsinimui sudarytų 216,2 kWh, priimant, kad patalpose palaikoma 24 ÷ 26 °C temperatūra.

### 3. Alternatyvių pastato konstrukcinių sprendinių analizė

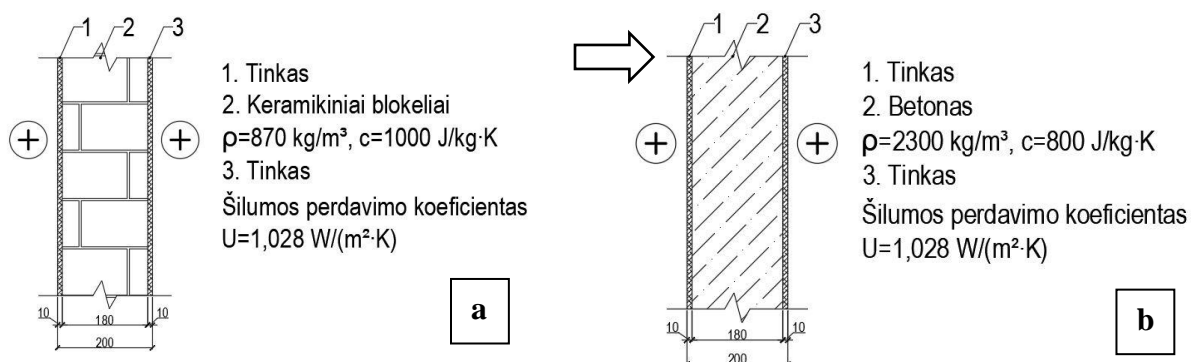
Šiame skyriuje bus nagrinėjamos skirtingos vidaus ir išorės sienos, siekiant išaiškinti pastato masyvumo įtaką mikroklimatui ir jo energetiniam efektyvumui. Bus keičiamos pastato sienų konstrukcijos, išlaikant tą pačią šilumos perdavimo koeficiento reikšmę, siekiant, jog būtų išlaikomos tos pačios sąlygos ir nustatoma konstrukcijos įtaka energijos suvartojimui, o ne pasikeitusio šilumos perdavimo koeficiento reikšmė. Todėl kiekvienu atveju, keičiant konstrukcijos medžiagą, bus keičiama: medžiagos tankis ir savitoji šiluminė talpa, tačiau šilumos laidumo reikšmė paliekama tokia pati kaip pirminiame pastato modelyje, siekiant išlaikyti tokį patį šilumos perdavimo koeficientą. Taip pat pradinės sąlygos išlieka tokios pačios kaip pateikiama 2.2 lent. Kiekvienai alternatyvai taip pat nagrinėjamas modelis, kuriame nėra tenkinamas vėsinimo poreikis, siekiant išaiškinti kaip kinta vidaus patalpų temperatūra, esant vėsinimui ir be jo.

#### 3.1. Pastato vidaus temperatūros bei energijos sąnaudų analizė, kai analizuojamo pastato terminė masė padidinama

Norint nustatyti, kokią įtaką turi masyvumas mikroklimatui ir energetiniam efektyvumui, buvo pasirinkta sienų konstrukcijas pakeisti masyvesnėmis – betoninėmis. Betonas pasižymi dideliu savo tankiu, taip pat turi aukštą savitosios šiluminės talpos rodiklį, šie parametrai leidžia šiai medžiagai akumuliuoti didelius energijos kiekius, taip pat krentant temperatūrai, sukauptą šilumą atiduoti į aplinką.

##### 3.1.1. I alternatyva (vidaus sienos – betoninės)

Pirmuoju atveju bus keičiamos vidinės sienos į betonines, vietoj tuščiavidurių keraminių blokelių, išorės sienos paliekamos kaip realiame pastate (žr. 2.5 pav.). Keičiama konstrukcijos detalė pateikiama 3.1 pav., sienos storis ir šilumos perdavimo koeficientas išlaikomas toks pat, kad nesikeistų pastato šildomas plotas ir šilumos perdavimas per vidines atitvaras.

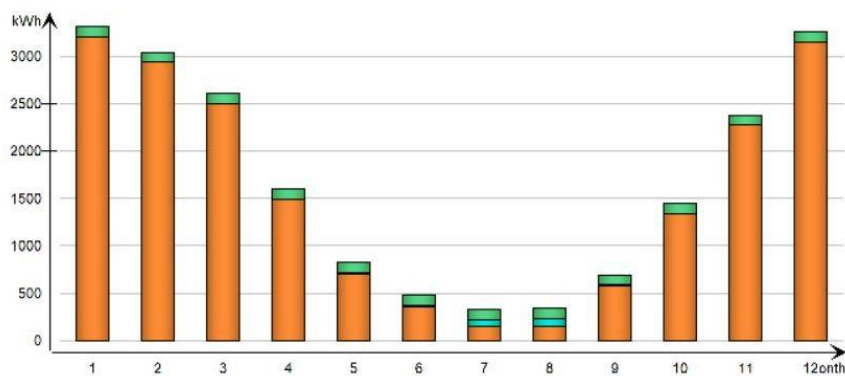


3.1 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) I alternatyva

## Energijos sąnaudos

kWh

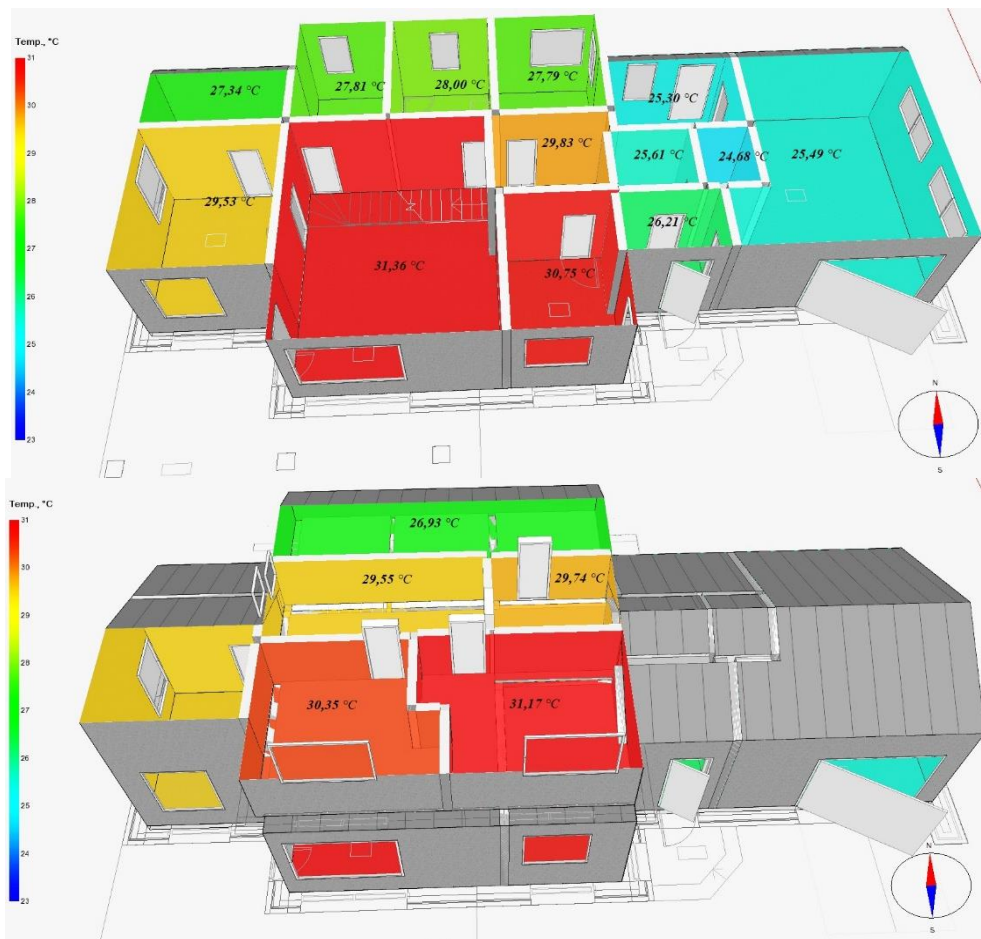
Mėnuo	Patalpų šildymas	Patalpų vėsinimas	AHU šildymas	AHU vėsinimas	Karšto vandens ruoš.
1	3212.0	0.0	0.0	0.0	108.5
2	2937.0	0.0	0.0	0.0	98.0
3	2497.0	0.3	0.0	0.0	108.5
4	1488.0	6.5	0.0	0.0	105.0
5	694.6	12.8	0.0	0.0	108.5
6	349.7	23.1	0.0	0.0	105.0
7	153.8	64.2	0.0	0.0	108.5
8	152.1	74.9	0.0	0.0	108.5
9	572.4	14.2	0.0	0.0	105.0
10	1333.0	3.2	0.0	0.0	108.5
11	2272.0	0.1	0.0	0.0	105.0
12	3150.0	0.0	0.0	0.0	108.5
<b>Viso</b>	<b>18811.6</b>	<b>199.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1277.5</b>



3.2 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (I alternatyva)

Pateiktame 3.2 pav. metinės energijos sąnaudos šildymui – 18811,6 kWh, o vėsinimui – 199,3 kWh. Lyginant I alternatyvą su pirminiu pastato modeliu, sąnaudos šildymui sumažėjo 0,16 %, ženklesnė įtaka yra patalpų vėsinimui – suvartojimas sumažėjo 8,48 %. Pastato vėsinimas yra labai svarbus karštuoju periodu, tai turi įtakos mikroklimatui, kadangi esant didesnei patalpos temperatūrai, žmonės jaučiasi nekomfortiškai.

Maksimalias patalpų temperatūras iliustruoja 3.3 pav., nagrinėjamas modelis, kuomet vėsinimo nėra. Pirminiame pastato modelyje, kuomet nėra vėsinimo, pietinėje pusėje esančios patalpos, kaip pavyzdžiui, svetainė ir miegamasis, kuriose atitinkamai temperatūros yra 30,90 °C ir 29,74 °C. Palyginimui pastate, kurio vidaus sienos yra keičiamos į betonines, tų pačių patalpų temperatūra sumažėja, kai vėsinimo poreikis nėra vertinamas. Maksimali temperatūra svetainėje – 30,60 °C, o miegamajame – 29,53 °C, mikroklimato sąlygos patalpose pagerėja, kadangi temperatūros atitinkamai sumažėja 0,97 % ir 0,71 %. Kitose patalpose temperatūra procentiškai taip pat sumažėja, kai terminė masė yra padidinama (vidaus sienos pakeičiamos į betonines).



