



AURELIJA STONKUVIENĖ

**ŠILUMOS SRAUTŲ PER
TERMOIZOLIACINIUS
SLUOKSNIUS SU
ŠILUMAI LAIDŽIOMIS
JUNGTIMIS TYRIMAI**

DAKTARO DISERTACIJA

K a u n a s
2 0 2 1

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

AURELIJA STONKUVIENĖ

ŠILUMOS SRAUTŲ PER
TERMOIZOLIACINIUS SLUOKSNIUS SU
ŠILUMAI LAIDŽIOMIS JUNGTIMIS TYRIMAI

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, Statybos inžinerija (T 002)

2021, Kaunas

Disertacija rengta 2016-2020 metais Kauno technologijos universiteto Architektūros ir statybos institute.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Raimondas BLIŪDŽIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, T 002).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Dalia Tysliavaitė-Blyžė

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AURELIJA STONKUVIENĖ

INVESTIGATION OF HEAT FLOW THROUGH
THERMAL INSULATION LAYERS WITH
HEAT-CONDUCTIVE CONNECTORS

Doctoral dissertation
Technological sciences, Civil Engineering (T 002)

2021, Kaunas

This doctoral dissertation was prepared at Kaunas University of Technology, Institute of Architecture and Construction, Laboratory of Building Physics during the period of 2016–2020.

Scientific Supervisor:

Prof. Dr. Raimondas BLIŪDŽIUS (Kaunas University of Technology, Technological sciences, Civil Engineering, T 002).

Doctoral dissertation has been published in:

<http://ktu.edu>

Editor:

Dalia Tysliavaitė-Blyžė

TURINYS

PAGRINDINĖS SAŲOKOS.....	7
SIMBOLIŲ SAŲAŠAS.....	8
INDEKSŲ SAŲAŠAS.....	8
LENTELIŲ SAŲAŠAS.....	9
PAVEIKSLŲ SAŲAŠAS.....	10
ĮVADAS.....	13
1. ŠILUMOS SRAUTŲ PER PASTATŲ FASADŲ KONSTRUKCIJAS TYRIMŲ LIETUVOJE IR UŽSIENYJE APŽVALGA.....	17
1.1. Šiluminių tiltelių susidarymas pastatų konstrukcijoje ir jų įtaka bendriesiems pastato šilumos nuostoliams.....	18
1.2. Vėdinamų fasadų sistemų privalumai ir trūkumai.....	21
1.3. Vėdinamuose fasaduose naudojamų tvirtinimo elementų medžiagų fizikinės, mechaninės savybės.....	23
1.4. Mažo šiluminio laidumo tarpinių panaudojimas vėdinamų fasadų sistemose.....	25
1.5. Šilumos perdavimo per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis skaičiavimo ir matavimo metodų analizė.....	27
1.5.1. Apytikslė empirinė skaičiavimo procedūra.....	28
1.5.2. Skaitinio modeliavimo metodas.....	28
1.5.3. Eksperimentinis „karštosios dėžės“ metodas.....	31
1.5.4. Natūriniai metodai.....	33
1.6. Įvairiais metodais apskaičiuotų ir išmatuotų termoizoliacinių sluoksnių su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficientų sulyginamoji analizė.....	41
1.7. Pirmojo skyriaus išvados.....	44
2. TYRIMŲ METODIKA.....	46
2.1. Tyrimų metodikos pasirinkimas.....	46
2.2. Sienos fragmento su šilumai laidžiomis jungtimis modelis ir medžiagos.....	46
2.2.1. Geometrinis modelis.....	46
2.2.2. Medžiagos.....	47
2.2.3. Medžiagų paruošimas.....	50
2.2.4. Eksperimentinių tyrimų eiga.....	51
2.3. Tyrimo sąlygos.....	54
2.4. Grafinis tyrimo algoritmas.....	55
2.5. Antrojo skyriaus išvados.....	56
3. REZULTATAI.....	57
3.1. Skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių matavimų rezultatų sulyginamoji analizė.....	57
3.1.1. Išmatuotų ir apskaičiuotų sienų fragmentų šilumos perdavimo koeficientų palyginimas.....	57
3.1.2. Temperatūrinių laukų apie jungtis palyginimas.....	60
3.2. Apytikslės šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros analizė.....	67
3.2.1. Apytikslėje skaičiavimo procedūroje naudojamos lygties fizikinė prasmė.....	67

3.2.2. Apytikslės skaičiavimo procedūros korekcijos etapai	68
3.2.3. Šilumos srautų per konstrukcijas su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimai	69
3.2.4. Pataisos koeficiento a skirtingo šiluminio laidumo jungtims pritaikymas	78
3.2.4.1. Koeficiento a supaprastintas pritaikymas sienų konstrukcijoms be oro tarpo.....	79
3.2.4.2. Koeficiento a supaprastintas pritaikymas sienų konstrukcijoms su oro tarpu.....	80
3.3. Pakoreguotos šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros patikrinimas	81
3.3.1. Fasado konstrukcija su plieninėmis jungtimis	81
3.3.2. Fasado konstrukcija su aliuminio lydinio jungtimis	83
3.3.3. Įvairių charakteristikų vėdinami fasadai	85
3.4. Pakoreguotos apytikslės skaičiavimo procedūros rekomendacijos praktikai ir jos taikymo apribojimai.....	86
3.5. Trečiojo skyriaus išvados.....	87
BENDROSIOS IŠVADOS	89
LITERATŪROS SĄRAŠAS	90
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	99
PRIEDAI	101
1 PRIEDAS	101
2 PRIEDAS	106
3 PRIEDAS	107

PAGRINDINĖS SĄVOKOS

Atitvara – pastato elementas, skiriantis patalpas nuo išorės arba nuo kitų patalpų, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse didesnis negu 4 K (STR 2.04.01:2018).

Atitvaros šilumos perdavimo koeficientas – per atitvarą pereinančio šilumos srauto tankis, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse 1 °C, W/(m²·K) (STR 2.01.02:2016).

Beveik nulinės energijos pastatas – pastatas, kurio nustatytas energinis naudingumas yra labai aukštas. Reikalingos energijos, kuri beveik lygi nuliui arba kurios suvartojama labai mažai, didžiąją dalį sudaro atsinaujinančių išteklių energija, įskaitant vietoje ar netoliese pagamintą atsinaujinančių išteklių energiją (STR 2.01.02:2016).

Ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas – šilumos srauto tankis, tenkantis šiluminio tiltelio ilgio vienetui, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse 1 °C, (W/(m·K)) (STR 2.01.02:2016).

Ilginis šiluminis tiltelis – šilumos tiltelis, kurio skerspjūvis yra vienodas išilgai vienos iš trijų ortogonalųjų ašių (ISO 10211:2017).

Pastatas – apdengtas stogu statinys, kurio didžiausią dalį sudaro patalpos.

Pastato energinis naudingumas – apskaičiuotas arba išmatuotas energijos kiekis, reikalingas patenkinti su įprastu pastato naudojimu siejamą energijos poreikį, įskaitant energiją pastato šildymo, vėsinimo, vėdinimo, karšto vandens ir pastato apšvietimo reikmėms (STR 2.01.02:2016).

Saviteji pastato atitvarų šilumos nuostoliai – šilumos srautas, pereinantis per visas pastato atitvaras iš vidaus į išorę, kai temperatūrų skirtumas 1 °C (W/K) (STR 2.01.02:2016).

Šilumai laidžios jungtys – pastato atitvaros termoizoliacinį sluoksnį kertančios metalinės ar kompozitinės jungtys, kurių šiluminis laidumas gerokai didesnis nei termoizoliacinio sluoksnio medžiagos.

Šiluminis tiltelis – pastato atitvaros dalis, kurioje paprastai vienoda šiluminė varža yra gerokai pakitusi dėl skirtingą šilumos laidumo koeficientą turinčių medžiagų dalinio ar visiško prasiskverbimo į pastato atitvarą, ir (arba) dėl konstrukcijos storio pokyčio ir (arba) dėl skirtumo tarp vidinių ir išorinių plotų, kuris atsiranda sienų, grindų ar lubų jungtyse (ISO 10211:2017).

Taškinis šilumos perdavimo koeficientas – nuostoviosios būsenos šilumos srautas, palygintas su šilumos srautu, apskaičiuotu neatsižvelgiant į taškinį šilumos tiltelį, padalintas iš aplinkos temperatūros abiejose taškinių šilumos tiltelio pusėse skirtumo (ISO 10211:2017).

Taškinis šiluminis tiltelis – lokalizuotas šilumos tiltelis, kurio įtaką galima išreikšti taškiniu šilumos perdavimo koeficientu (ISO 10211:2017).

SIMBOLIŲ SĄRAŠAS

ψ – ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas [$W/(m \cdot K)$];
 χ – taškinio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas [W/K];
 λ – šilumos laidumo koeficientas [$W/(m \cdot K)$];
 U – šilumos perdavimo koeficientas [$W/(m^2 \cdot K)$];
 ΔU – atitvaros šilumos perdavimo koeficiento pataisa [$W/(m^2 \cdot K)$];
 A – skerspjūvio plotas [m^2];
 n – kiekis atitvaros kvadratiname metre [vnt/m^2];
 d – ilgis [m];
 R – šiluminė varža [$(m^2 \cdot K/W)$];
 α – pataisos koeficientas;
 L_{2D} – pagal dvimatį skaičiavimą gautas šiluminio sąryšio koeficientas [$W/(m \cdot K)$];
 L_{3D} – pagal trimatį skaičiavimą gautas šiluminio sąryšio koeficientas [W/K];
 T – temperatūra [$^{\circ}C$ arba K];
 q – šilumos srauto tankis [W/m^2];
 q_r – šilumos srautas dėl spinduliavimo [W/m^2];
 q_c – šilumos srautas dėl konvekcijos [W/m^2];
 C – konstanta;
 ε – vidinio paviršiaus spinduliavimo geba;
 σ – Stefano Bolcmano konstanta.

INDEKSŲ SĄRAŠAS

c – jungčių;
 0 – nėra šilumos tiltelio;
 t – visuminė;
 tot – suminė;
 1 – termoizoliacinio sluoksnio;
 si – vidinis paviršius;
 se – išorinis paviršius;
 i – vidus;
 e – išorė.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Išorinės sienos termoizoliacinio sluoksnio storiai ir šilumos perdavimo koeficientai, apskaičiuoti skirtingais metodais (sudaryta autorės pagal Statybinės fizikos laboratorijos ataskaitą Nr. 109/18).

2.1 lentelė. Išorinės vėdinamos sienos su šilumai laidžiomis jungtimis geometriniam modeliui parinktos medžiagos.

3.1 lentelė. Sienų fragmentų su įvairių charakteristikų šiluminiais sluoksniais ir juos kertančiomis skirtingų šiluminių laidumų jungtimis šilumos perdavimo skaičiavimų ir matavimų rezultatai.

3.2 lentelė. Temperatūros laukai sienų fragmentuose apie šilumai laidžias jungtis.

3.3 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta tiesios jungtys.

3.4 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys.

3.5 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys, pritvirtintos prie laikančiojo pagrindo.

3.6 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys, pritvirtintos prie laikančiojo pagrindo ir išorinės apdailos sluoksnių.

3.7 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys, išeinančios į išorinį oro sluoksnį.

3.8 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai sienos konstrukciją sudaro laikantysis pagrindo sluoksnis, šilumos izoliacijos ir oro tarpo sluoksniai, kuriuos kerta „L“ formos jungtys, bei išorinės apdailos sluoksnis.

3.9 lentelė. Fasado sistemos su plieninėmis jungtimis šilumos perdavimo, gauto pakoreguotu empiriniu ir 3D skaitinio modeliavimo metodais, rezultatų palyginimas.

3.10 lentelė. Fasado sistemos su aliuminio lydinio ir nerūdijančio plieno jungtimis šilumos perdavimo, gauto pakoreguotu empiriniu ir 3D skaitinio modeliavimo metodais, rezultatų palyginimas.

3.11 lentelė. Vėdinamų fasadų šilumos perdavimo koeficientai, apskaičiuoti skirtingais metodais (sudaryta autorės pagal Statybinės fizikos laboratorijos ataskaitą Nr. 109/18).

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Optimalaus termoizoliacinio sluoksnio storio nustatymo principinė schema (Kaynakli, 2012).

1.2 pav. Išorinė siena su vėdinamo fasado sistema (Ujma & Pomada, 2019).

1.3 pav. Vėdinamuose fasaduose dažniausiai naudojamų šilumai laidžių jungčių konstrukcijos ir sistemos: a) „L“ formos laikiklis; b) „T“ formos laikiklis; c) apverstos „L“ formos profilio laikiklis su papildomomis tvirtinimo stygomis; d) „L“ formos kompozitinis laikiklis su bazalto pluoštu; e) „U“ formos profilio laikiklis; f) trijų atramos taškų laikiklis (įvairių gamintojų reklaminė medžiaga).

1.4 pav. Įprastas aliuminio lydinio laikiklis (a) ir kompozitinis laikiklis (b) (Song et al., 2016).

1.5 pav. Stiklo pluošto tvirtinimo elementai: a) „L“ formos; b) „T“ formos (įvairių gamintojų reklaminė medžiaga).

1.6 pav. Temperatūrinio lauko pasiskirstymas tvirtinimo elementų ir laikančiojo sluoksnio sankirtoje: a) be PVC tarpinių; b) su PVC tarpinėmis (T. G. Theodosiou, Tsikaloudaki, Kontoleon, & Bikas, 2015).

1.7 pav. PVC tarpinės panaudojimo poveikis taškiniam šilumos perdavimui priklausomai nuo laikančiojo sluoksnio šilumos laidumo koeficiento: a) priklausomybių kreivės; b) naudotų pilno aukščio (1) ir pusės aukščio (2) „L“ formos metaliniai tvirtinimo elementai (T. G. Theodosiou et al., 2015).

1.8 pav. Įrenginio „karštoji dėžė“ schema.

1.9 pav. Sienos šilumos perdavimo nustatymo natūriniai metodai (Teni, Krstic, & Kosinski, 2019).

1.10 pav. Bendroji matavimo schema pagal standartą ISO 9869-1:2014, pridėdant vieną papildomą šilumos srauto matuoklį (Rasooli & Itard, 2018).

1.11 pav. Bendroji paprastosios karštosios dėžės – šilumos srauto matuoklio matavimo metodo schema (Roque, Vicente, Almeida, Mendes Da Silva, & Vaz Ferreira, 2020).

1.12 pav. Objekto paviršiaus temperatūros matavimo IRT metodu principinė schema.

2.1 pav. Sienos su šilumai laidžiomis jungtimis fragmentas: a) 3D modelio vaizdas; b) modelio vaizdas iš viršaus ir iš šono.

2.2 pav. „L“ formos tvirtinimo elementų paruošimo schema.

2.3 pav. „L“ formos tvirtinimo elementų vaizdai: a) aliuminio lydinio jungtis; b) plieninė jungtis; c) nerūdijančio plieno jungtis; d) stiklo tekstolito jungtis.

2.4 pav. Naudotos termoizoliacinės tarpinės.

2.5 pav. Aliuminio lydinio profilio tvirtinimo vaizdas.

2.6 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) papildomai izoliuota pertvaros anga; b) cemento-drožlių plokštės pritvirtinimas.

2.7 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) jungčių išdėstymo schema; b) jungčių tvirtinimas prie pagrindo sluoksnio.

2.8 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) pirmo sluoksnio polistireninio putplasčio plokščių montavimas; b) trijų sluoksnių mineralinės vatos montavimas.

2.9 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) aliuminio lydinio profilių tvirtinimas; b) išorinės apdailos plokštės tvirtinimas.

2.10 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) termoporų išdėstymas ant termoizoliacinio sluoksnio paviršiaus; b) termoporų išdėstymas ant išorinės apdailos plokštės paviršiaus; c) termoporų išdėstymas ant pagrindo sluoksnio paviršiaus.

2.11 pav. Tyrimų grafinis algoritmas.

3.1 pav. Eksperimentiniu ir skaitiniu metodu gautų šilumos perdavimo verčių palyginimas.

3.2 pav. Papildomų termoporų įrengimas šalia tvirtinimo elemento: a) termoporų įrengimo schema; b) vaizdas ties 100 mm storio EPS sluoksniu; c) vaizdas ties 100 mm storio MV sluoksniu.

3.3 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis aliuminio lydinio jungtimis.

3.4 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis.

3.5 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis nerūdijančio plieno jungtimis.

3.6 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis stiklo tekstolito jungtimis.

3.7 pav. Šilumos srautas per termoizoliacinį sluoksnį: a) be jungčių; b) su jungtimis.

3.8 pav. Konstrukcija Nr. 1, sudaryta iš termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta tiesios metalinės jungtys.

3.9 pav. Konstrukcija Nr. 2, sudaryta iš termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys.

3.10 pav. Konstrukcija Nr. 3, sudaryta iš laikančiojo pagrindo ir termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys.

3.11 pav. Skirtingo aukščio „L“ formos metalinių jungčių tvirtinimas prie laikančiojo sluoksnio: a) 50 mm aukščio jungtys; b) 100 mm aukščio jungtys; c) 150 mm aukščio jungtys.

3.12 pav. Konstrukcija Nr. 4, sudaryta iš laikančiojo pagrindo, termoizoliacinių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys, ir išorinės apdailos sluoksnių.

3.13 pav. Konstrukcija Nr. 5, sudaryta iš termoizoliacinių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys, išeinančios į išorinį oro tarpą.

3.14 pav. Konstrukcija Nr. 6, sudaryta iš laikančiojo sienos sluoksnio, termoizoliacinės medžiagos ir oro tarpo sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys, bei išorinės apdailos sluoksnio.

3.15 pav. Koeficiento a priklausomybė nuo jungčių šilumos laidumo koeficiento: konstrukcija be oro tarpo.

3.16 pav. Koeficiento a priklausomybė nuo jungčių šilumos laidumo koeficiento: konstrukcija su oro tarpu.

3.17 pav. Sienos fragmento su plieninėmis jungtimis konstrukcija: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono.

3.18 pav. Vėdinamos sienos fragmento su aliuminio lydinio ir plieninėmis jungtimis konstrukcija: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono.

IVADAS

Darbo aktualumas

Pastatų energinio efektyvumo didinimas yra aktualus iškastinės energijos ir anglies junginių emisijos į aplinką mažinimo uždavinys. Energiškai efektyvių pastatų šilumos nuostoliai žymiai mažesni už anksčiau statytų pastatų, todėl jų atitvaros apšiltintos storesniais termoizoliacinių medžiagų sluoksniais. Kol pastatų šilumos nuostoliai buvo dideli, pastatų atitvarų šilumos perdavimo koeficientų skaičiavimo tikslumui buvo skiriama mažiau dėmesio, nes tai neturėjo reikšmingos įtakos visų pastato energinių sąnaudų skaičiavimo rezultatui. Kai energiškai efektyvių, beveik nulinės energijos pastatų energinės sąnaudos per pastarąjį dešimtmetį sumažėjo keletą kartų, ne visai tikslus šilumos nuostolių per atitvaras įvertinimas gali tapti nepagrįstai didesnio termoizoliacinių ir kitų statybinių medžiagų kiekio bei galingesnių ir brangesnių pastatų inžinerinių sistemų panaudojimo priežastimi. Tai sudaro kliūtis energiškai efektyvios statybos vystymui ir stabdo termoizoliacinių sistemų, kurių šiluminių savybių skaičiavimui taikomi nepatikimi metodai, naudojimą ir tobulinimą. Šioms sistemoms priskiriami ir pastatų fasadai su termoizoliacinius sluoksniais kertančiomis metalinėmis jungtimis, reikšmingai padidinančiomis šilumos perdavimą, kurio standartiniam apskaičiavimui naudojama empirinė formulė (LST EN ISO 6946:2017). Sulyginus pagal šią formulę apskaičiuotus ir eksperimentiškai išmatuotus atitvarų su jungtimis šilumos perdavimo koeficientus, nustatyti reikšmingi iki 1,5 karto skirtumai, ypač atitvarų su didelio šiluminio laidumo stačiakampės formos jungtimis. Daugiabučio gyvenamojo energiškai efektyvaus pastato apskaičiuotas šildymo energijos poreikis vidutiniškai sumažėja nuo 12 kWh/m^2 iki 6 kWh/m^2 , kai jo sienų su vėdinamomis termoizoliacinėmis sistemomis šilumos perdavimo koeficientui apskaičiuoti vietoje standartinio empirinio metodo naudojamos 3D temperatūrinių laukų modeliavimo kompiuterinės programos. Tačiau pastatų projektavimo stadijoje, ypač renkantis pastatų apšiltinimo schemas, apytikris standartinis šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimo metodas naudojamas dažnai dėl jo paprastumo ir mažų darbo sąnaudų. Šio skaičiavimo metodo tobulinimas, didinant skaičiavimo rezultatų tikslumą ir patikimumą, yra svarbus pastatų energinio efektyvumo didinimo sistemos tobulinimo uždavinys.

Problemos formulavimas

Mokslinėje ir techninėje literatūroje nesurastas standartinės empirinės atitvarų su termoizoliacinius sluoksniais kertančiomis šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimo formulės sudarymo mokslinis pagrindimas ir jos taikymo sritis. Analizuojant pagal šią formulę apskaičiuotų ir eksperimentiškai išmatuotų sienų šilumos perdavimo koeficientų skirtumus pastebėta, kad jie priklauso nuo konstrukciją sudarančių sluoksnių bei jungčių matmenų ir jų šiluminių savybių. Siekiant išsiaiškinti skaičiavimo ir matavimo rezultatų skirtumų priežastis, reikia ištirti jungties aplinkoje susidarantį temperatūrinio lauko pokyčius, vykstant šilumos perdavimui per termoizoliacinį sluoksnį su jungtimi, ir nustatyti šilumos perdavimo intensyvumo priklausomybę nuo termoizoliacinio sluoksnio ir jungties geometrinių ir šiluminių charakteristikų. Tyrimo rezultatais pagrindžiamas empirinės

formulės tinkamumas apskaičiuoti šilumos perdavimą pro atitvaras su šilumai laidžiomis jungtimis, o pagal nustatytas kiekybines priklausomybes apskaičiuotais koeficientais patikslinta standartinės skaičiavimo procedūros formulė.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – pastatų fasadų sistemos su termoizoliacinius sluoksnius kertančiomis šilumai laidžiomis jungtimis.

Darbo tikslas

Ištirti šilumos perdavimą per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis ir išaiškinti šilumos srautų priklausomybę nuo jungčių geometrinių ir šiluminių charakteristikų.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliami šie uždaviniai:

1. išanalizuoti šilumos perdavimo per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis skaičiavimo ir matavimo metodikas ir gaunamų rezultatų skirtumų priežastis;

2. eksperimentiškai ištirti šilumos perdavimą per termoizoliacinius sluoksnius su įvairių geometrinių ir šiluminių charakteristikų jungtimis;

3. skaitinio modeliavimo metodu nustatyti jungčių geometrinių charakteristikų ir šiluminio laidumo įtakos konstrukcijų šilumos perdavimui kiekybinius rodiklius;

4. pakoreguoti standartinę konstrukcijų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimo lygtį pagal gautus eksperimentinio tyrimo ir skaitinio modeliavimo rezultatus;

5. patikrinti pakoreguotos skaičiavimo lygties patikimumą, gautus rezultatus sulyginant su oficialiai paskelbtais fasadų sistemų šilumos perdavimo koeficientų matavimo ir skaičiavimo rezultatais, parengti naudojimo rekomendacijas.

Tyrimų metodika

Šilumos srautų per pastatų fasadų sistemų termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis eksperimentiniai tyrimai atlikti matuojant šilumos perdavimą „karštosios dėžės“ metodu (ISO EN 8990), papildomai naudojant temperatūros jutiklius prie jungčių.

Jungčių šiluminio laidumo ir geometrinių charakteristikų įtakos šilumos perdavimui per termoizoliacinius sluoksnius kiekybiniai rodikliai nustatyti modeliuojant sienų fragmentų šilumos perdavimą trimatėje erdvėje, naudojant temperatūrinių laukų skaičiavimo kompiuterinę programą HEAT3.

Pakoreguotos skaičiavimo lygtys patikrintos, gautus rezultatus lyginant su kitų autorių publikuotais analogiškų tyrimų rezultatais ir laboratorijos skaičiavimų ataskaitoje pateiktais įvairių parametru fasadų sistemų šilumos perdavimo koeficientais.

Mokslinis darbo naujumas

1. Ištirta fasadų su šilumai laidžiomis jungtimis eksperimentinio matavimo ir skaičiavimo, taikant standartinę lygtį, rezultatų skirtumų priežastis: lygtyje neįvertintos jungties šilumos mainų su konstrukcijos aplinka sąlygos.

2. Nustatytos šilumos srauto intensyvumo per sienos konstrukciją su oro tarpu ir be jo priklausomybės nuo termoizoliacinio sluoksnio storio ir metalinių jungčių šilumos laidumo.

Praktinė darbo vertė

1. Patikslinta apytikrė šilumos perdavimo per konstrukcijas su šilumai laidžiomis jungtimis apskaičiavimo metodika rekomenduojama taikyti pastatų projektavimo stadijoje parenkant sienų apšiltinimo sistemas. Šios metodikos taikymas reikšmingai sumažina skaičiavimo sąnaudas ir, įvertinus nustatytus apribojimus, duoda vidutines $\pm 6\%$ paklaidas lyginant su 3D skaitiniu modeliavimu.

2. Didinant pastatų apšiltinimo sistemų energinį efektyvumą pirmiausiai turi būti mažinamos jungties šilumos mainų su vidine ir išorine termoizoliacinio sluoksnio aplinka galimybės, nes tada termoizoliacinį sluoksnį kertančios jungties dalies šiluminių ir geometrinių charakteristikų poveikis reikšmingai mažėja. Šią tendenciją rekomenduojama naudoti kuriant kompozicines jungtis, kurių centrinės dalies medžiagos parenkamos daugiau pagal jų mechanines ir technologines savybes, o apšiltintos konstrukcijos šilumos perdavimas sumažinamas naudojant mažai laidžius tvirtinimo elementus jungčių galuose.