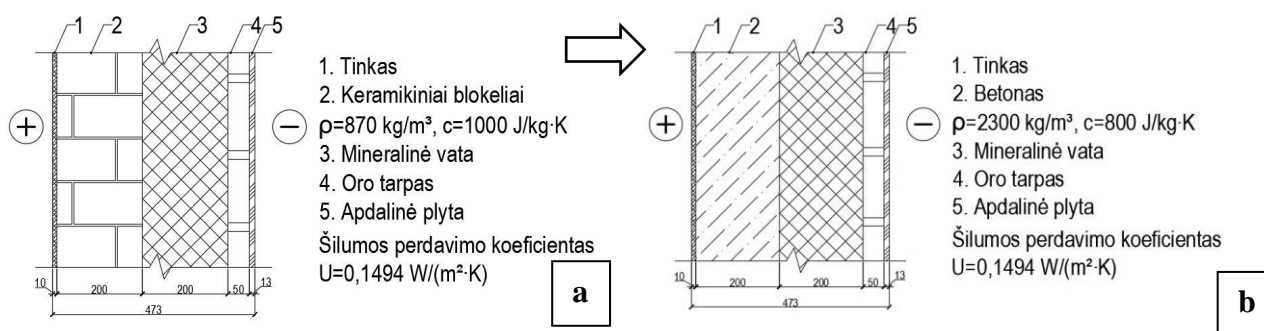
3.3 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (I alternatyva)

3.1 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (I alternatyva)

Patalpos Nr.	Patalpa	Temperatūra, °C
101	Garažas	25,49
102	Sandėliukas Nr. 1	24,68
103	Sandėliukas Nr. 2	25,61
104	Katilinė	25,30
105	Tambūras	26,21
106	Darbo kambarys	30,75
107	Svetainė	30,60
108	Virtuvė	27,79
109	Tualetų pagalbinė patalpa	28,00
110	Tualetas/vonia	27,81
111	Miegamasis	29,53
112	Drabužinė	27,34
201	Vaikų kambarys Nr. 1	31,17
202	Vaikų kambarys Nr. 2	30,95
203	Tualetas/vonia	29,74
204	Koridorius	29,55
205	Palėpė	26,93

### 3.1.2. II alternatyva (išorės sienos – betoninės)

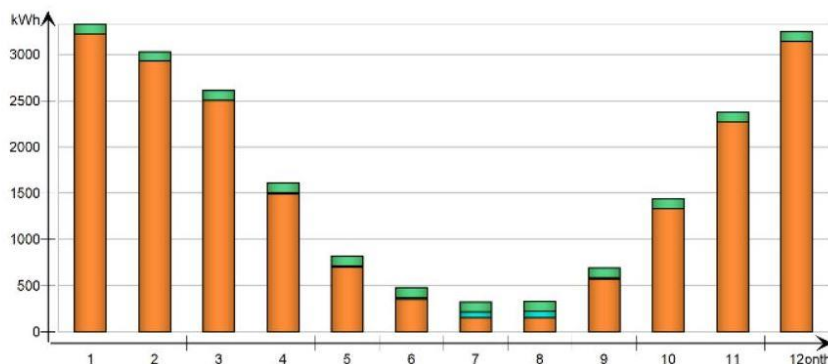
II-oje alternatyvoje yra akcentuojamos išorinės betoninės sienos (žr. 3.4 pav.), vidinė sienos detalė išlieka tokia pati kaip pradiname pastato modelyje (žr. 2.6 pav.). Pradinės sąlygos išlaikomos kiekvienoje iš alternatyvų, siekiant objektyviai palyginti konstrukcijas ir jų įtaką energetiniam efektyvumui ir vidaus patalpų mikroklimatui.



3.4 pav. Keičiama išorinė sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) II alternatyva

#### Energijos sąnaudos

Mėnuo	kWh				
	Patalpų šildymas	Patalpų vėsinimas	AHU šildymas	AHU vėsinimas	Karšto vandens ruoš.
1	3217.0	0.0	0.0	0.0	108.5
2	2933.0	0.0	0.0	0.0	98.0
3	2504.0	0.3	0.0	0.0	108.5
4	1495.0	6.2	0.0	0.0	105.0
5	698.0	12.8	0.0	0.0	108.5
6	349.5	23.6	0.0	0.0	105.0
7	152.5	65.0	0.0	0.0	108.5
8	150.8	75.5	0.0	0.0	108.5
9	571.6	14.6	0.0	0.0	105.0
10	1332.0	3.4	0.0	0.0	108.5
11	2270.0	0.1	0.0	0.0	105.0
12	3144.0	0.0	0.0	0.0	108.5
<b>Viso</b>	<b>18817.4</b>	<b>201.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1277.5</b>

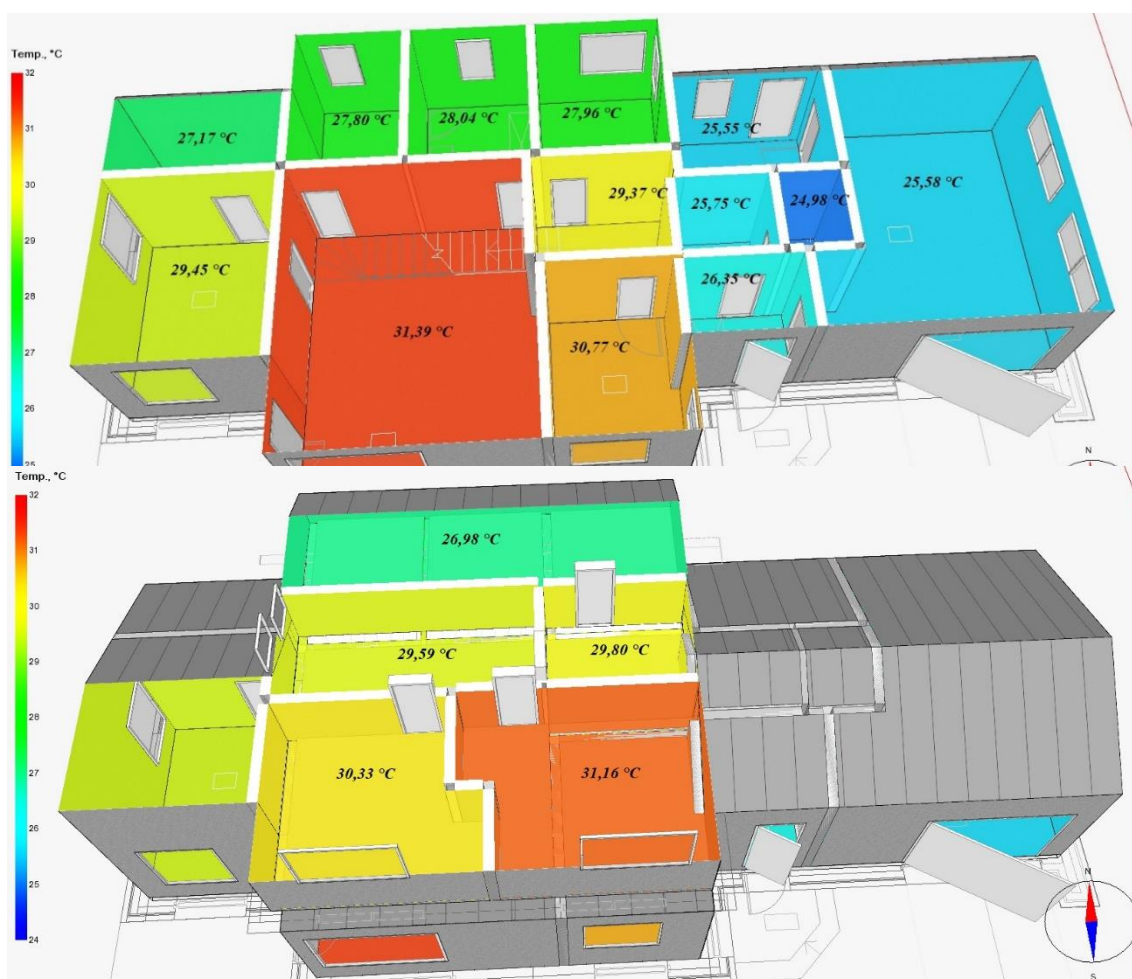


3.5 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (II alternatyva)

Gaunamos energijos sąnaudos šildymui – 18817,4 kWh, vėsinimui – 201,4 kWh (žr. 3.5 pav.). Lyginant šiuos rodiklius, energijos sąnaudos yra mažesnės už pirminio pastato modelio suvartojimus: šildymui – 0,13 %, vėsinimui – 7,35 %, tačiau rezultatai gaunami didesni lyginant



su I-ios alternatyvos modeliui, šildymui – 0,03 %, vėsinimui – 1,05 %. Taip pat šiam modeliui buvo atlikta patalpų perkaitimo analizė, kuri parodo, kokios pasiekiamos maksimalios patalpų temperatūros, kai vėsinimo nėra. Vėsinamos yra, tik fasado pietinėje pusėje, esančios patalpos, tačiau ženklūs pokyčiai pasireiškia ir kitose patalpose. Šioje II-oje alternatyvoje, atlikus modeliavimą, maksimalios patalpų perkaitimo temperatūros, kai vėsinimo nėra: miegamasis – 29,45 °C, svetainė – 30,68 °C, darbo kambarys – 30,77 °C. Temperatūrinė dinamika pasiskirsto lygiai taip pat kaip ir energijos suvartojimas, perkaitimas yra didesnis negu I-oje alternatyvoje, tačiau mažesnis negu pirminiame pastato modelyje. Taip pat sumažėja nevėsinamų patalpų temperatūra, kuomet vėsinimo nėra ir gretimose patalpose, lyginant su pirminiu pastato modeliui, tualetu/vonios II-ame aukšte temperatūra – 29,80 °C, virtuvėje – 27,96 °C, o tai yra 0,79 % ir 1,79 % atitinkamai mažiau.