Ginamieji teiginiai

1. Tvirtinimo elementų šiluminio laidumo ir šilumos perdavimo per termoizoliacinį sluoksnį su šiais elementais padidėjimo priklausomybė nėra tiesioginė: kuo didesnis jungčių šiluminis laidumas, tuo mažesnė šilumos srauto per jungtis dalis turi būti įtraukta į bendrą šilumos perdavimą per termoizoliacinio sluoksnio konstrukciją, nes ji riboja jungčių šilumos paėmimo ir atidavimo plotas.

2. Didėjant termoizoliacinio sluoksnio su šilumai laidžiomis jungtimis storiui, didžiausią šiluminį laidumą turinčių aliuminio lydinio jungčių poveikis bendram šilumos perdavimui reikšmingai nesikeičia, o mažesnio šiluminio laidumo plieninių ar nerūdijančio plieno jungčių poveikis netgi sumažėja.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema publikuoti keturi moksliniai straipsniai periodiniuose leidiniuose, vienas iš jų – su cituojamumo rodikliu, įtrauktas į Web of Science duomenų bazę, vienas – be cituojamumo rodiklio, įtrauktas į Web of Science duomenų bazę, du – be citavimo indekso, įtraukti į Index Copernicus International duomenų bazę. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti trijose tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Disertacijos struktūra

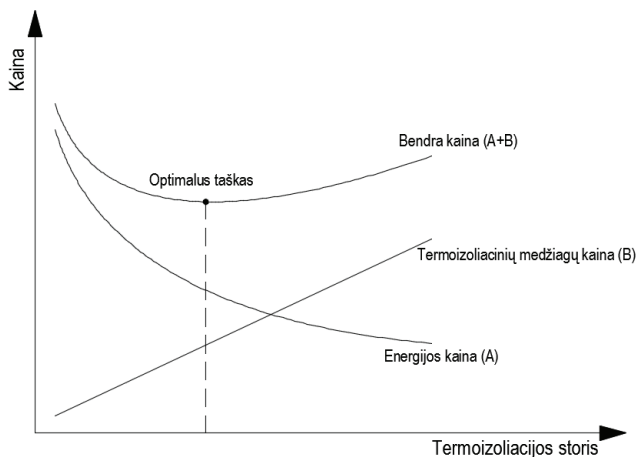
Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir atspausdintų publikacijų sąrašai.

Darbo apimtis yra 101 puslapis, neskaitant priedų, juose yra 41 paveikslas, 13 lentelių ir 28 formulės. Priedai pateikiami elektroninėje laikmenoje. Rašant disertaciją buvo panaudoti 127 literatūros šaltiniai.

1. ŠILUMOS SRAUTŲ PER PASTATŲ FASADŲ KONSTRUKCIJAS TYRIMŲ LIETUVOJE IR UŽSIENYJE APŽVALGA

Dauguma Europos Sąjungos (ES) šalių orientuojasi į energiškai efektyvių pastatų statybą, siekdamas sumažinti energijos suvartojimą ir išmetamo CO₂ kiekį. Europos Parlamento ir Tarybos priimta direktyva 2010/31ES dėl pastatų energinio naudingumo (Directive 2010/31/EU, 2010) nurodo ES šalims nustatyti minimalius pastatų ar pastato dalių energinio naudingumo reikalavimus. Pagal šią direktyvą, nuo 2021 metų visi naujai statomi pastatai turi būti beveik nulinės energijos (*angl. nearly zero-energy buildings (NZEB)*). Tai pagrindinė vis griežtesnių energinio efektyvumo reikalavimų naujai statomiems pastatams įdiegimo priežastis. Siekiant įgyvendinti šiuos reikalavimus, ieškoma efektyvių būdų pastatų šildymo, vėsinimo ar vėdinimo energijos poreikiui sumažinti. Šiam tikslui pasiekti pirmiausiai mažinami šilumos nuostoliai per pastatų atitvaras.

Didelė dalis Lietuvos ir Europos pastatų, statytų iki 1992 metų, buvo prastai apšiltinti arba iš viso neapšiltinti (Lipnevič, 2015). Kadangi pastatų eksploatacijos trukmė yra ilga, dauguma šių prastai apšiltintų pastatų naudojami ir šiandien. Dėl prastos sienų, stogų, grindų ir kitų atitvarų šiluminės izoliacijos šilumos nuostoliai per pastatų atitvaras sudarė reikšmingą dalį bendrųjų pastato šilumos nuostolių – iki 60 % (Martinez, 2017). Taigi, vėliau statytus pastatus pradėta šiltinti ir šiluminės izoliacijos storis buvo vis didinamas, siekiant padidinti atitvarų šiluminę varžą, kol pasiekė optimalų termoizoliacinio sluoksnio storį. Optimalaus termoizoliacinio sluoksnio storio parinkimą aiškiai iliustruoja autoriaus O. Kaynakli (Kaynakli, 2012) pateiktas grafikas (1.1 pav.). Optimalus termoizoliacinio sluoksnio storis parenkamas atsižvelgiant į termoizoliacinės medžiagos ir pastato suvartotos energijos kainą.



1.1 pav. Optimalaus termoizoliacinio sluoksnio storio nustatymo principinė schema (Kaynakli, 2012)

Renovuojamų ir naujai statomų beveik nulinės energijos pastatų atitvarų optimalus termoizoliacinio sluoksnio storis užtikrina aukštą pastato energinį

efektyvumą, tačiau ši sluoksnį kertančių tvirtinimo elementų poveikio atitvaros šiluminėms savybėms tikslus įvertinimas tampa dar aktualesnis.

1.1. Šiluminių tiltelių susidarymas pastatų konstrukcijose ir jų įtaka bendriesiems pastato šilumos nuostoliams

Šiandien Lietuvoje ir Europoje naujai statomi pastatai ir renovuojami seni pastatai yra reikiamai apšiltinti ir atitinka aukštus energinio efektyvumo reikalavimus. Šilumos nuostoliai per energiškai efektyvių pastatų sienų atitvaras sudaro apie 20 % bendrųjų pastato šilumos nuostolių. Visgi tinkamai apšiltintus pastatus ir sumažinus šilumos nuostolius per jų atitvaras reikalinga tiksliai juos įvertinti. Skaičiuojant pastato bendruosius šilumos nuostolius, įvertinami ne tik šilumos nuostoliai per atitvaras (sienas, stogus, grindis, langus, švieslangius, stoglangius, duris), bet ir per šiluminius tiltelius, per kuriuos šiluma lengvai keliauja iš pastato vidaus link išorės aplinkos. Kuo mažesnę dalį bendrųjų šilumos nuostolių sudaro, pavyzdžiui, šilumos nuostoliai per sienas, tuo reikšmingesnė tampa jų konstrukcijose susidarantių tiek ilginių, tiek taškinių šiluminių tiltelių įtaka ir jų tikslus apskaičiavimas vertinant šilumos nuostolius per pastatų atitvaras.

Šiluminiai tilteliai – tai pastato išorinėse atitvarose susidarantys šilumos srauto pokyčiai, kurie susidaro, kai konstrukciniai elementai iš šilumai laidžių medžiagų kerta sluoksnius iš mažiau laidžių medžiagų, taip pat pastato atitvarų sandūrose ir atitvarų storio pokyčių vietose. Susidaręs vietinis intensyvesnis šilumos srautas tokiose vietose lemia žemesnę paviršių temperatūrą, kas gali lemti drėgmės kondensaciją ant atitvaros vidinio paviršiaus ar pelėsių susidarymą, o tai yra itin neigiami veiksniai pastatuose. Tačiau ir energinio efektyvumo požiūriu šiluminiai tilteliai turi reikšmingą neigiamą poveikį. T. Theodosiou ir A. Papadopoulou (T. G. Theodosiou & Papadopoulou, 2008) analizavo pastato su dvigubomis plytų mūro sienomis šiluminių tiltelių įtaką energijos poreikiui pastatui šildyti. Autoriai suskaičiavo pastato energijos poreikį šildymui dviem atvejais: įvertinant šiluminių tiltelių įtaką ir jos nevertinant. Rezultatai parodė, kad energijos poreikis pastato šildymui gali būti apskaičiuojamas nuo 5,5 % iki 31 % mažesnis (priklausomai nuo išorinės dvigubo plytų mūro sienos konstrukcijos), jei neįvertinamas šiluminių tiltelių poveikis. H. Ge ir F. Baba (Ge & Baba, 2015) nustatė, kad šalto klimato zonoje esančio mažaukščio pastato energijos šildymui poreikis padidėja 18 %, o karšto klimato zonoje – 30 % padidėja energijos poreikis tokiam pačiam pastatui šildyti ir 20 % vėsinti (metinis energijos poreikis šildymui sudaro tik 5 % metinės energijos vėsinimui). Panašius tyrimus atliko ir kiti mokslininkai, nagrinėję energijos poreikį pastatui šildyti, priklausomai nuo šiluminių tiltelių įtakos (Bienvenido-Huertas, Quinones, Moyano, & Rodriguez-Jimenez, 2018; Evola, Margani, & Marietta, 2011; Ge, McClung, & Zhang, 2013; Gomes, de Souza, & Tribess, 2013).

Siekiant kaip įmanoma sumažinti šilumos nuostolius per šiluminius tiltelius, visi atitvarų jungimo konstrukciniai mazgai turi būti tinkamai suprojektuoti ir įrengti. Dažniausiai probleminėmis vietomis pastatuose tampa šie konstrukciniai mazgai: išorinių sienų jungtys su pamatu, balkonais ir langų angokraščiais. Šių konstrukcinių mazgų ilginių šiluminių tiltelių vertės gaunamos didžiausios, ypač kai priimami netinkami konstrukciniai sprendimai, įrengiant mazgus. Ankstesni tyrimai

(Levinskytė, Banionis, & Geležiuonas, 2016) parodė, kad, pavyzdžiui, pamatą apšiltinant vertikaliai ir horizontaliai, ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficiento vertė gali būti sumažinta daugiau nei 5 kartus, lyginant su ilginio šiluminio tiltelio verte, kai pamatas apšiltintas tik vertikaliai; skirtingai įrengtų balkonų susikirtimo su išorine siena mazgų šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientų vertės gali skirtis net 13 kartų, o langų – apie 3–4 kartus, priklausomai nuo to, ar langas montuojamas termoizoliaciniame, ar laikančiajame mūro sluoksnyje bei, ar angokraštis yra su sąrama, ar be sąramos. M. Ibrahim ir kt. (Ibrahim, Biwole, Wurtz, & Achard, 2014) atliko tyrimą, kuriame nagrinėjo ilginių šiluminių tiltelių pokyčius apie langų angokraščius, kai įrengiamas papildomas skirtingo storio šiltinantis sluoksniu apie langų angas, panaudojant inovatyvią šiltinančią medžiagą – silicio aerogelį, kurio šilumos laidumo koeficientas yra 0,03–0,04 W/(m·K). Tyrimo rezultatai parodė, kad langų angokraščių ilginiai šiluminiai tilteliai sudaro apie 4–8 % viso energijos poreikio pastatui šildyti, kai išorinės sienos neturėjo papildomo vidinio termoizoliacinio sluoksnio, ir apie 2–5 %, kai išorinės sienos turėjo papildomą 50 mm storio vidinį termoizoliacinį sluoksnį. Įrengus 10 mm ir 20 mm silicio aerogelio sluoksnį apie langų angokraščius, ilginių šiluminių tiltelių poveikis bendram pastato energijos poreikiui šildymui sumažėja atitinkamai 36 % ir 50 % tuo atveju, kai išorinės sienos nėra papildomai šiltinamos iš vidaus, bei 24 % ir 33 % tuo atveju, kai papildomas vidinis termoizoliacinis sluoksniu įrengiamas. Autoriai parodė ilginių šiluminių tiltelių reikšmę viso pastato energijos poreikiui pastatui šildyti nagrinėjant vien langų angokraščius bei pateikė konstrukcinius sprendinius šiam neigiamam poveikiui sumažinti, įrengiant papildomą šiltinantį sluoksnį ilginių šiluminių tiltelių susidarymo vietose. Panašių tyrimų atliko ir kiti mokslininkai, nagrinėję ilginius šiluminius tiltelius apie langų angokraščius (Cappelletti, Gasparella, Romagnoni, & Baggio, 2011; Misiopceki, Bouquin, Gustavsen, & Jelle, 2018; Sierra, Gething, Bai, & Maksoud, 2017).

Ne tik ilginiai šiluminiai tilteliai daro reikšmingą įtaką pastato bendriesiems šilumos nuostoliams, o tuo pačiu ir energijos poreikiui pastatui šildyti, tačiau labai svarbu įvertinti ir taškinių šiluminių tiltelių įtaką šiems parametrams. Taškiniai šilumos tilteliai dažniausiai susidaro tvirtinimo elementams (smeigėms, lankstiams metaliniams ryšiams, metaliniams kronšteinams ar kt.) kertant termoizoliacinį atitvarų sluoksnį. Theodosiou ir kt. (T. G. Theodosiou et al., 2015) nustatė, kad šilumos srautas per vėdinamų išorinių sienų atitvaras gali sudaryti 5–20 % viso šilumos srauto per pastato išorines atitvaras. Atlikti tyrimai (Al-Sanea & Zedan, 2012; Berardi & Akos, 2019; Ji, Guo, & Wei, 2020; Sadauskiene, Ramanauskas, Seduikyte, Dauksys, & Vasylius, 2015; Sprengard & Holm, 2014; T. Theodosiou, Tsikaloudaki, & Bikas, 2017; T. Theodosiou, Tsikaloudaki, Tsoka, & Chastas, 2019; T. G. Theodosiou et al., 2015), kuriuose buvo analizuojamas taškinių šilumos tiltelių poveikis įvairioms šiluminėms pastatų charakteristikoms, parodė, kad pagrindiniai parametrai, labiausiai darantys poveikį taškinių šilumos tiltelių vertėms, yra laikančiojo atitvaros sluoksnio storis ir šilumos laidumo koeficientas, termoizoliacinio sluoksnio storis ir šilumos laidumo koeficientas, tvirtinimo elementų matmenys, jų kiekis kvadratiname metre bei medžiagos šilumos laidumo koeficientas. Minėtų autorių atlikti tyrimai parodė,

kad didėjant atitvaros laikančiojo sluoksnio šilumos laidumo koeficientui, taškinių šilumos tiltelių vertės $\chi, W/K$ taip pat didėja. Pavyzdžiui, J. Šadauskienės ir kt. (Šadauskiene et al., 2015) atlikto tyrimo rezultatai parodė, jog laikančiojo sluoksnio šilumos laidumui padidėjus nuo 0,1 iki 1,0 $W/(m \cdot K)$, taškinio šilumos tiltelio vertės $\chi, W/K$ padidėja beveik 5 kartus, t. y. nuo 0,008 iki 0,039 W/K . Šis pokytis lemia visos išorinės sienos konstrukcijos šilumos perdavimo koeficiento padidėjimą dėl metalinių jungčių poveikio nuo 13 % iki 35 %. Remiantis to paties tyrimo rezultatais buvo pastebėta, kad didėjant išorinės sienos laikančiojo sluoksnio storiui, taškinio šilumos tiltelio vertės $\chi, W/K$ proporcingai mažėja. Pavyzdžiui, laikančiojo sluoksnio storiui padidėjus nuo 50 mm iki 500 mm, taškinio šilumos tiltelio vertės $\chi, W/K$ sumažėja nuo 0,034 iki 0,022 W/K , o tuo pačiu metalinių tvirtinimo elementų poveikis visos atitvaros šilumos perdavimo koeficientui sumažėja atitinkamai nuo 31 % iki 25 %.

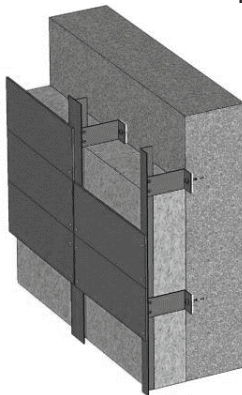
Termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta šilumai laidūs tvirtinimo elementai, storio didėjimas išorinės atitvaros konstrukcijoje lemia taškinių tiltelių verčių sumažėjimą (Levinskytė, Bliūdžius, & Kapačiūnas, 2018; Šadauskiene et al., 2015; T. G. Theodosiou et al., 2015). Pavyzdžiui, išorinės vėdinamos sienos konstrukcijoje su „L“ formos plieniniais tvirtinimo elementais, naudojant 200 mm ir 400 mm storio šiltinančią medžiagą, kurios šilumos laidumo koeficientas $\lambda = 0,036 W/(m \cdot K)$, plieninių tvirtinimo elementų poveikis sienos šilumos perdavimo koeficientui siekia atitinkamai 50 % ir 67 % lyginant su tokia pačia sienos konstrukcija tik be tvirtinimo elementų. Keičiant termoizoliacinio sluoksnio šilumos laidumą, taškinių tiltelių vertės nesikeičia tiek daug, kiek kintant termoizoliacinio sluoksnio storiui, kadangi dažniausiai naudojamų termoizoliacinių medžiagų šilumos laidumo koeficientų vertės skiriasi keliomis tūkstantosiomis dalimis – o tai nėra reikšmingas pokytis lyginant su metalinių tvirtinimo elementų šilumos laidumo vertėmis. Taigi termoizoliacinio sluoksnio šilumos laidumui pasikeitus iš 0,03 $W/(m \cdot K)$ į 0,04 $W/(m \cdot K)$, taškinių šilumos tiltelių vertės $\chi, W/K$ pakinta tik 3 % (Šadauskiene et al., 2015).

K. Kuusk, J. Kurnitski ir T. Kalamees (Kuusk, Kurnitski, & Kalamees, 2017) aprašė šiluminių tiltelių skaičiavimo bei vertinimo procedūras pastatų energiniuose skaičiavimuose skirtingose Europos valstybėse. Išnagrinėję šiluminių tiltelių vertinimo procedūras devyniose Europos šalyse, autoriai pateikė išvadą, kad į energijos nuostolius dėl šiluminių tiltelių poveikio vis dar nepakankamai atsižvelgiama, kadangi daugumoje šalių tikslūs skaičiavimai neatliekami, daugeliu atveju naudojamos reglamentuojančiuose dokumentuose lentelėse pateikiamos numatytosios apytikslės vertės. Tačiau atlikti tyrimai ir skaičiavimai (Bjarlov & Vladykova, 2011; Capozzoli, Gorrino, & Corrado, 2013; de Freitas & da Cunha, 2018; Dumitrescu, Baran, & Pescaru, 2017; Garay, Uriarte, & Apraiz, 2014; Ge et al., 2013; Grauer, 2019; Ilomets, Kuusk, Paap, Arumagi, & Kalamees, 2017; Martin, Erkoreka, Flores, Odriozola, & Sala, 2011; Quinten & Feldheim, 2016; Zalewski, Lassue, Rousse, & Boukhalfa, 2010) parodė, kad šiluminių tiltelių ignoravimas reikšmingai turi įtakos pastatų šiluminiams parametrų (energijos poreikį pastatui šildyti, šilumos nuostolius per išorines atitvaras, atitvarų šilumos perdavimo koeficientus ir pan.), todėl svarbu ne tik įvertinti šiluminių tiltelių poveikį, bet ir pasirinkti tikslius metodus. Dauguma minėtų tyrimų atlikti tiksliais 2D ir 3D

skaitinio modeliavimo programomis (TRNSYS, TRISCO, PSI-THERM 3D, Flixo Pro). Taigi, remiantis minėtais tyrimais, tampa akivaizdu, kad tiksliai įvertinti šilumos nuostolius per šiluminius tiltelius yra labai svarbu, kadangi jie sudaro gana reikšmingą bendrųjų pastato šilumos nuostolių dalį.

1.2. Vėdinamų fasadų sistemų privalumai ir trūkumai

Pastatų sienos sudaro didžiausią atitvarų plotą, todėl tinkamų šiltinimo sistemų pasirinkimas ir jų įrengimo kokybė yra svarbūs faktoriai siekiant aukšto energinio efektyvumo. Viena iš dažniausiai pasirenkamų sienų šiltinimo sistemų yra išorinė vėdinama sistema. Tipinė vėdinamo fasado schema pateikiama 1.2 paveikslėlyje.



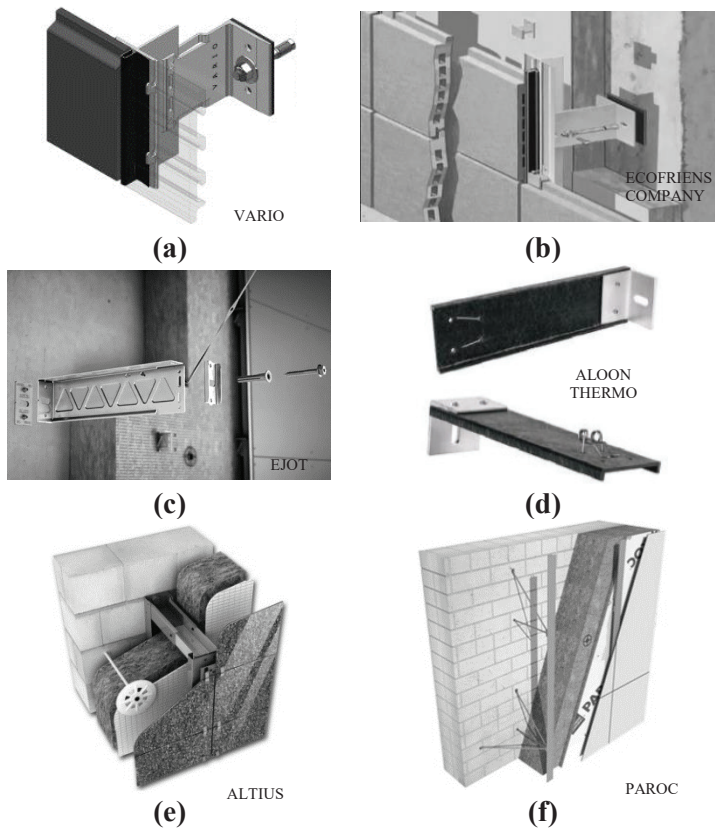
1.2 pav. Išorinė siena su vėdinamo fasado sistema (Ujma & Pomada, 2019)

Vėdinami fasadai sukuria papildomą apsaugą nuo aplinkos poveikio: vėjo, lietaus, karščio šiltuoju metų periodu ir šalčio šaltuoju metų periodu. Atlikta daug tyrimų apie šilumos perdavimo ir drėgmės balanso mechanizmus bei džiūvimo procesus vėdinamose konstrukcijose (Ciampi, Leccese, & Tuoni, 2003; Colinart, Bendouma, & Glouannec, 2019; Daza & Zamora, 2019; Falk & Sandin, 2013; Guillen, Gomez-Lozano, Fran, & Lopez-Jimenez, 2014; Lopez & Santiago, 2015; Marinosci, Semprini, & Morini, 2014; Olsson, 2018; Patania, Gagliano, Nocera, Ferlito, & Galesi, 2010; Recatala, Morales, & van den Bossche, 2018). Minėti tyrimai paremti eksperimentiniais natūriniais matavimais, skaitinio modeliavimo tyrimais bei analitiniais skaičiavimais. Juose analizuojami vėdinamų fasadų konstrukcijų privalumai ir dažniausios problemos, susijusios su klimato poveikiu: saulės spinduliuote, drėgmės poveikiu, sezoniškumu. Apibendrinant šiuos tyrimus galima išskirti tokius tinkamai suprojektuotų ir įrengtų vėdinamų sienų konstrukcijų privalumus:

- vasaros periodu padeda sumažinti šiluminę apkrovą dėl tiesioginės saulės radiacijos ir aukštos aplinkos temperatūros;
- termoizoliacinė medžiaga apsaugoma nuo drėgmės, kadangi išorinės apdailos plokštės neleidžia krituliams patekti ant apšiltinimo medžiagos, todėl jos šiluminės savybės išlieka nepakitusios;
- geresnė garso izoliacija nuo išorės triukšmo;
- ilgaamžiškumas.

F. Patania ir kt. (Patania et al., 2010) teigia, kad pastatuose su vėdinamais fasadais vasaros periodu galima sutaupyti apie 40 % energijos vėsinimui lyginant su tokios pačios konstrukcijos nevėdinamais fasadais. A. N. Daza ir kt. (Daza & Zamora, 2019) nustatė, kad vėdinamo fasado akustinės savybės pagerėja nuo 5 dB iki 7 dB lyginant su nevėdinamu fasadu.

Be visų minėtų privalumų vėdinamos fasado sistemos pasižymi vienu pagrindiniu trūkumu – tai termoizoliacinį sluoksnį kertančios jungtys. Šios jungtys yra pagrindiniai, dažnai didelį svorį laikantys, išorinės apdailos tvirtinimo elementai, todėl dažnai jungčių matmenys yra dideli lyginant su tinkuojamose fasadų sistemose naudojamomis šiluminio medžiagų tvirtinimo smeigėmis, kurios be kita ko dažnai būna plastikinės. Vėdinamose fasadų sistemose naudojamų šilumai laidžių jungčių formos ir konstrukcijos gali būti labai įvairios. Dažniausiai naudojamų jungčių formos pavaizduotos 1.3 paveikslėlyje. Kuo didesnių matmenų jungtys naudojamos vėdinamų fasadų sistemose, tuo didesnis šilumos srautas jomis keliauja link išorės aplinkos – taip sukuriama taškiniai šiluminiai tilteliai.