3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (II alternatyva)

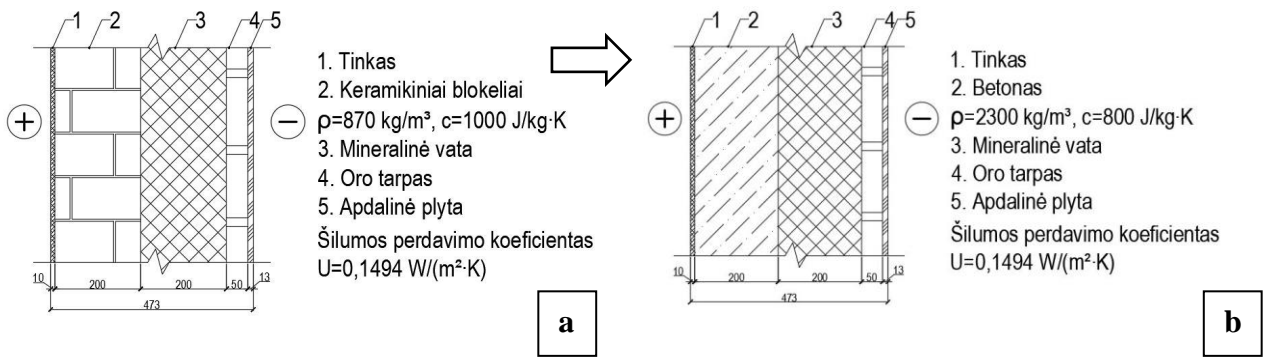
3.2 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (II alternatyva)

<b>Patalpos Nr.</b>	<b>Patalpa</b>	<b>Temperatūra, °C</b>
101	Garažas	25,58
102	Sandėliukas Nr. 1	24,98
103	Sandėliukas Nr. 2	25,75
104	Katilinė	25,55
105	Tambūras	26,35
106	Darbo kambarys	30,77
107	Svetainė	30,68
108	Virtuvė	27,96
109	Tualetų pagalbinė patalpa	28,04
110	Tualetas/vonia	27,80
111	Miegamasis	29,45
112	Drabužinė	27,17
201	Vaikų kambarys Nr. 1	31,16
202	Vaikų kambarys Nr. 2	30,33
203	Tualetas/vonia	29,80
204	Koridorius	29,59
205	Palėpė	26,98

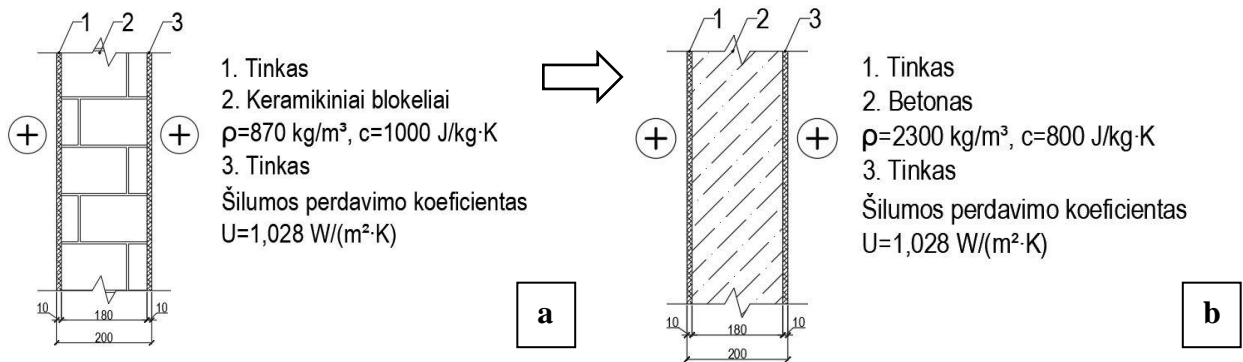
### 3.1.3. III alternatyva (vidaus, išorės sienos – betoninės)

Paskutiniu atveju, kuomet terminė masė padidinama, bus nagrinėjamos vidaus ir išorės sienos – betoninės, jų detalės yra pateikiamos 3.7 ir 3.8 pav. Gaunamos metinės energijos sąnaudos šildymui – 18794,2 kWh, vėsinimui – 187,3 kWh (žr. 3.9 pav.). Pasiekiamas mažiausias energijos sąnaudų suvartojimas lyginant su visomis nagrinėjamomis alternatyvomis ir pirminiu pastato modeliu. Šildymo poreikis 0,25 %, vėsinimo 15,43 % mažesnis negu realiame pastate, o lyginant su II-ąja alternatyva sąnaudos mažesnės: šildymui – 0,09 %, vėsinimui – 6,40 %. Galima teigti, jog betoninis vidaus ir išorės sienų konstruktyvas pasiekia geriausias rodiklius ir yra energetiškai efektyviausias iš visų nagrinėjamų alternatyvų. Temperatūrinė dinamika taip pat dėsningai kartojasi ir yra geriausia, nes pasiekiamos mažiausios temperatūros perkaitimo metu.





3.7 pav. Keičiama išorės sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) III alternatyva

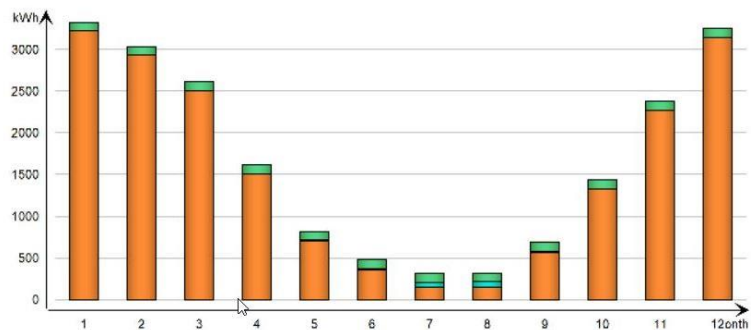


3.8 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) III alternatyva

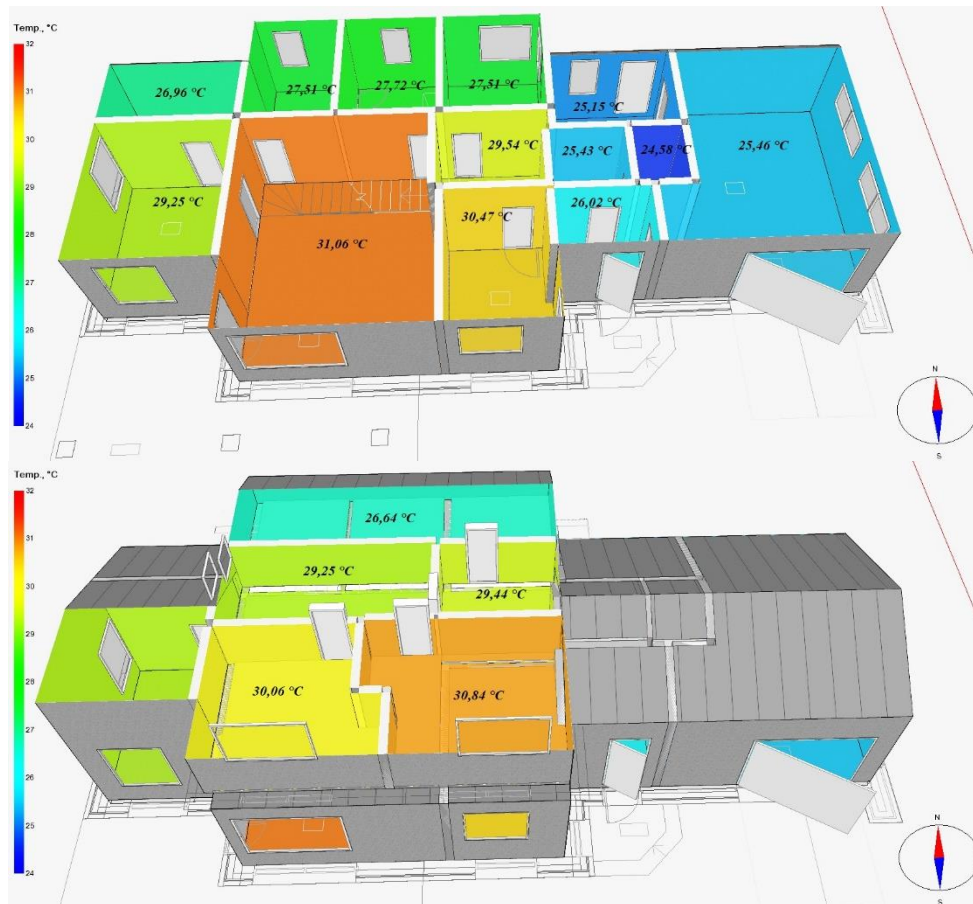
**Energijos sąnaudos**

**kWh**

Mėnuo	Patalpų šildymui	Patalpų vėsinimui	AHU šildymas	AHU vėsinimas	Karšto vandens ruoš.
1	3218.0	0.0	0.0	0.0	108.5
2	2935.0	0.0	0.0	0.0	98.0
3	2505.0	0.3	0.0	0.0	108.5
4	1500.0	5.9	0.0	0.0	105.0
5	699.7	12.3	0.0	0.0	108.5
6	350.1	22.7	0.0	0.0	105.0
7	146.5	58.7	0.0	0.0	108.5
8	141.2	70.1	0.0	0.0	108.5
9	564.7	14.2	0.0	0.0	105.0
10	1325.0	3.1	0.0	0.0	108.5
11	2269.0	0.1	0.0	0.0	105.0
12	3140.0	0.0	0.0	0.0	108.5
<b>Viso</b>	<b>18794.2</b>	<b>187.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1277.5</b>



3.9 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (III alternatyva)



3.10 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (III alternatyva)

3.3 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (III alternatyva)

Patalpos Nr.	Patalpa	Temperatūra, °C
101	Garažas	25,46
102	Sandėliukas Nr. 1	24,58
103	Sandėliukas Nr. 2	25,43
104	Katilinė	25,15
105	Tambūras	26,02
106	Darbo kambarys	30,47
107	Svetainė	30,30
108	Virtuvė	27,51
109	Tualetų pagalbinė patalpa	27,72
110	Tualetas/vonia	27,51
111	Miegamasis	29,25
112	Drabužinė	26,96
201	Vaikų kambarys Nr. 1	30,84
202	Vaikų kambarys Nr. 2	30,06
203	Tualetas/vonia	29,44
204	Koridorius	29,25
205	Palėpė	26,64