1.3 pav. Vėdinamuose fasaduose dažniausiai naudojamų šilumai laidžių jungčių konstrukcijos ir sistemos: a) „L“ formos laikiklis; b) „T“ formos laikiklis; c) apverstos „L“ formos profilio laikiklis su papildomomis tvirtinimo stygomis ; d) „L“ formos kompozitinis laikiklis su bazalto pluoštu; e) „U“ formos profilio laikiklis; f) trijų atramos taškų laikiklis. (Įvairių gamintojų reklaminė medžiaga)

1.3. Vėdinamuose fasaduose naudojamų tvirtinimo elementų medžiagų fizikinės, mechaninės savybės

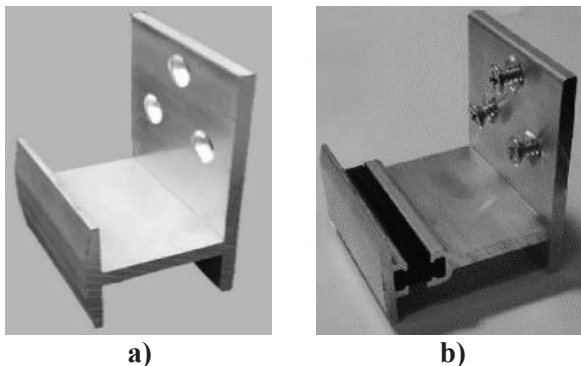
Vėdinamų fasadų konstrukcijose naudojamų jungčių fizikinės ir mechaninės savybės dažnai lemia atitinkamų jungčių naudojimo pasirinkimą. Tvirtinimo elementų šilumos laidumo koeficiento vertė turi reikšmingą įtaką atitvaros šilumos perdavimui. Mokslininkų atlikti tyrimai patvirtina šią priklausomybę. R. Ji ir kt. (Ji, Zhang, He, Liu, & Qu, 2017) analizavo daugiabučio pastato išorinių sienų šiltinimo sistemas su skirtingų medžiagų tvirtinimo elementais. Autoriai, kaip ir daugelis kitų tyrėjų, patvirtino, kad laikikliai, kertantys šiltinančias medžiagas, padidina šiltinančios medžiagos efektyvųjį šilumos laidumo koeficientą. Atlikę tyrimą autoriai nustatė, kad termoizoliacinės medžiagos efektyvusis šilumos laidumas padidėja, didinant laikiklių skerspjūvio plotą, ilgį, šiluminį laidumą bei tankį kvadratiname sienos konstrukcijos metre. Visgi naudojant plastikinius tvirtinimo elementus, kurių šilumos laidumo koeficientas mažiausias, gaunamas ir mažiausias neigiamas poveikis šiltinimo sistemos efektyviajam šilumos laidumui – tik apie 3,3 % didesnis lyginant su šiltinimo sistema be tvirtinimo elementų. Buvo atlikta ir daugiau panašių tyrimų, lyginant skirtingų medžiagų tvirtinimo elementų panaudojimą išorinių sienų atitvarose (Ji et al., 2020; T. Theodosiou et al., 2017; Woltman, Noel, & Fam, 2017; Woltman, Tomlinson, & Fam, 2013).

Vėdinamuose fasaduose montuojamos jungtys gali žymiai skirtis ne tik savo konstrukcija, bet ir medžiagų savybėmis. Dažniausiai vėdinamos fasadų konstrukcijos įrengiamos panaudojant plieno, nerūdijančio plieno, aliuminio lydinio, stiklo pluošto ar kompozitines jungtis. Jungčių medžiagos parenkamos atsižvelgiant į joms tenkančias išorines apkrovas bei atitvaros konstrukcijai keliamus šiluminių savybių reikalavimus. Iš minėtų medžiagų aliuminio lydinio tvirtinimo elementai pasižymi didžiausiu šiluminiu laidumu ($\lambda = 160 - 230 \text{ W}/(m \cdot K)$), tačiau dažnai naudojami dėl palyginus nedidelio svorio (aliuminio tankis yra beveik 3 kartus mažesnis nei plieno – $2800 \text{ kg}/m^3$) ir žemiausios kainos. Aliuminis pasižymi žema tamprumo riba, todėl dažniausiai naudojami yra aliuminio lydiniai, kurie gaunami legiruojuojant aliuminį su manganu, siliciu, variu, magniu ar kt. Gryno aliuminio stiprumo riba yra apie 90 MPa , o tam tikrų aliuminio lydinių gali siekti 700 MPa . Tokia medžiaga gali būti pranašesnė už plieną, kadangi esant žemai temperatūrai aliuminio lydins nepraranda kietumo. Dažniausiai gamyboje naudojami lydiniai, kurių stiprumo riba $140\text{--}300 \text{ MPa}$ (STR 2.05.06:2005). Naudojant aliuminio lydinio jungtis išorinėse vėdinamose fasadų sistemose, jose turi būti įrengiamas atitinkamai ir didesnio storio termoizoliacinis sluoksnis palyginus su fasadų sistemomis, kuriose naudojamos mažesnio šiluminio laidumo jungtys.

Plieninių tvirtinimo elementų šilumos laidumo koeficientas gali būti $\lambda = 30 - 50 \text{ W}/(m \cdot K)$ priklausomai nuo plieno cheminės sudėties ir legiravimo būdo. Palyginus su aliuminio lydinių jungtimis, plieninės pasižymi didesniu stiprumu bei svoriu. Plieninių elementų stiprumo riba, priklausomai nuo gamybos būdo, legiruojančių elementų bei cheminės sudėties, gali būti $215\text{--}690 \text{ MPa}$ (STR 2.05.08:2005). Plieno tankis – $7800 \text{ kg}/m^3$. Dėl gerų fizikinių ir mechaninių savybių plieninės jungtys vėdinamų fasadų sistemose naudojamos itin dažnai.

Jeigu geležies lydinyje yra daugiau kaip 10 % chromo, toks plienas yra nerūdijantis (atsparus korozijai). Nerūdijančio plieno tvirtinimo elementai pasižymi mažiausiu šiluminiu laidumu iš visų metalinių jungčių. Nerūdijančio plieno šilumos laidumo koeficiento vertė yra apie $\lambda = 17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Šio metalo svoris panašus į įprasto plieno – $7900 \text{ kg}/\text{m}^3$, o stiprumo riba kinta nuo 200 MPa iki net 1000 MPa, kai medžiaga specialiais būdais išgaunama ir stiprinama. Naudojant nerūdijančio plieno jungtis vėdinamų fasadų konstrukcijose, tai pačiai šilumos perdavimo vertei pasiekti būtų reikalingas mažiausias termoizoliacinio sluoksnio storis, lyginant su kitų metalinių jungčių panaudojimu identiškoje sienos konstrukcijoje. Visgi šios mažiausią šiluminį laidumą turinčios jungtys naudojamos ne visada, kadangi jų naudojimą dažnai sąlygoja gan aukšta kaina.

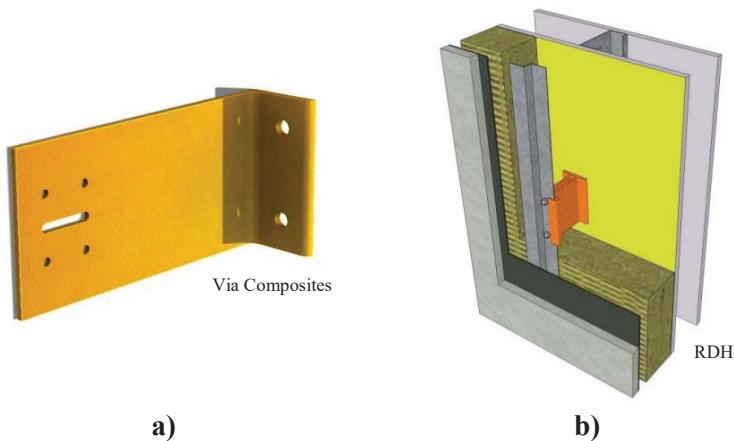
Dažnai ieškoma sprendimų, kaip itin šilumai laidžius tvirtinimo elementus pastatų konstrukcijose pakeisti mažiau šilumai laidžiais elementais. Viena iš alternatyvų gali būti kompozitiniai elementai (1.4 pav.), kurių panaudojimas gali sumažinti neigiamą tvirtinimo elementų poveikį visos konstrukcijos šilumos perdavimui. Kompozitiniai tvirtinimo elementai dažniausiai būna tokie, kai metaliniuose elementuose panaudojami mažiau šilumai laidžios dažniausiai plastiko medžiagos intarpai, kurie pertraukia tiesioginį intensyvų šilumos srautą metaline jungtimi. J. H. Song ir kt. (Song, Lim, & Song, 2016) nagrinėjo kompozitinių laikiklių (1.4 pav. b), pagamintų iš metalo ir plastiko, panaudojimą sienų atitvarose. Autoriai nustatė, kad kompozitinių laikiklių panaudojimas (1.4 b pav.) vietoj įprastų metalinių (1.4 a pav.) sumažina šilumos nuostolius per analizuotą išorinę vėdinamą sienos konstrukciją iki 68 %.



1.4 pav. Įprastas aliuminio lydinio laikiklis (a) ir kompozitinis laikiklis (b) (Song et al., 2016)

Kita alternatyva metaliniams tvirtinimo elementams gali būti stiklo pluošto arba plastiko armavimo ir tvirtinimo elementų panaudojimas (1.5 pav.), kurių šilumos laidumo koeficientas daug mažesnis nei metalinių elementų. Stiklo pluoštas – tai tvirta ir lengva medžiaga, kurios šilumos laidumo vertė yra apie $0,23\text{--}0,32 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Ši medžiaga taip pat pasižymi nedideliu svoriu ($\sim 1850 \text{ kg}/\text{m}^3$) palyginus su kitomis metalinėmis jungtimis, atsparumu korozijai ir įvairioms cheminėms medžiagoms bei matmenų stabilumu kintant aplinkos sąlygoms. Tyrimus apie stiklo pluošto armatūros ir tvirtinimo elementų panaudojimą konstrukciniuose mazuose

atliko G. Wakili ir kt. (Ghazi Wakili, Simmler, & Frank, 2007), K. Goulouti ir kt. (Goulouti, de Castro, Vassilopoulos, & Keller, 2014), M. Grauer (Grauer, 2019). K. Goulouti ir kt. (Goulouti et al., 2014) nustatė, kad stiklo pluošto elementų panaudojimas vietoj metalinių pastato balkonų konstrukcijose gali sumažinti bendrus pastato nuostolius apie 3–5 %. M. Grauer (Grauer, 2019) atliko skirtingų tvirtinimo elementų vėdinamuose fasaduose vertinimą ir nustatė, kad stiklo pluošto jungčių panaudojimas sumažina pastato metinį energijos sunaudojimą 2,6 % palyginus su aliuminio lydinio jungčių panaudojimu fasado konstrukcijoje. R. G. Martinez (Martinez, 2017) taip pat atliko pastatų termoizoliacinių šiltinimo sistemų analizę, vertinant plieninių, medinių bei plastikinių tvirtinimo elementų panaudojimą. Sienos konstrukcija su plastikiniais „C“ formos elementais turėjo minimalius šiluminius tiltelius lyginant su kitomis konstrukcijomis. Autorius teigia, kad reikia vengti šiltinimo sistemų su metaliniais profiliais, kadangi jie padidina tokios atitvaros šilumos perdavimą apie 40 %.