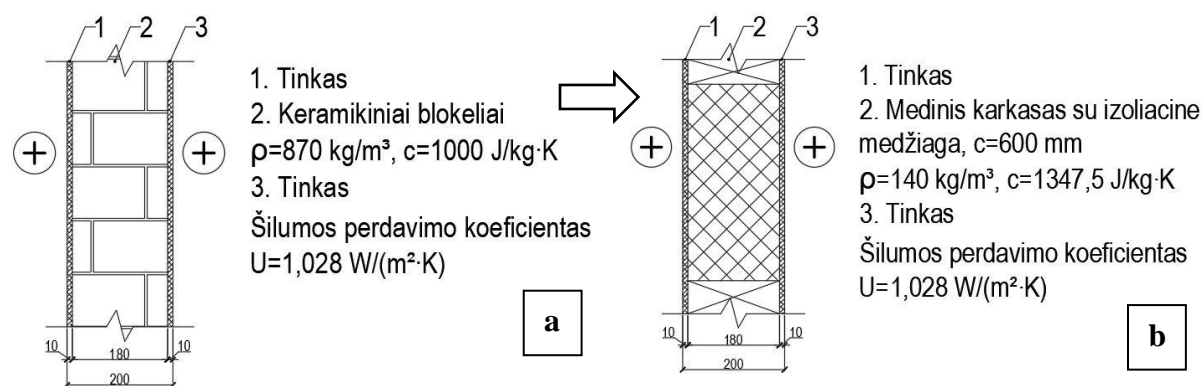
Maksimalias patalpų temperatūras iliustruoja 3.10 pav., kuomet vėsinimo nėra. Pirminiame pastato modelyje, kuomet nėra vėsinimo, pietinėje pusėje esančios patalpos, kaip pavyzdžiui, vaikų kambarys Nr. 1 ir vaikų kambarys Nr. 2, kuriose atitinkamai temperatūros yra 31,42 °C ir 30,54 °C. Palyginimui modelyje, kurio vidaus, išorės sienos yra keičiamos į betonines, tų pačių patalpų temperatūra sumažėja, t. y. 30,84 °C ir 30,06 °C, kai vėsinimo poreikis nėra vertinamas. Lyginant su termiškai lengvesnėmis konstrukcijomis, kaip pavyzdžiui, visu mediniu karkasu, tų pačių patalpų temperatūros išauga ir yra didesnės: vaikų kambaryje Nr. 1 – 4,41 %, vaikų kambaryje Nr. 2 – 3,43 %. Šie gauti rezultatai, parodo, jog modelio su betoninėmis vidaus ir išorės sienomis mikroklimato parametrai yra geresni ir žmonės tokioje aplinkoje jaustųsi komfortiškiau.

### 3.2. Pastato vidaus temperatūros bei energijos sąnaudų analizė, kai analizuojamo pastato terminė masė sumažinama

Terminės masės sumažinimui bus naudojama mediena, kuri savyje negali sukaupti daug šilumos ir vėstant didelį kiekį jos atiduoti į aplinką. Todėl pasirenkamas medinis karkasas, kuris yra apšiltintas termoizoliacine vata, siekiant vienodų sąlygų visiems tyrimo modeliams, sienų detalių šilumos perdavimo koeficientas yra išlaikomas. Medienos šilumos laidumas yra mažesnis lyginant su betonu ir blokeliais.

#### 3.2.1. IV alternatyva (vidaus sienos – medinis karkasas)

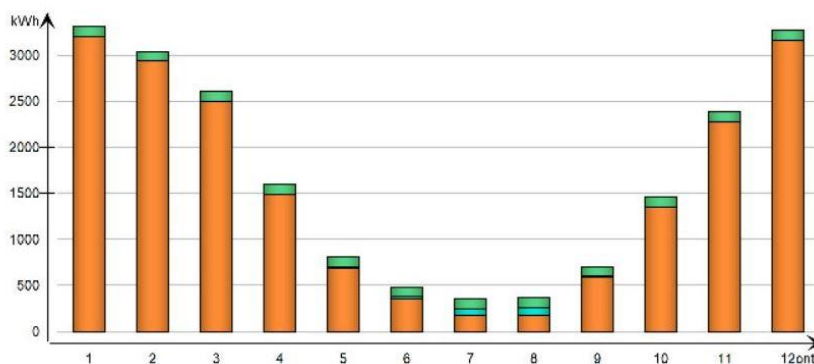
Pirmuoju atveju, kuomet terminė masė yra sumažinama, vidaus sienos detalė pakeičiama į medinį karkasą (žr. 3.11 pav.), o išorės siena lieka kaip pirminiame pastato modelyje (žr. 2.5 pav.). Gaunamos metinės energijos sąnaudos šildymui – 18864,2 kWh, o vėsinimui – 234,5 kWh (3.12 pav.)



3.11 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė b) IV alternatyva

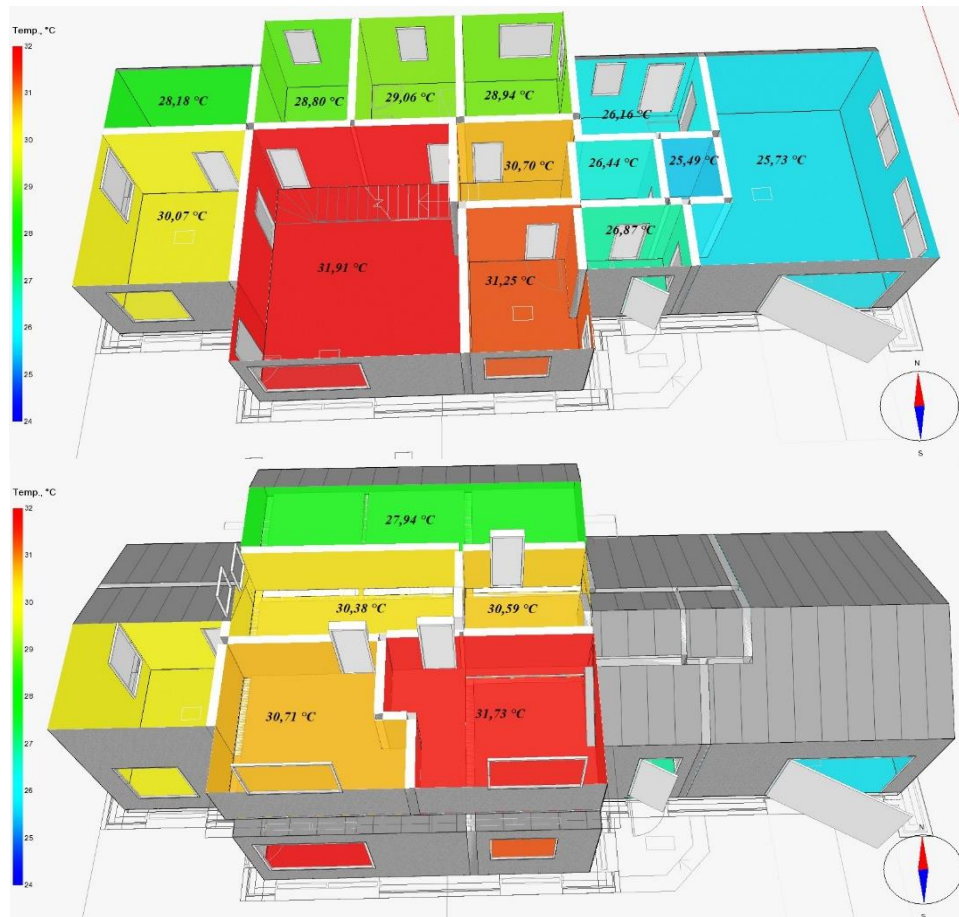
### Energijos sąnaudos

kWh					
Mėnuo	Patalpų šildymui	Patalpų vėsinimui	AHU šildymas	AHU vėsinimas	Karšto vandens ruoš.
1	3208.0	0.0	0.0	0.0	108.5
2	2934.0	0.0	0.0	0.0	98.0
3	2495.0	0.4	0.0	0.0	108.5
4	1483.0	7.5	0.0	0.0	105.0
5	692.7	14.3	0.0	0.0	108.5
6	351.6	26.1	0.0	0.0	105.0
7	169.9	78.5	0.0	0.0	108.5
8	172.8	87.8	0.0	0.0	108.5
9	585.2	15.6	0.0	0.0	105.0
10	1344.0	4.2	0.0	0.0	108.5
11	2274.0	0.1	0.0	0.0	105.0
12	3154.0	0.0	0.0	0.0	108.5
<b>Viso</b>	<b>18864.2</b>	<b>234.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1277.5</b>



3.12 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (IV alternatyva)

Gauti rezultatai parodo, jog energijos sąnaudos išauga lyginant su visomis trimis alternatyvomis, kai terminė masė yra didinama ir su pirminiu pastato modeliu. Kuomet vidinės sienos – medinis karkasas, metinės energijos sąnaudos šildymui yra 0,11 %, vėsinimui – 7,80 % didesnės lyginant su pirminiu pastato modeliu, o lyginant su III-ąja alternatyva (vidaus, išorės sienos – betoninės) šildymui – 0,37 %, vėsinimui – 20,13 % sąnaudos išauga. Maksimalios temperatūros, pastato perkaitimo metu, yra taip pat didesnės lyginant su modeliais, kuriuose terminė masė buvo padidinama, ir su pirminiu pastato modeliu. Miegamajame, kuomet nėra vėsinimo, temperatūra siekia 30,07 °C, o darbo kambaryje 31,25 °C t. y. atitinkamai 2,06 % ir 2,49 % daugiau negu III-oje alternatyvoje, kurioje terminė masė yra didžiausia. Patalpų, kuriose nėra vėsinimo ir kai jis neveikia gretimose patalpose, kaip pavyzdžiui, virtuvė ir tualetas I-jame aukšte, maksimali temperatūra siekia 28,94 °C ir 28,80 °C atitinkamai, lyginant su pirminiu pastato modeliu, patalpų temperatūra yra didesnė 1,62 % ir 1,67 % atitinkamai. Sumažinus terminę masę, temperatūra padidėja, o tai turi neigiamą įtaką pastato mikroklimatui, kadangi esant aukštesnei patalpos temperatūrai, žmonės jaučiasi nekomfortabiliai.



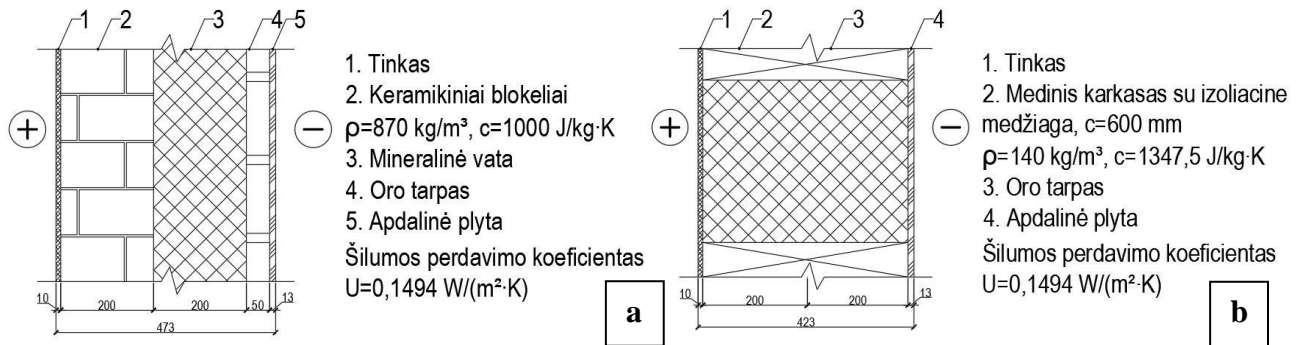
3.13 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vēsinimo (IV alternatyva)

3.4 lentelē. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vēsinimo (IV alternatyva)

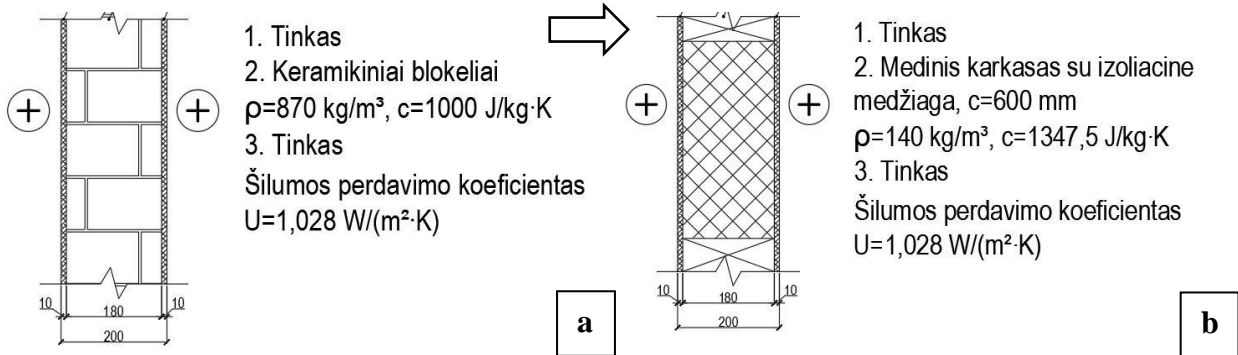
Patalpos Nr.	Patalpa	Temperatūra, °C
101	Garažas	25,73
102	Sandēliukas Nr. 1	25,49
103	Sandēliukas Nr. 2	26,44
104	Katilinē	26,16
105	Tambūras	26,87
106	Darbo kambarys	31,25
107	Svetainē	31,31
108	Virtuvē	28,94
109	Tualeta pagalbīnē patalpa	29,06
110	Tualetas/vonia	28,80
111	Miegamasis	30,07
112	Drabūzinē	28,18
201	Vaiķu kambarys Nr. 1	31,73
202	Vaiķu kambarys Nr. 2	30,71
203	Tualetas/vonia	30,59
204	Koridorius	30,38
205	Palēpē	27,94

### 3.2.3. V alternatyva (vidaus, išorės sienos – medinis karkasas)

Paskutiniu atveju, kuomet terminė masė sumažinama, bus nagrinėjamos vidaus ir išorės sienos – medinis karkasas, jų detalės yra pateikiamos 3.14 ir 3.15 pav.



3.14 pav. Keičiama išorės sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) V alternatyva



3.15 pav. Keičiama vidaus sienos konstrukcijos detalė a) projektinė; b) V alternatyva

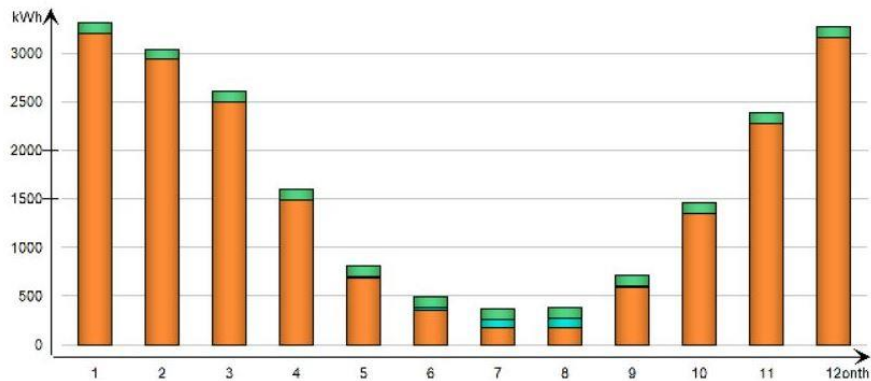
Gaunamos metinės energijos sąnaudos šildymui – 18884,0 kWh , vėsinimui – 248,6 kWh (žr. 3.16 pav.). Pasiekiamas didžiausias energijos sąnaudų suvartojimas lyginant su visomis nagrinėjamomis alternatyvomis ir pirminiu pastato modeliu. Šildymo poreikis yra 0,22 %, vėsinimo 13,03 % didesnis negu pirminiame pastato modelyje, o lyginant su III-ąja alternatyva (išorės, vidaus sienos – betoninės) sąnaudos procentiškai dar labiau išauga: šildymui – 0,48 %, vėsinimui – 24,66 %. Galima teigti, jos medinis vidaus ir išorės sienų konstruktyvas pasiekia blogiausius rodiklius ir yra mažiausiai energetiškai efektyvus iš visų nagrinėjamų alternatyvų. Temperatūrinė dinamika taip pat dėsningai kartojasi ir yra blogiausia lyginant tarp alternatyvų ir pirminio pastato modelio, nes pasiekiamos didžiausios patalpų temperatūros perkaitimo metu.



## Energijos sąnaudos

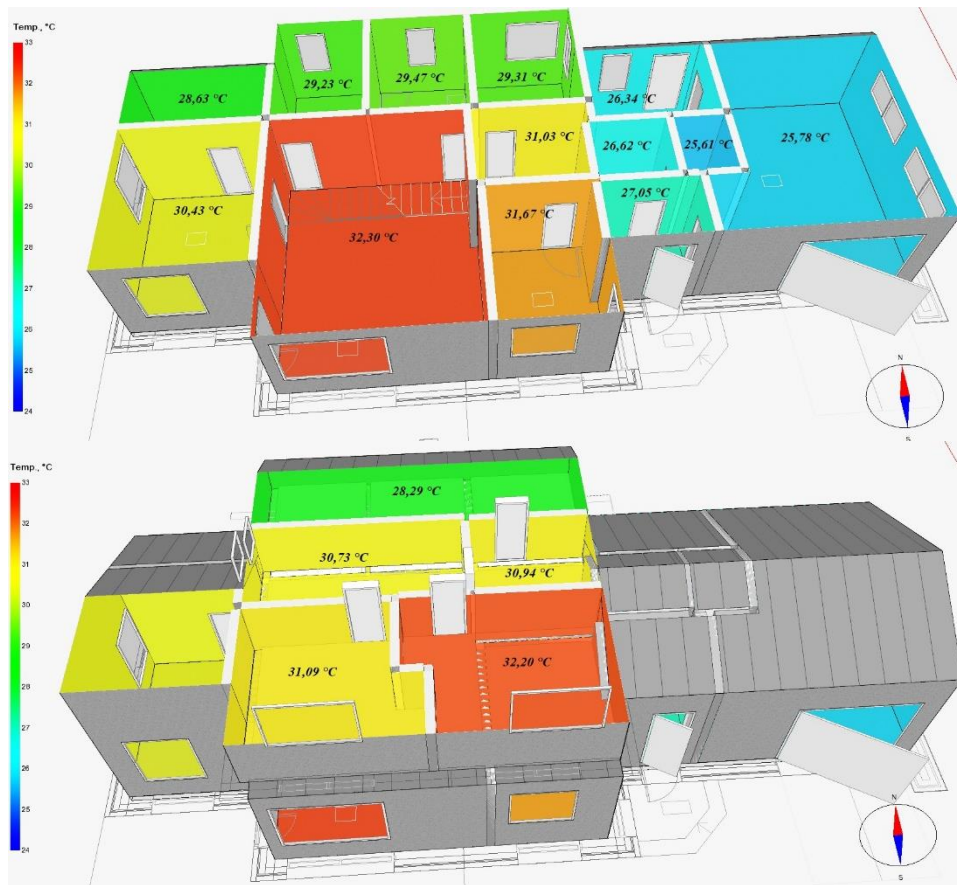
**kWh**

Mėnuo	Patalpų šildymui	Patalpų vėsinimui	AHU šildymas	AHU vėsinimas	Karšto vandens ruoš.
1	3207.0	0.0	0.0	0.0	108.5
2	2934.0	0.0	0.0	0.0	98.0
3	2494.0	0.5	0.0	0.0	108.5
4	1482.0	8.0	0.0	0.0	105.0
5	691.8	14.8	0.0	0.0	108.5
6	353.4	27.4	0.0	0.0	105.0
7	177.3	84.5	0.0	0.0	108.5
8	181.7	92.6	0.0	0.0	108.5
9	588.8	16.1	0.0	0.0	105.0
10	1346.0	4.5	0.0	0.0	108.5
11	2274.0	0.2	0.0	0.0	105.0
12	3154.0	0.0	0.0	0.0	108.5
<b>Viso</b>	<b>18884.0</b>	<b>248.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1277.5</b>



3.16 pav. Metinės energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui, karšto vandens ruošimui (V alternatyva)

Maksimalias patalpų temperatūras iliustruoja 3.17 pav., kuomet vėsinimo poreikiai nėra tenkinami. III-oje alternatyvoje (vidaus, išorės sienos – betoninės), kuomet nėra vėsinimo, pietinėje pusėje esančios patalpos, kaip pavyzdžiui, darbo kambarys ir miegamasis, kuriuose atitinkamai temperatūros yra 30,47 °C ir 29,25 °C. Palyginimui V-jame modelyje, kurio vidaus, išorės sienos yra keičiamos į medines, tų pačių patalpų temperatūra padidėja t. y. 31,67 °C ir 30,43 °C, kai vėsinimo poreikis nėra vertinamas, procentiškai padidėjimas būtų lygūs 3,79 % ir 3,88 % atitinkamai. Naudojant visą medinį karkasą, gaunamas didžiausias temperatūros išaugimas lyginant su bet kuriuo modeliu ar pirminiu pastatu. Šie gauti rezultatai, parodo, kad medinio karkaso modelyje, lyginami mikroklimato parametrai yra blogiausi, maksimalios temperatūros yra pasiekiamos didžiausios.