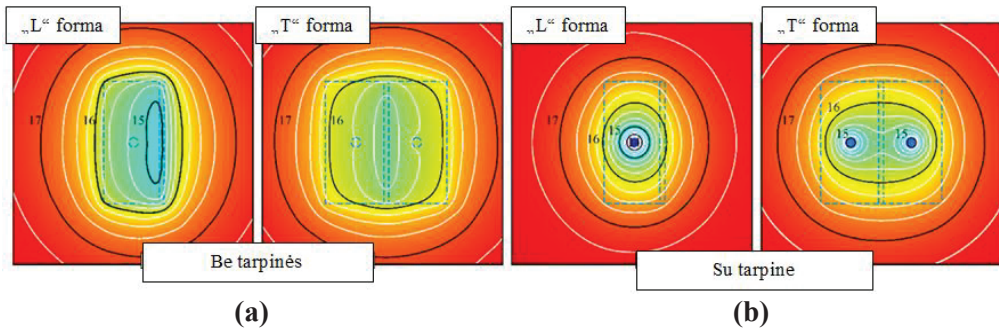


1.5 pav. Stiklo pluošto tvirtinimo elementai: a) „L“ formos; b) „T“ formos.
(Įvairių gamintojų reklaminė medžiaga)

1.4. Mažo šiluminio laidumo tarpinių panaudojimas vėdinamų fasadų sistemose

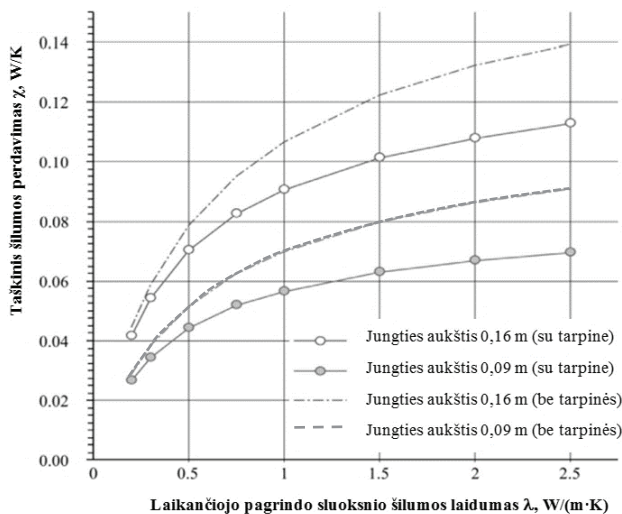
Taškinių šilumos tiltelių vertės itin priklauso nuo tvirtinimo elementų geometrijos, matmenų bei mažiau šilumai laidžių tarpinių panaudojimo tarp laikančiojo sluoksnio ir tvirtinimo elementų. Akivaizdu, kad kuo didesnis laikiklių paviršiaus plotas, tuo didesnis šilumos kiekis pereina iš vidaus aplinkos link išorės. Įrengiant vėdinamas fasadų sistemas dažniausiai tarp mūro ar kito laikančiojo sluoksnio ir metalinių laikiklių montuojamos mažo šilumos laidumo PVC tarpinės, kurios sumažina tiesioginį šilumos srautą tarp itin šilumai laidžių laikiklių ir mažiau šilumai laidaus laikančiojo sluoksnio. T. Theodosiou ir kt. (T. Theodosiou et al., 2019; T. G. Theodosiou et al., 2015) nagrinėjo skirtingų formų ir matmenų šilumai laidžių jungčių įtaką taškiniam šilumos perdavimui. Autoriai taip pat atsižvelgė į PVC tarpinių poveikį taškiniam šilumos perdavimui – tyrimai atlikti panaudojant „L“ ir „T“ formos plieninius laikiklius, vienu atveju su PVC tarpinėmis tarp laikiklių ir mūro, kitu atveju – be tarpinių. Analizuojant tarpinių poveikį patvirtinta, kad mažo

šiluminio laidumo tarpinės tarp metalinių tvirtinimo elementų ir mūro sluoksnio sumažina tiesioginį šilumos srautą, tačiau, nors ir sumažėja tiesioginio šilumos srauto perdavimo plotas, silpna vieta lieka metaliniai varžtai ar vinyai, tvirtinantys laikiklius prie mūro. Tyrimą atlikę autoriai pavaizdavo (1.6 pav.) temperatūros pasiskirstymą per „L“ ir „T“ formos laikiklių plotus, tvirtinamus prie mūro sienos. Pirmu atveju (1.6 pav. a) laikikliai tvirtinami tiesiogiai prie mūro, antru atveju (1.6 pav. b) – per 6 mm storio PVC tarpinę, kurios šilumos laidumo koeficientas $\lambda = 0,09 W/(m \cdot K)$. „L“ formos metaliniai laikikliai prie mūro tvirtinami vienu plieniniu 8 mm skersmens ir 80 mm ilgio varžtu, o „T“ formos laikikliai – dviem tokių pačių matmenų varžtais. Iš temperatūrinio lauko pasiskirstymo abiem atvejais matyti, kad mažai šilumai laidai tarpinė sumažina tiesioginį šilumos srautą per laikiklio pagrindą, tačiau naudojant tarpines jis suintensyvėja per tvirtinimo varžtus, kur temperatūra žemesnė, nei konstrukcijose be tarpinių.

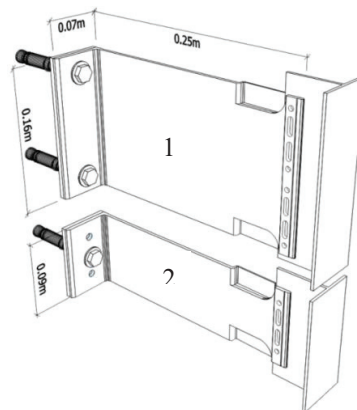


1.6 pav. Temperatūrinio lauko pasiskirstymas tvirtinimo elementų ir laikančiojo sluoksnio sankirtoje: a) be PVC tarpinių; b) su PVC tarpinėmis (T. G. Theodosiou et al., 2015)

T. Theodosiou ir kt. (T. G. Theodosiou et al., 2015) tyrimo rezultatai parodė ir tai, kad didėjant laikančiojo sluoksnio šiluminiam laidumui, teigiamas tarpinės poveikis taškiniam šilumos perdavimui taip pat didėja. Iš 1.7 pav. matyti, kad laikančiojo sluoksnio šilumos laidumui esant $0,5 W/(m \cdot K)$, tarpinės nebuvimas lemia 10 % didesnę taškinį šilumos srautą konstrukcijoje su žemesnio skerspjūvio laikikliais ir 15 % didesnę taškinį šilumos srautą konstrukcijoje su aukštesnio skerspjūvio laikikliais. Kai laikančiojo sluoksnio šilumos laidumas padidėja iki $2,5 W/(m \cdot K)$, šie skirtumai atitinkamai siekia 20 % ir 23 %. Taip pat aiški tendencija, kad naudojant beveik dvigubai didesnio skerspjūvio metalinius laikiklius, taškinis šilumos perdavimas irgi padidėja beveik dvigubai abiem tarpinių panaudojimo atvejais.



(a)



(b)

1.7 pav. PVC tarpinės panaudojimo poveikis taškiniam šilumos perdavimui priklausomai nuo laikančiojo sluoksnio šilumos laidumo koeficiento: **a)** priklausomybių kreivės; **b)** naudotų pilno aukščio (1) ir pusės aukščio (2) „L“ formos metaliniai tvirtinimo elementai (T. G. Theodosiou et al., 2015)

H. Ge, V. R. McClung ir S. Zhang (Ge et al., 2013) nagrinėjo balkonų ir išorinių sienų sandūrų šiluminių tiltelių įtaką daugiabučio gyvenamojo namo bendroms šiluminėms savybėms. Autoriai nustatė, jog įrengiant balkonus su mažai šilumai laidžiomis tarpinėmis, sumažinami šilumos nuostoliai per balkono ir išorinės sienos sandūrą, o dėl to bendras pastato metinis energijos suvartojimas šildymui sumažėjo 5–11 %. A. Ben Larbi, M. Couchaux ir A. Bouchair (Ben Larbi, Couchaux, & Bouchair, 2017) tyrimas parodė, kad, priklausomai nuo PVC tarpinės storio, tarpinę kertančių tvirtinimo elementų medžiagos bei tarpinės įrengimo pobūdžio (su papildoma garso izoliacija ar be) balkonų konstrukcijų šiluminiai tilteliai, naudojant mažai šilumai laidžią tarpinę, sumažėja 20–65 % lyginant su konstrukcijomis, kai tarpinė nenaudojama. Taigi galima teigti, kad tarpinių panaudojimas atskiriant šilumai laidžias medžiagas yra veiksmingas būdas sumažinti ilginių šiluminių tiltelių vertes, o tuo pačiu ir šilumos nuostolius per juos.

1.5. Šilumos perdavimo per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis skaičiavimo ir matavimo metodų analizė

Pagrindiniai šilumos perdavimo per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis nustatymo metodai skirstomi į analitinius, skaitinius ir eksperimentinius. Analitiniu metodu šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas naudojant empirines lygtis, skaitiniu – modeliuojant temperatūrinius laukus ir šilumos srautus 2D ar 3D aplinkoje, o eksperimentiniu – atliekant atitvarų fragmentų laboratorinius arba natūrinius matavimus.

1.5.1. Apytikslė empirinė skaičiavimo procedūra

Konstrukcijos šilumos perdavimo koeficientas, įvertinant termoizoliacinį sluoksnį kertančius tvirtinimo elementus, gali būti apskaičiuojamas pagal standarto LST EN ISO 6946 (2017) reikalavimus. Šis metodas dėl savo paprastumo itin plačiai naudojamas praktikoje, ypač pastatų projektavimo stadijoje. Skaičiuojant atitvaros šilumos perdavimo koeficientą pagal standartinę empirinę procedūrą, pirmiausia apskaičiuojama visų konstrukciją sudarančių sluoksnių (nevertinant tvirtinimo elementų) visuminė šiluminė varža R_t , iš kurios vertės apskaičiuojamas šilumos perdavimo koeficientas U_0 , ir tuomet apskaičiuojama ir pridama šilumos perdavimo pataisa dėl tvirtinimo elementų poveikio ΔU_c . Taigi bendras atitvaros šilumos perdavimas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$U = U_0 + \Delta U_c \quad (1)$$

čia: U – atitvaros šilumos perdavimo koeficientas ($W/m^2 \cdot K$); U_0 – atitvaros be jungčių šilumos perdavimo koeficientas ($W/m^2 \cdot K$); ΔU_c – šilumos perdavimo koeficiento pataisa dėl jungčių poveikio ($W/m^2 \cdot K$).

Šilumos perdavimo pataisa dėl tvirtinimo elementų poveikio pagal LST EN ISO 6946:2017 (2017) apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\Delta U_c = \alpha \cdot \frac{\lambda_c \cdot A_c \cdot n_c}{d_1} \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2 \quad (2)$$

čia: $\alpha = 0,8$, jei tvirtinimo elementai pilnai kerta termoizoliacinį sluoksnį; $\alpha = 0,8 \cdot \frac{d_1}{d_0}$, jei tvirtinimo elementai įgilinti į termoizoliacinį sluoksnį; λ_c – tvirtinimo elementų šilumos laidumo koeficientas ($W/(m \cdot K)$); n_c – tvirtinimo elementų kiekis atitvaros kvadratiname metre (vnt/m^2); A_c – tvirtinimo elemento skerspjūvio plotas (m^2); d_0 – termoizoliacinio sluoksnio storis, kurį kerta tvirtinimo elementai (m); d_1 – tvirtinimo elemento ilgis, kertantis termoizoliacinį sluoksnį (m); R_1 – termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta tvirtinimo elementai, šiluminė varža ($m^2 \cdot K/W$); R_{tot} – visų atitvaros elementų suminė šiluminė varža nevertinant šiluminių tiltelių ($m^2 \cdot K/W$).

Šis teorinis skaičiavimo metodas taikomas vertinant šilumai laidžių metalinių tvirtinimo smeigių, kronšteinų ar kitų tvirtinimo elementų, kertančių šiluminės izoliacijos sluoksnį, poveikį atitvaros šilumos perdavimui. M. Gorgolewski (Gorgolewski, 2007) atliko tyrimą, kuriame buvo vertinamas plieninių tvirtinimo elementų, kertančių išorinių sienų termoizoliacinį sluoksnį, poveikis atitvaros šilumos perdavimui. Tyrime buvo palygintos šilumos perdavimo koeficiento pataisos dėl plieninių elementų poveikio, nustatytos pagal standartinę empirinę procedūrą bei panaudojant skaitinį modeliavimą. Autorius patvirtino šių dviem metodais nustatytų pataisų verčių atitikimą, kadangi jos skyrėsi labai nežymiai – iki 4 %.

1.5.2. Skaitinio modeliavimo metodas

Šilumai laidžių jungčių poveikis pastato konstrukcijos šilumos perdavimui gali būti skaičiuojamas tikslesniu metodu, naudojant kompiuterines 2D ir 3D skaitinio

modeliavimo programas (TRNSYS, TRISCO, HEAT3, PSI-THERM 3D, THERM Flixo-Pro ir kt.), paremtas baigtinių elementų skaičiavimo metodu. Detalieji skaičiavimai atliekami pagal standarto LST EN ISO 10211 (2017) reikalavimus. Šis standartas apibrėžia šilumos perdavimo koeficientų skaičiavimo metodą ir modeliavimo sąlygas (geometrinio modelio apibrėžimą ir supaprastinimą, nevienalyčių konstrukcinių sluoksnių vertinimą, aplinkos sąlygų imitavimo reikalavimus ir panašiai). Ilginis šilumos perdavimo koeficientas Ψ apskaičiuojamas taip:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j; \quad (3)$$

čia: L_{2D} – šiluminio sąryšio koeficientas, gautas atliekant dvi tiriamas aplinkas skiriančio 2D komponento 2D skaičiavimą; U_j – 1D komponento j , skiriančio dvi tiriamas aplinkas, šilumos perdavimo koeficientas; l_j – ilgis, kuriam taikoma U_j vertė. Taškinis šilumos perdavimo koeficientas χ apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \Psi_j \cdot l_j \quad (4)$$

čia: L_{3D} – šiluminio sąryšio koeficientas, gautas atliekant dvi tiriamas aplinkas skiriančio 3D komponento 3D skaičiavimą; U_i – 1D komponento i , skiriančio dvi tiriamas aplinkas, šilumos perdavimo koeficientas; A_i – plotas, kuriam taikoma U_i vertė; Ψ_j – ilginiai šilumos perdavimo koeficientai; l_j – ilgis, kuriam taikoma Ψ_j vertė; N_j – 2D komponentų skaičius; N_i – 1D komponentų skaičius.