3.17 pav. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (V alternatyva)

3.5 lentelė. Temperatūros pasiskirstymas patalpose be vėsinimo (V alternatyva)

Patalpos Nr.	Patalpa	Temperatūra, °C
101	Garažas	25,78
102	Sandėliukas Nr. 1	25,61
103	Sandėliukas Nr. 2	26,62
104	Katilinė	26,34
105	Tambūras	27,05
106	Darbo kambarys	31,67
107	Svetainė	31,66
108	Virtuvė	29,31
109	Tualetų pagalbinė patalpa	29,47
110	Tualetas/vonia	29,23
111	Miegamasis	30,43
112	Drabužinė	28,63
201	Vaikų kambarys Nr. 1	32,20
202	Vaikų kambarys Nr. 2	31,09
203	Tualetas/vonia	29,23
204	Koridorius	30,73
205	Palėpė	28,29



### 3.3. Alternatyvinių pastato konstrukcinių sprendinių apibendrinimas

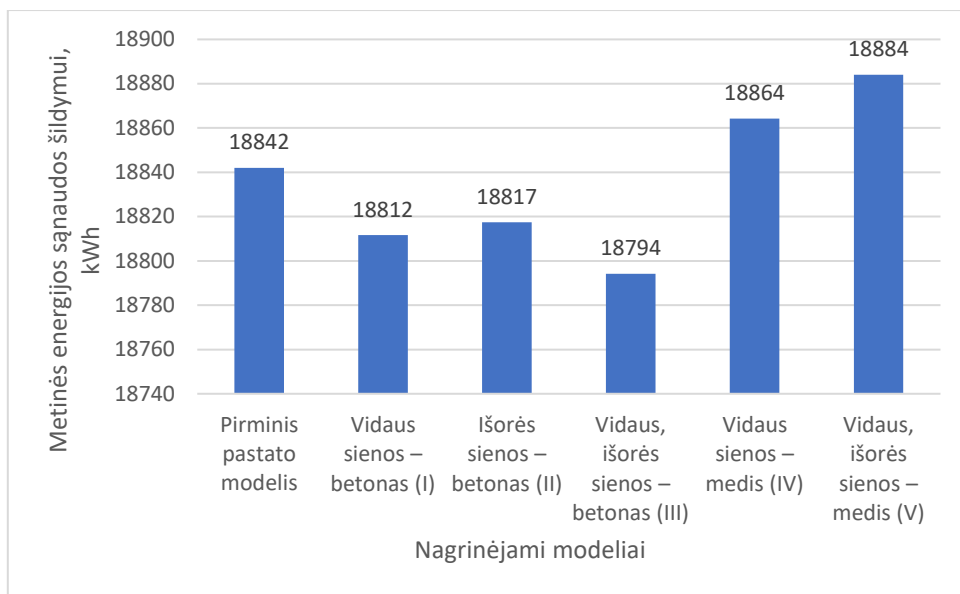
Išnagrinėjus penkias skirtingas alternatyvas ir jas palyginus su pirminiu pastato modeliu, pateikiamos suvestinės lentelės, kuriose yra metiniai energijos suvartojimai šildymui ir vėsinimui, taip pat maksimali patalpos temperatūra, kuomet nėra tenkinamas vėsinimo poreikis, pietinėje fasado pusėje esančioms patalpoms (žr. 3.6 ir 3.7 lent.). Lentelėse pateikiami procentai, pirminis pastato modelis vertinamas 100 %, o kitos alternatyvos priklausomai nuo modeliavimo rezultatų ar daugiau, ar mažiau suvartoja energijos lyginant su pirminiu modeliu.

3.6 lentelė. Metinė energijos sąnaudų, skirtų šildymui ir vėsinimui, suvestinė

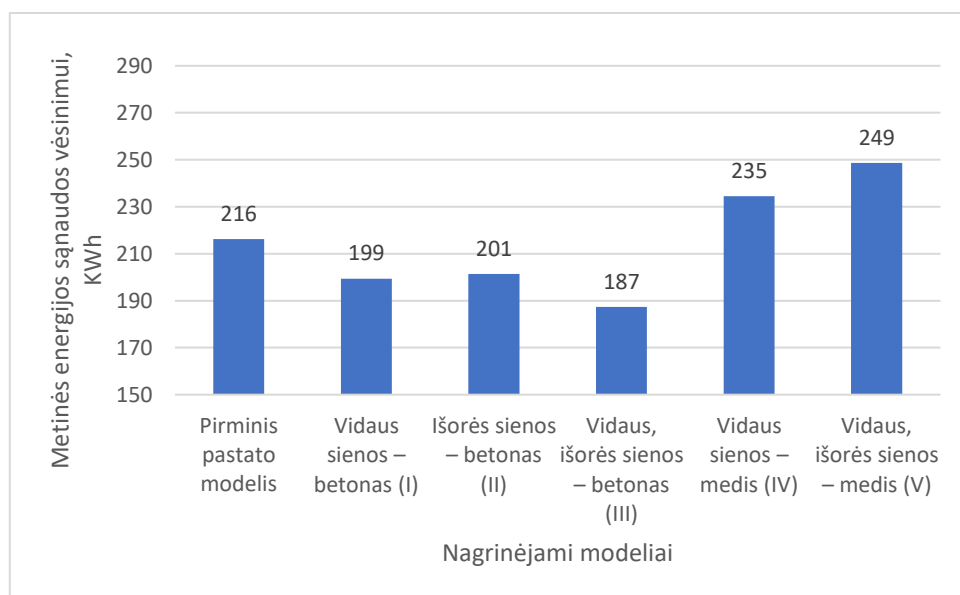
Konstrukcijos pavadinimas	Metinės energijos sąnaudos šildymui (kWh)	Metinės Energijos sąnaudos vėsinimui (kWh)
Pirminis pastato modelis	18842,0 (100)	216,2 (100)
Vidaus sienos – betonas	18811,6 (99,84)	199,3 (92,18)
Išorės sienos – betonas	18817,4 (99,87)	201,4 (93,15)
Vidaus, išorės sienos – betonas	18794,2 (99,75)	187,3 (86,63)
Vidaus sienos – medis	18864,2 (100,12)	234,5 (108,46)
Vidaus, išorės sienos – medis	18884,0 (100,22)	248,6 (114,99)

3.7 lentelė. Maksimalios patalpų temperatūros, perkaitimo laikotarpiu kuomet nėra vėsinimo

Konstrukcijos pavadinimas	Aukščiausia patalpos temperatūra perkaitinimo laikotarpiu be vėsinimo (°C)				
	Miegamasis	Svetainė	Darbo kambarys	Vaiko kambarys Nr. 1	Vaiko kambarys Nr. 2
Pirminis pastato modelis	29,74 (100)	30,90 (100)	31,00 (100)	31,42 (100)	30,54 (100)
Vidaus sienos – betonas	29,53 (99,29)	30,60 (99,03)	30,75 (99,19)	31,17 (99,20)	30,35 (99,38)
Išorės sienos – betonas	29,45 (99,02)	30,68 (99,29)	30,77 (99,26)	31,16 (99,17)	30,33 (99,31)
Vidaus, išorės sienos – betonas	29,25 (98,35)	30,30 (98,06)	30,47 (98,29)	30,84 (98,15)	30,06 (98,43)
Vidaus sienos – medis	30,07 (101,11)	31,31 (101,33)	31,25 (100,81)	31,73 (100,99)	30,71 (100,56)
Vidaus, išorės sienos – medis	30,43 (102,32)	31,67 (102,49)	31,67 (102,16)	32,20 (102,48)	31,09 (101,80)



3.18 pav. Metinių energijos sąnaudų šildymui diagrama



3.19 pav. Metinių energijos sąnaudų vėsinimui diagrama

Modelių su skirtingomis terminėmis masėmis energijos sąnaudų ir mikroklimate analizės išvados:

1. pakeitus vidaus ir išorės sienas į betonines, t. y. terminė masė padidinama, gaunamos mažiausios energijos sąnaudos šildymui ir vėsinimui, pavyzdžiui, šildymui – 0,25 %, vėsinimui – 13,37 % mažesnės lyginant su pirminiu pastato modeliu;
2. patalpų temperatūra, kuomet pastato vėsinimo nėra, yra mažiausia modelyje, kurio terminė masė didžiausia (vidaus, išorės sienos – betoninės), svetainėje temperatūros skirtumas yra

1,37 °C t. y. 4,32 % mažiau negu modelyje, kurio terminė masė mažiausia (visos sienos yra medinis karkasas);

3. pirminis pastato modelis yra energetiškai efektyvesnis už lengvą, medinio karkaso modelį, kurio energijos sąnaudos šildymui – 0,22 %, o vėsinimui – 13,03 % mažesnės. Maksimalios patalpų temperatūros perkaitimo metu, kuomet vėsinimo nėra, irgi yra mažesnės, pavyzdžiui, tualetu/vonios II-jame aukšte temperatūra yra 30,04 °C (pirminis pastato modelis), o tos pačios patalpos temperatūra jau siekia 30,94 °C, kuomet pastato konstruktyvas – medinis karkasas, o tai yra 2,90 % daugiau.
4. atlikus šių penkių alternatyvų ir pirminio pastato (realaus) modeliavimus, galima teigti, jog terminė masė turi įtaką energetiniam efektyvumui, šildymui geriausias rezultatas pasiektas 0,48 %, o vėsinimui 24,66 % mažesnės sąnaudos lyginant modelį, kurios visos sienos betoninės su modeliu, kurio konstruktyvas – medinis karkasas. Ženklesnė įtaka yra vėsinimo poreikiams tenkinti, kuomet dienos metu masyvesnės konstrukcijos sugeria daugiau šilumos negu termiškai lengvesnės, ir geba tą šilumą atiduoti nakties metu, taip išlaikant pastovesnę temperatūrą.

## Diskusija

Terminė masė turi didesnę įtaką pastato energijos sąnaudoms – šildymui ir vėsinimui, tokiu atveju, kai turimi dideli ir sąlyginai nepastovūs saulės šilumos pritekėjimai per skaidrias atitvaras, todėl šiam procesui didelę įtaką turi skaidrių ir neskaidrių atitvarų santykis skirtingose fasado pusėse. Išsamesniam terminės masės įtakos įvertinimui pastate, reikėtų išanalizuoti papildomas alternatyvas su didesniu skaidrių/neskaidrių atitvarų santykiu. Taip pat tęsiant tyrimus šia tematika, būtų galima kombinuoti pasyvias ir aktyvias terminės masės panaudojimo priemones, jas apjungiant į vieną visumą, siekiant gauti kuo efektyvesnį pastatą, kuriame komfortiškai jaustųsi esantys žmonės. Tyrimą praturtintų skirtingų medžiagiškumų konstrukcijos, kaip pavyzdžiui, fazę keičiančios medžiagos ar labai lengvas betonas. Fazę keičiančios medžiagos pasižymi dideliu šiluminės sintezės kiekiu, kuris leidžia pasiekti energetiškai efektyvesnius rodiklius, sunaudojant mažiau medžiagos. Taip pat didelis šių medžiagų tankis, leidžia sumažinti konstrukcijos storį, taip efektyviau išnaudojant gyvenamąjį plotą. Labai lengvas betonas – įprastinis cemento mišinys, tačiau tradiciniai betone naudojami užpildai pakeičiami į perdirbtą stiklą ir mikro silicio dioksidą. Šios medžiagos leidžia padidinti betono ertmes, taip padidinant oro kiekį jose, kas leidžia pagerinti medžiagos šilumos laidumo savybes. Taip pat labai lengvą betoną būtų galima pritaikyti gyvenamosios paskirties pastatų statyboms, kadangi jo stipris gniuždant yra dvigubai didesnis lyginant su keramzitbetonio blokelių stipriu.

## Išvados

1. Literatūros analizėje nustatyta, jog masyvių konstrukcijų su automatiniu langų atidarymu metinės energijos sąnaudos vėdinimui siekia 730,03 kWh, tuo tarpu realiame pastate tos pačios sąnaudos yra 1286 kWh, vadinasi naudojant masyvias konstrukcijas galima 12 % sumažinti metinės energijos sąnaudos vėdinimui [2]. Kitame tyrime, bendros metinės energijos sąnaudos šildymui ir vėsinimui dvejose skirtingose konstrukcijose: 1) plytų mūras patalpos viduje –56 MJ/m<sup>2</sup>; 2) lengvos konstrukcijos – 77,9 MJ/m<sup>2</sup>. O tai rodo, jog pasirinkus plytų mūro konstrukcija galima sutaupyti 28 % energijos šildymui ir vėsinimui [8].
2. Atlikus realaus pastato tyrimus nustatyta, jog dujų suvartojimas 2018 m. vasario mėn. šildymui ir karšto vandens ruošimui yra 290 m<sup>3</sup> gamtinių dujų, o tai sudaro 3027 kWh šiluminės energijos. Modelio, sukurto *IDA-ICE* programine įranga, sąnaudos šildymui ir karšto vandens ruošimui yra 3034 kWh. Modelio neatitikimas su realiu pastato yra 0,28 %. Analizuojant 2018 m. vasario mėn. vidaus patalpų temperatūras pagal *HOBO* daviklių rodmenis apskaičiuota, jog vidutinė vidaus patalpų temperatūra yra 23,24 °C.
3. Analizuojant penkias skirtingas alternatyvas išnagrinėta, jog pakeitus vidaus ir išorės sienas į betonines, kuomet terminė masė padidinama, gaunamos metinės energijos sąnaudos šildymui – 18794 kWh, vėsinimui – 187 kWh, tuo tarpu lengvų konstrukcijų (visos sienos – medinis karkasas) modelyje sąnaudos šildymui – 18884 kWh, o vėsinimui – 249 kWh. Masyvų konstrukcijų metinės energijos sąnaudos yra mažesnės: šildymui – 0,47 %, vėsinimui – 28,36 % lyginant su lengvų konstrukcijų modeliu.
4. Lengvų konstrukcijų (visos sienos – medinis karkasas) modelyje, kuomet nėra vėsinimo, pietinėje pusėje esanti patalpa – svetainė, kurioje temperatūra karščiausia metų diena yra 31,67 °C. Palyginimui modelyje, kurio vidaus, išorės sienos yra keičiamos į betonines, tos pačios patalpos temperatūra sumažėja t. y. 30,30 °C, kai vėsinimo poreikis nėra vertinamas. Masyvų konstrukcijų mikroklimato parametrai yra geresni: svetainės temperatūra karščiausia metų diena yra mažesnė 4,43 % lyginant su lengvų konstrukcijų modeliu.

## Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.01.02:2016. *Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas: 2016 m. lapkričio 11 d. Nr. D1-754* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-05-01]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/2c182f10b6bf11e6aae49c0b9525cbbb/vUIAHduDvW>
2. ALONSO, Maria Justo; MATHISEN, Hans Martin. Analysis of reduction of energy demands for Zero Emission Renovated Office Building by using thermal mass and ventilative cooling. *Energy Procedia*, 2017, 132: 592-597. ISSN 1876-6102
3. WERNER, Sven. International review of district heating and cooling. *Energy*, 2017. ISSN 0360-5442
4. AMOS-ABANYIE, S.; AKUFFO, F. O.; KUTIN-SANWU, V. Effects of thermal mass, window size, and night-time ventilation on peak indoor air temperature in the warm-humid climate of ghana. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013. ISSN 1537-744
5. EQUA: *IDA Indoor Climate and Energy* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-05-01]. Prieiga per: <https://www.equa.se/en/ida-ice>
6. JOHRA, Hicham; HEISELBERG, Per. Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 19-32. ISSN 1364-0321
7. HORIKIRI, Kana; YAO, Yufeng; YAO, Jun. Numerical optimisation of thermal comfort improvement for indoor environment with occupants and furniture. *Energy and Buildings*, 2015, 88: 303-315. ISSN 0378-7788
8. GREGORY, Katherine, et al. Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems. *Energy and Buildings*, 2008, 40.4: 459-465.
9. ROBERZ, F., et al. Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 432-442.
10. SHAVIV, Edna; YEZIORO, Abraham; CAPELUTO, Isaac G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable energy*, 2001, 24.3-4: 445-452.

11. DE GRACIA, Alvaro; CABEZA, Luisa F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 2015, 103: 414-419.
12. KHADIRAN, Tumirah, et al. Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 916-928.
13. TERMODECK: *The Termodeck® principle*. 2017 [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: <https://www.termodeck.com/termodeck.html>
14. SPIROLL: *New Thermo Deck system for Botswana*. 2014 [žiūrėta 2017-12-16]. Prieiga per: [http://www.bft-international.com/en/artikel/bft\\_New\\_Thermo\\_Deck\\_system\\_for\\_Botswana\\_2428896.html](http://www.bft-international.com/en/artikel/bft_New_Thermo_Deck_system_for_Botswana_2428896.html)
15. AHMED, Karrar A.; MURTADHA, Talib K.; MOHAMMAD, Wahid S. Using ThermoDeck System for Pre-Cooling/Heating to Control the Building Inside Conditions. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 2014, 10.3: 13-24.
16. CHAE, Young Tae; STRAND, Richard K. Modeling ventilated slab systems using a hollow core slab: Implementation in a whole building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 2013, 57: 165-175. ISSN 0378-7788
17. LLOYD, John W. Practical Advantages of Declarative Programming. In: *GULP-PRODE (1)*. 1994. p. 18-30.
18. CRAWLEY, Drury B., et al. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and environment*, 2008, 43.4: 661-673. ISSN 0360-1323
19. PUPEIKIS, Darius. *Impact of Thermal Inertia of Building to the Dynamic of Indoor Temperature*: Daktaro Disertacijos Santrauka. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas. 2010 [žiūrėta 2018-10-19]. 15-17 p. Prieiga per ELABa – Nacionalinė Lietuvos Akademinė Elektroninė Biblioteka.
20. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN ISO 13370:2008. *Šiluminės pastatų charakteristikos. Šilumos pernaša gruntu*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008.
21. JÓHANNESSON, Gudni. *Active heat capacity: models and parameters for the thermal performance of buildings*. 1981. PhD Thesis. Division of building technology, Lund inst. of technology [Inst. för byggnadsteknik, Tekn. högsk.]

22. HEDBRANT, Johan. *On the thermal inertia and time constant of single-family houses*. 2001. PhD Thesis. Linköpings universitet. 117 p. ISBN 91-7373-045-9.
23. INCROPERA, F. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition with Introduction to Heat Transfer Set*. New York: John Wiley&Sons, 2007. 1720 p. ISBN 0-470-17572-9.
24. LIETUVOS RESPUBLIKOS SVEIKATOS APSAUGOS MINISTERIJA. HN 42:2009. *Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas: 2009 m. gruodžio 29 d. Nr. V-1081* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-05-01]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.362676>
25. MAPS.LT: *Žemėlapiai*. 2018 [žiūrėta 2018-12-02]. Prieiga per: <http://www.maps.lt/map/default.aspx?lang=lt#q=Raps%C5%B3%20g.%205,%20Noreiki%C5%A1ki%C5%B3%20k>
26. KAUNO METEOROLOGIJS STOTIS. *2018 metų vasario mėnesio duomenys* [duomenys gauti 2018-03-13]
27. ESO: *Viršutinis dujų šilumingumas* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-10-26]. Prieiga per: [https://www.eso.lt/lt/verslui/dujos\\_235/skirstymo-paslauga-ir-duju-silumingumas/duju-silumingumas.html](https://www.eso.lt/lt/verslui/dujos_235/skirstymo-paslauga-ir-duju-silumingumas/duju-silumingumas.html)