Tuomet konstrukcijos šilumos perdavimo pataisa apskaičiuojama pagal šią išraišką:

$$\Delta U_c = n_c \cdot \chi \quad (5)$$

čia: n_c – šilumai laidžių jungčių kiekis (vnt/m^2).

Skaitinio modeliavimo metodai naudojami itin plačiai, kadangi laikomi patikimais ir leidžia per palyginti trumpą laiką atlikti daug įvairių skaičiavimų variacijų, keičiant aplinkos sąlygų parametrus, medžiagų charakteristikas, konstrukcijas ir panašiai. S. J. Chang, S. Wi ir S. Kim (Chang, Wi, & Kim, 2019) atliko šiluminių tiltelių, susidarantių medžio karkaso išorinių sienų konstrukcijose, analizę, pritaikant 2D skaitinio modeliavimo metodą, kurį naudodami autoriai išanalizavo net 19 įvairių konstrukcijų atvejų, ir nustatė, kurios iš jų pasižymi geriausiomis šiluminėmis savybėmis bei pateikė konstrukcijų šiltinimo rekomendacijas.

Skaitinio modeliavimo metodas yra tiksli įvairių šilumai laidžių tvirtinimo elementų poveikio atitvaros šiluminėms savybėms vertinimo priemonė. M. Manzan, E. Z. De Zorzi ir W. Lorenzi (Manzan, De Zorzi, & Lorenzi, 2018) analizavo istorinių pastatų, kurių fasadų vaizdas dažniausiai negali būti keičiamas, vidines termoizoliacines sistemas su vertikaliais plieniniais profiliais. Autoriai, naudodami skaitinio modeliavimo programą (ANSYS Fluent), skaičiavo šiltinimo sistemų vidutinį šilumos laidumo koeficientą ir atlikę tyrimą pateikė išvadą, kad plieninių elementų, kertančių termoizoliacinį sluoksnį, neįvertinimas lemia 20 % mažesnę šiltinimo sistemos ekvivalentinio šilumos laidumo vertę.

Skaičiuojant 2D ar 3D skaitinio modeliavimo programomis svarbu yra pasirinkti tinkamą analizuojamos konstrukcijos skaidymo baigtiniais elementais tinklelio tankumą, kadangi tai gali lemti tam tikras skaičiavimo paklaidas. Autoriai M. Manzan, E. Z. De Zorzi ir W. Lorenzi (Manzan et al., 2018), atlikę istorinių pastatų konstrukcijų skaitinį modeliavimą, palygino programa gaunamus šilumos perdavimo rezultatus, pritaikant skirtingo tankumo konstrukcijos skaidymą – stambų, vidutinį ir smulkų, kurių dydžiai atitinkamai buvo 239 tūkst., 460 tūkst., 900 tūkst. elementų, tai yra kiekvienas beveik 2 kartus smulkesnis už ankstesnį. Taikant vis tankesnę skaidymą baigtiniais elementais, analizuotos konstrukcijos šilumos perdavimo koeficiento vertė kito atitinkamai: 1,440; 1,449; 1,456 $W/(m^2 \cdot K)$. Taigi akivaizdu, kad kuo analizuojama konstrukcija suskaidoma tankiau, tuo mažesnė skaičiavimo paklaida gaunama. Visgi pernelyg smulkus baigtinių elementų tinklelis lemia itin ilgą programos skaičiavimo procesą, todėl verta pasirinkti tokį konstrukcijos skaidymą, kuris suteiktų gana nedideles skaičiavimo paklaidas ir neužimtų daug laiko, ypač tuomet, kai reikalinga sumodeliuoti daug skirtingų konstrukcijų.

Kai kurios komercinės skaitinio modeliavimo programos turi integruotus pastatų tipinių konstrukcinių mazgų šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientų katalogus. Skaičiuojant pastato energijos poreikį šildymui, gali būti naudojamos šiluminių tiltelių vertės, parinktos iš šių katalogų arba suskaičiuotos pagal standartuose pateikiamus detaliųjų skaičiavimų reikalavimus. Visgi praktika rodo, kad kataloguose pateikiamos vertės dažnai gali būti gerokai didesnės nei gaunamos atlikus detalius skaičiavimus, pritaikant skaitinio modeliavimo metodą. Palyginus šiluminių tiltelių vertes, gautas išsamiau 2D skaitinio modeliavimo metodu ir naudojantis parengtais tipinių konstrukcinių mazgų katalogais, S. Bergero ir A. Chiari (Bergero & Chiari, 2018) nustatė, kad pagal katalogus parinktos vertės gali būti net 8 kartus didesnės nei apskaičiuotos 2D kompiuterine programa, o tai sąlygoja ir labai netiksliai įvertintą pastato energijos poreikį.

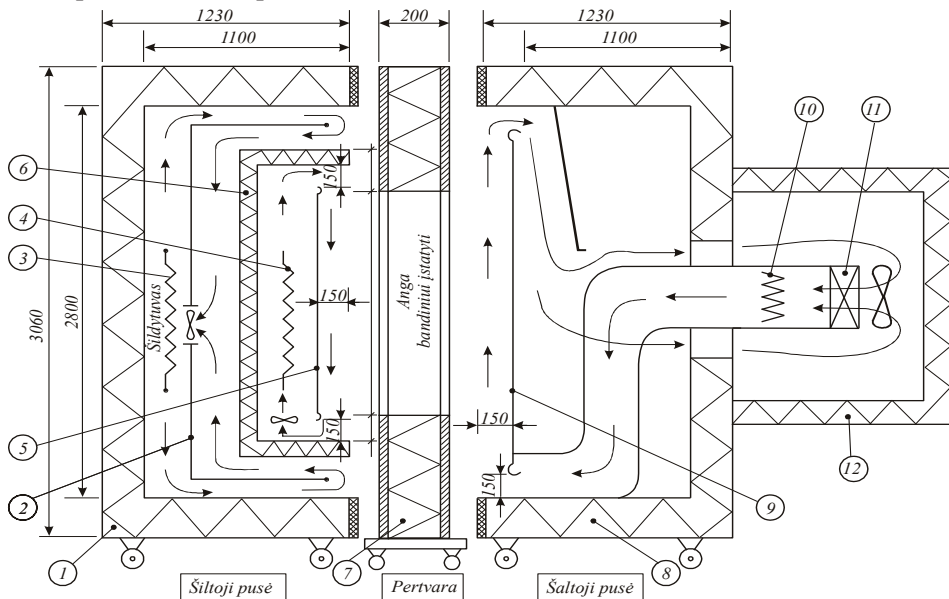
Patikrinti ir patvirtinti kompiuterine programa sukurto modelio atitikimą realiai konstrukcijai galima atliekant palyginamuosius eksperimentinius matavimus laboratorijoje, pritaikant „karštosios dėžės“ metodą. F. E. Boafu, J. H. Kim, J. T. Kim (Boafu, Kim, & Kim, 2019) atliko pastatų išorinių sienų su integruotomis vakuuminėmis termoizoliacinėmis plokštėmis tyrimą, nagrinėdami tokių konstrukcijų koncepciją, šilumos perdavimą bei pagrindinius iššūkius. Autoriai parengė sienų konstrukcijų modelius, kuriuos nagrinėjo skaitinio modeliavimo programa bei atliko atitinkamų sienų fragmentų laboratorinius bandymus. Sienos fragmento šilumos perdavimo vertės, nustatytos eksperimentiniu „karštosios dėžės“ ir 3D skaitinio modeliavimo metodais, skyrėsi mažiau nei 4 %. Eksperimentiniai tyrimai patvirtino skaitinio modeliavimo patikimumą, todėl autoriai atliko platesnį šilumos perdavimo per išorinių sienų konstrukcijas su vakuuminėmis termoizoliacinėmis plokštėmis tyrimą, naudodami 3D kompiuterinę programą.

Skaitinis pastatų atitvarų ar jų fragmentų šilumos perdavimas gali būti modeliuojamas panaudojant įvairias 2D ar 3D kompiuterines programas (Ben Larbi, 2005; Grauer, 2019; Isaia, Fantucci, Capozzoli, & Perino, 2017; Mao, Kan, & Wang, 2020; Tenpierik & Cauberg, 2007). Taip dažnai atliekami įvairūs tyrimai tiek pastoviomis aplinkos sąlygomis, tiek dinaminėmis. Kai kurie tyrimai lygina šiluminių

savybių charakteristikas, nustatytas statinėmis ir dinaminėmis sąlygomis. A. Tadeu ir kt. (Tadeu, Simoes, Simoes, & Prata, 2011) atliko ilginių šiluminių tiltelių skaitinį modeliavimą statinėmis ir dinaminėmis sąlygomis ir teigia, kad ilginiai šiluminiai tilteliai, apskaičiuoti pastoviomis aplinkos sąlygomis, yra nepakankamai tiksliai įvertinami. H. Viot ir kt. (Viot, Sempsey, Pauly, & Mora, 2015) atliko kitą tyrimą ir pateikė išvadą, kad dinaminėmis sąlygomis vertinti konstrukcijų šilumos perdavimą yra tiksliau, kadangi tokiu būdu vertinamas konstrukcijų medžiagų inertiškumas, tačiau visgi tai gan sudėtingas procesas, kuris priešingai nei statinės aplinkos sąlygos neleidžia sukurti supaprastintų šiluminių tiltelių konstrukcinių modelių, kuriuos aprašo ir tyrėjai K. Martin ir kt. (Martin et al., 2011). Remdamiesi savo atliktais tyrimais mokslininkai B. Bruma, L. Moga ir I. Moga (Bruma, Moga, & Moga, 2016) taip pat pabrėžia, kad pastatų inercija turi reikšmingą poveikį vertinant pastatų, turinčių šiluminių tiltelių, energijos poreikį šildymui bei vėsinimui. Tačiau standartas (ISO 13786:2017), apibrėžiantis pastatų komponentų charakteristikas dinaminėmis sąlygomis, teigia, kad šiluminiai tilteliai nedaro didelės įtakos dinaminėms šiluminėms charakteristikoms, todėl jų galima nepaisyti. Taigi dažniausiai skaitinis pastatų šiluminių charakteristikų nustatymas atliekamas statinėmis sąlygomis.

1.5.3. Eksperimentinis „karštosios dėžės“ metodas

Eksperimentiniai sienų fragmentų su šilumai laidžiomis jungtimis matavimai gali būti atliekami laboratorijoje naudojant „karštosios dėžės“ įrenginį pagal standarto LST EN ISO 8990 (1999) reikalavimus. „Karštoji dėžė“ – tai laboratorinis įrenginys, skirtas atkartoti įprastines ribines sąlygas, kai bandinys yra tarp dviejų skirtingų aplinkų. Šį įrenginį sudaro karštoji ir šaltoji kameros, kuriose yra žinomos aplinkos temperatūros, ir tarp kurių yra įstatomas bandinys. „Karštosios dėžės“ įrenginio schema pateikiama 1.8 pav.



1.8 pav. Įrenginio „karštoji dėžė“ schema

Schemoje skaitmenimis pavaizduotos (1.8 pav.) „karštosios dėžės“ įrenginio sudedamosios dalys.

1. Šiltoji saugančioji dėžė:

- vidiniai matmenys $2800 \times 2800 \times 1100$ mm;
- sienelės storis 130 mm, šiluminė varža apie $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

2. Apsauginis oro srautus nukreipiantis skardinis ekranas.

3. Elektrinis valdomas šildytuvas, maksimali galia 660 W, reguliuojamas pagal matavimo dėžės (6) vidinę nustatytąją temperatūrą.

4. Elektrinis šildytuvas matavimo dėžėje, reguliuojama galia 13–660 W.

5. Matavimo dėžės kreipiančioji (ekranas) su paviršiaus temperatūros bei oro temperatūros matavimo termoelektriniais keitikliais.

6. Matavimo dėžė – vidiniai matmenys $2400 \times 2400 \times 360$ mm.

7. Pertvara (gaubianti plokštė) 200 mm storio EPS (padengta 3 mm storio PVC lakštu iš abiejų pusių), varža apie $6 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Į šios pertvaros angą įstatomi bandiniai.

8. Šaltoji apsauginė dėžė:

- vidiniai matmenys $2800 \times 2800 \times 1100$ mm;
- sienelės storis 130 mm, šiluminė varža apie $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

9. Šaltosios dėžės ekranas su paviršiaus bei oro temperatūros matavimo termoelektriniais keitikliais.

10. Šaltosios dėžės valdoma elektrinė šildymo spiralė, maksimali galia 2 kW.

11. Šaltosios dėžės reguliuojama šaldymo sekcija, maksimali šaldymo galia iki 3 kW.

12. Šaltosios pusės oro temperatūros paruošimo sekcija su 5 greičio pakopų ventiliatoriumi.