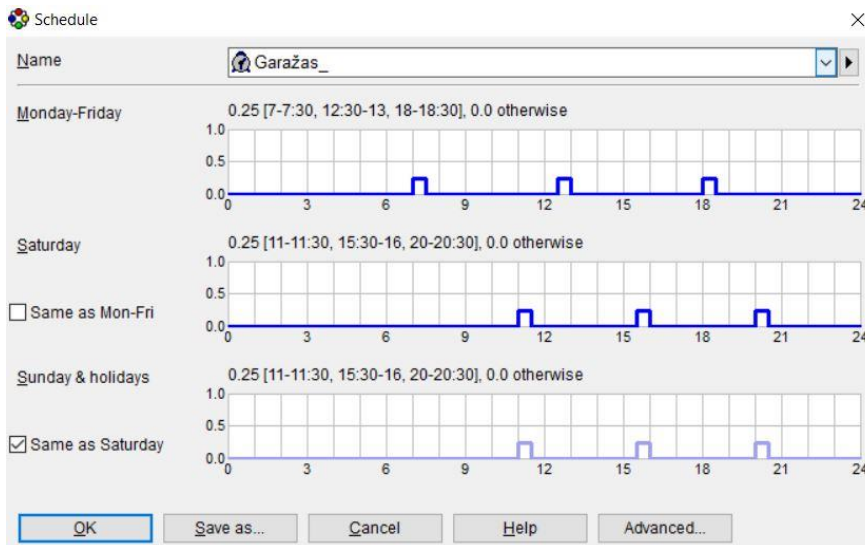


## Priedai

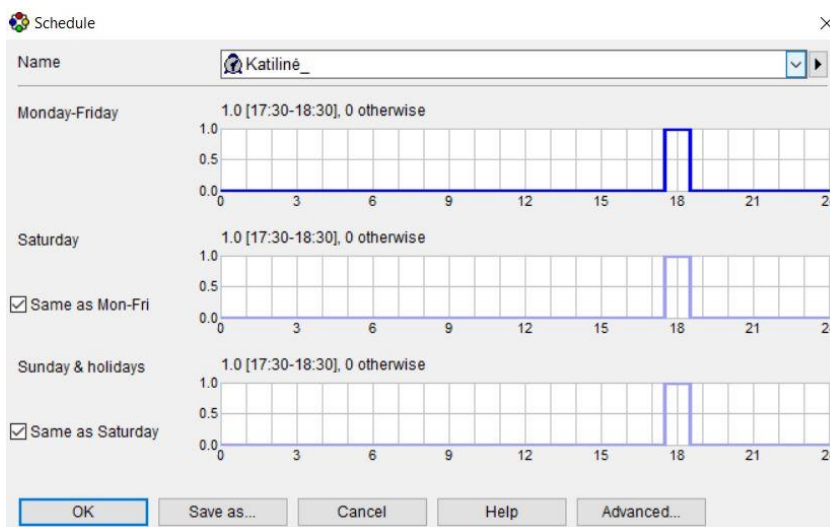
1 priedas

### Žmonių buvimo, apšvietimo ir vidaus įrangos naudojimo grafikai patalpose

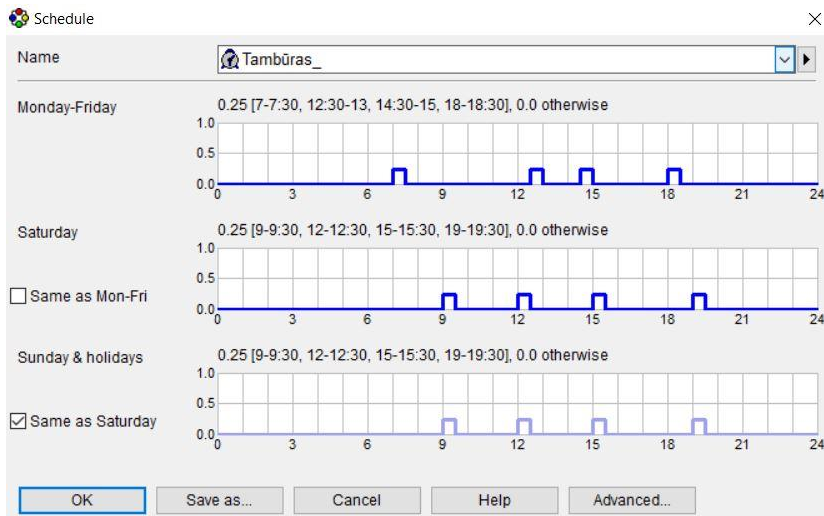
Šie grafikai nurodo, kurį laiką žmogus buvo patalpoje, kiek naudojamas apšvietimas ir viduje esanti įranga. Vienetas parodo pilną buvimą, nulis visišką nebuvimą. Taip pat kai kurioms patalpoms, skirtingos vertės yra priimamos savaitgalių ir švenčių dienomis.



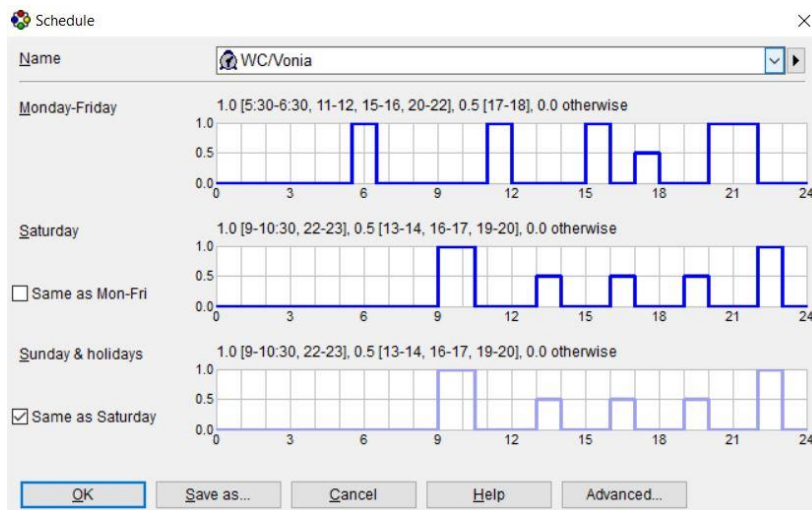
1 pav. Garažo naudojimo grafikas



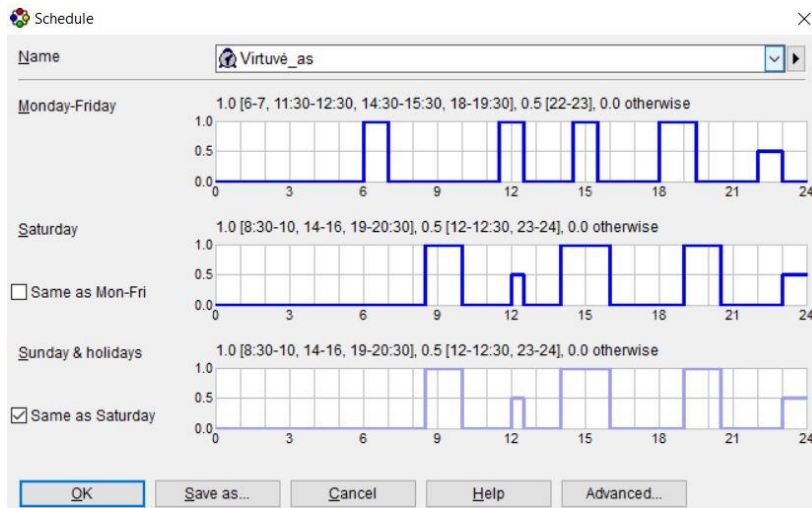
2 pav. Katilinės naudojimo grafikas



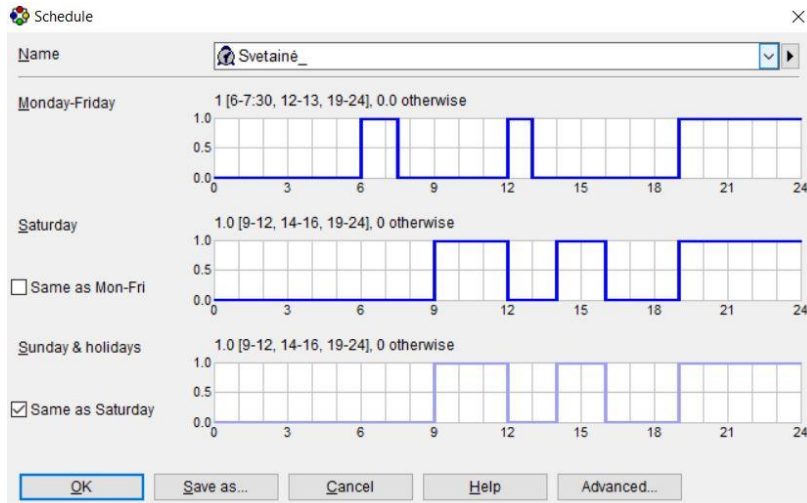
3 pav. Tambūro naudojimo grafikas



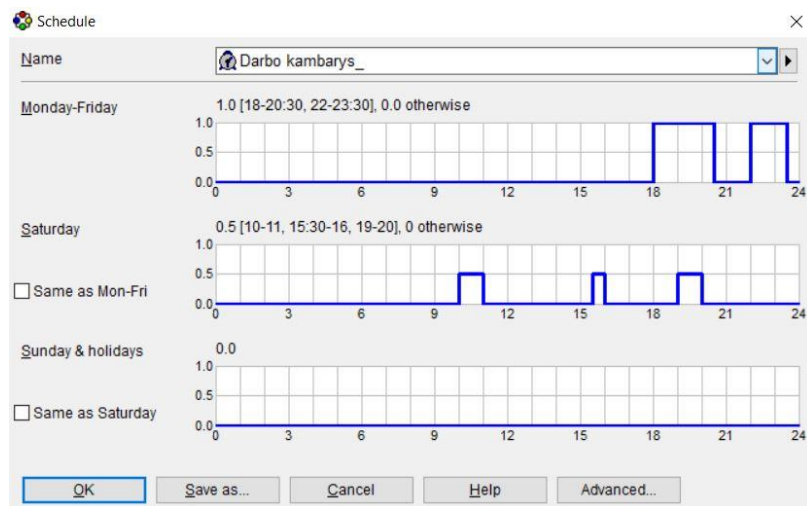
4 pav. Tualetu, vonios naudojimo grafikas



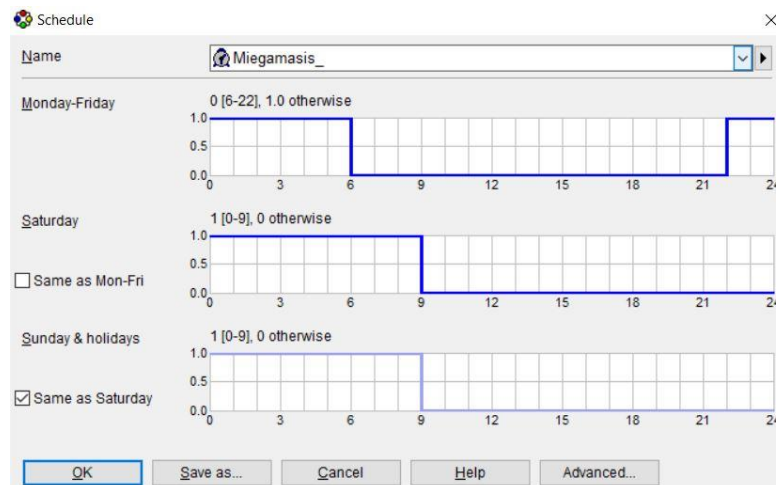
5 pav. Virtuvės naudojimo grafikas



6 pav. Svetainės naudojimo grafikas



7 pav. Darbo kambario naudojimo grafikas



8 pav. Miegamojo naudojimo grafikas