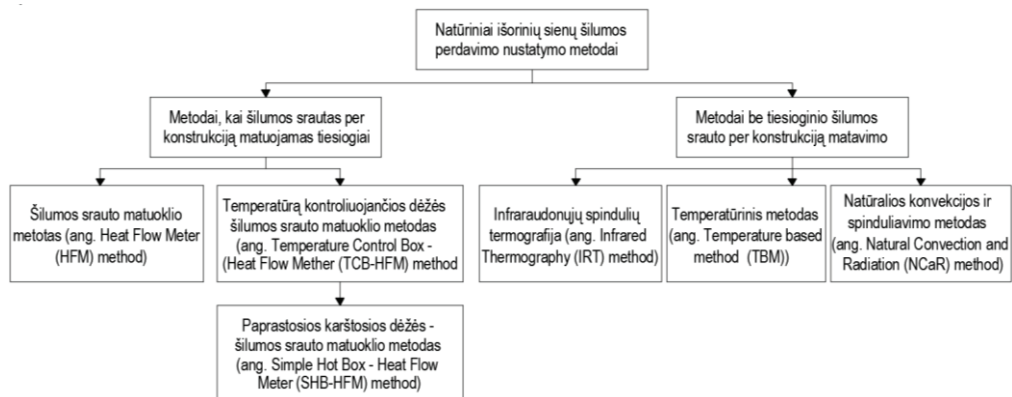
Sumontavus bandinį į pertvarą, reikalingi parametrai matuojami tada, kai nusistovi oro ir bandinio paviršių temperatūros bei tiekiamoji galia į karštą kamerą. Oro ir bandinio paviršių temperatūros matuojamos termoporomis. Pagal šių matavimų duomenis apskaičiuojamos bandinio šilumos perdavimo savybės.

„Karštosios dėžės“ metodas yra vienas patikimiausių būdų laboratorinėmis sąlygomis nustatyti pastatų atitvarų ar jų fragmentų šiluminės savybes. G. Wakili ir C. Tanner (Ghazi Wakili & Tanner, 2003) atliko keraminių kiaurymėtų plytų šilumos perdavimo nustatymą pritaikant „karštosios dėžės“ metodą bei palygino gautus rezultatus su skaitinio modeliavimo rezultatais. Šio tyrimo rezultatai parodė nežymius skirtumus tarp metodų – iki 7 %. K. Martin ir kt. (Martin, Campos-Celador, Escudero, Gomez, & Sala, 2012) šiluminių tiltelių išorinių sienų su kolonomis konstrukcijoje tyrimas taip pat pateikė mažus skirtumus tarp šiluminės varžos verčių, nustatytų „karštosios dėžės“ ir kompiuterinio skaitinio modeliavimo metodais, skirtumas neviršijo 8 %. Dauguma atliktų panašių tyrimų patvirtino „karštosios dėžės“ metodu nustatytų pastatų atitvarų šiluminių savybių atitikimą lyginant su skaitinio modeliavimo metodu gautomis vertėmis (F. Asdrubali & Baldinelli, 2011; Escudero, Martin, Erkoreka, Flores, & Sala, 2013; Gao, Roux, Teodosiu, & Zhao, 2004; Manzan, De Zorzi, & Lorenzi, 2015; Nardi, Perilli, de Rubeis, Sfarra, & Ambrosini, 2019; Sala, Urresti, Martin, Flores, & Apaolaza, 2008).

Autoriai N. Soares ir kt. (Soares et al., 2019) analizavo neardančiuosius laboratorinius ir natūrinius (*angl. in situation (in-situ)*) metodus, kuriais galima įvertinti pastatų atitvarų šilumos perdavimą. Atlikę matavimo metodų apžvalgą, autoriai pateikė šiuos pagrindinius laboratorinio „karštosios dėžės“ metodo privalumus: metodas gali būti pritaikomas labai įvairioms konstrukcijoms, tiek homogeninėms, tiek nehomogeninėms; atliekant matavimus galima imituoti skirtingus temperatūrinius režimus, neišimant konstrukcijos fragmento; gali būti matuojamos didelių matmenų konstrukcijos, o tai užtikrina rezultatų patikimumą. Pagrindiniais metodo trūkumais autoriai įvardijo: reikalinga labai brangi įranga; gan ilga matavimo trukmė, kuri priklauso nuo bandinio inertiškumo; reikalingas periodinis kalibravimas; nematomas temperatūros pasiskirstymas tose tiriamos konstrukcijos vietose, kur susidaro intensyvūs šiluminiai tilteliai; reikalingas aukštos kvalifikacijos operatorius, kuris supranta įrangos veikimo principus ir vykstančius šiluminius procesus; konstrukcijos matmenys yra ribojami matavimo įrangos, todėl sudėtingiau analizuoti nehomogeniškas konstrukcijas.

1.5.4. Natūriniai metodai

Natūriniai išorinių sienų šilumos perdavimo nustatymo metodai naudojami esamuose pastatuose, kai reikalinga nustatyti faktinį pastato energijos suvartojimą ar sprendžiant dėl pastato energinio atnaujinimo. Natūriniai atitvarų šiluminių savybių nustatymo matavimai atliekami realiomis eksploatacinėmis sąlygomis, todėl gaunami rezultatai dažnai gali skirtis nuo teoriškai ar laboratorinėmis sąlygomis nustatytų verčių. M. Teni ir kt. (Teni et al., 2019) atliko esamų natūrinių eksperimentinių metodų, taikomų sienų šilumos perdavimui nustatyti, apžvalgą ir palyginimą. Išanalizuotus matavimo metodus autoriai suskirstė į dvi pagrindines grupes (1.9 pav.). Pirmoji metodų grupė paremta tiesioginiais šilumos srauto per konstrukciją matavimais, o antroji – netiesioginiais.



1.9 pav. Sienos šilumos perdavimo nustatymo natūriniai metodai (Teni et al., 2019)

Vienas iš natūrinių tiesioginio šilumos srauto matavimo metodų yra sienos faktinės šiluminės varžos ir šilumos perdavimo nustatymas, panaudojant šilumos srauto matuoklį (*angl. Heat Flow Meter method, HFM*). Šis matavimas atliekamas pagal standarto ISO 9869-1 (2014) reikalavimus. Tai vienintelis standartizuotas

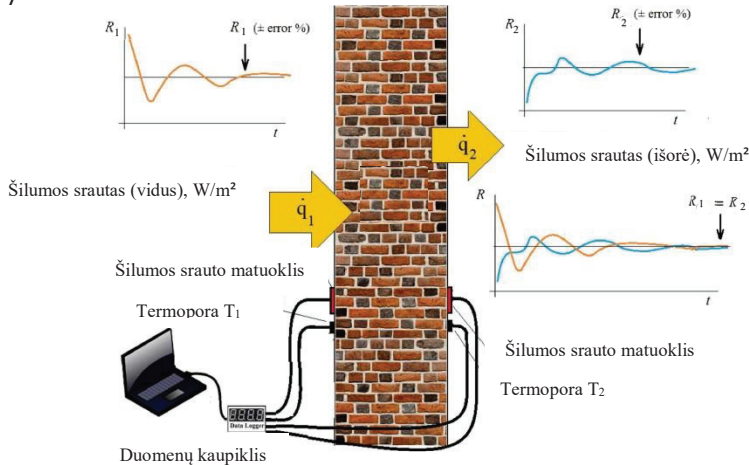
eksperimentinis natūrinis šiluminės varžos matavimo metodas. Standarte nurodoma galima šio matavimo metodo neapibrėžtis – 14–28 %. A. Rasooli ir L. Itard (Rasooli & Itard, 2018) pateikė principinę šio standartinio matavimo schemą (1.10 pav.). Skirtingos aplinkos temperatūros sukuria šilumos srautą per sieną. Termoporomis išmatuojamos atitvaros paviršių temperatūros, o šilumos srauto matuokliu – šilumos srauto per konstrukciją intensyvumas. Matavimai atliekami tam tikrais laiko intervalais pagal standarto reikalavimus. Pagal gautus duomenis apskaičiuojama sienos šiluminė varža arba šilumos perdavimo koeficientas pagal žemiau pateiktas išraiškas:

$$R = \frac{(T_{si} - T_{se})}{q}; \quad (6)$$

$$U = \frac{q}{(T_i - T_e)} = \frac{1}{R_t}; \quad (7)$$

$$R_t = R_{si} + R + R_{se}, \quad (8)$$

čia: T_{si} – konstrukcijos vidinio paviršiaus temperatūra, °C arba K; T_{se} – konstrukcijos išorinio paviršiaus temperatūra, °C arba K; q – šilumos srauto tankis, W/m^2 ; T_i – vidaus aplinkos temperatūra, °C arba K; T_e – išorės aplinkos temperatūra, °C arba K; R_t – visuminė šiluminė varža, $m^2 \cdot K/W$; R_{si} – vidinio konstrukcijos paviršiaus šiluminė varža, $m^2 \cdot K/W$; R_{se} – išorinio konstrukcijos paviršiaus šiluminė varža, $m^2 \cdot K/W$.



1.10 pav. Bendroji matavimo schema pagal standartą ISO 9869-1:2014, pridendant vieną papildomą šilumos srauto matuoklį (Rasooli & Itard, 2018)

Matavimo standartas leidžia naudoti vieną šilumos srauto matuoklį, tačiau tyrėjai A. Rasooli ir L. Itard (Rasooli & Itard, 2018) išvėlgė dviejų šilumos srauto matuoklių naudojimo privalumus (1.10 pav.). Kadangi šio matavimo metodo pagrindiniai trūkumai yra trukmė ir tikslumas, abiejose sienos konstrukcijos pusėse montuojami šilumos srauto matuokliai leidžia matavimą atlikti greičiau ir tiksliau. Matuojant šilumos srauto intensyvumą tik vienoje konstrukcijos pusėje, bandymo trukmė yra žymiai ilgesnė, kadangi pagal standarto nurodymus minimali bandymo

trukmė yra 72 valandos, jei temperatūra apie šilumos srauto matuoklį yra stabili. Kitu atveju bandymas gali trukti ilgiau nei 7 dienas, kadangi nustatyta šiluminė atitvaros varža negali nukrypti daugiau nei 5 % nuo šiluminės varžos vertės, nustatytos prieš 24 valandas. Taigi rekomenduojama atlikti matavimus fiksuotais laiko intervalais ir įrašyti duomenis, pagal kuriuos būtų galima atlikti kompiuterinę rezultatų analizę. Kiekvienas užfiksuotas rezultatas yra kelių matavimų, registruotų trumpais intervalais, vidutinė vertė. Siekiant išvengti neigiamo temperatūros ir drėgmės poveikio, matavimo įranga, sumontuota išoriniame konstrukcijos paviršiuje, turėtų būti papildomai apsaugota. Atlikus reikalingus matavimus, rezultatų analizė gali būti atliekama dviem būdais: vidutinės vertės metodu, kuris yra paprastesnis, arba dinaminio metodu, kuris yra sudėtingesnis, tačiau jis pateikia matavimams kokybės kriterijus ir gali sutrumpinti bandymo trukmę. Dažniausiai naudojamas vidutinės vertės metodas (Erkoreka, Garcia, Martin, Teres-Zubiaga, & Del Portillo, 2016; Gaspar, Casals, & Gangolells, 2016, 2018; Genova & Fatta, 2018; Rasooli & Itard, 2018; Rasooli, Itard, & Ferreira, 2016; Rodler, Guernouti, & Musy, 2019; Roque et al., 2020). Pagal vidutinės vertės metodą konstrukcijos šiluminė varža ir šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal šias lygtis:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j}; \quad (9)$$

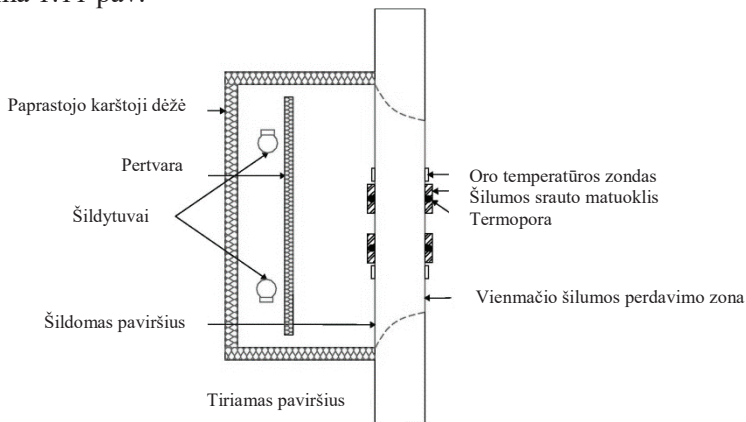
$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}. \quad (10)$$

Taigi panaudojant du šilumos srauto matuoklius, pritvirtintus abiejose konstrukcijos pusėse, gauname tris šiluminės varžos laiko atžvilgiu kreives: pagal vidinėje pusėje esančio šilumos srauto matuoklio duomenis, pagal išorinėje pusėje esančio šilumos srauto matuoklio duomenis bei vidutinę šiluminės varžos vertę pagal abiejų šilumos srauto matuoklių duomenis (1.10 pav.). Jeigu vienos pusės šilumos srauto matuoklio registruojami duomenys pirmiau tampa stabilūs nei kitos pusės, atitvaros šiluminei varžai apskaičiuoti galima panaudoti pirmiau užregistruotus stabilius duomenis, kas padeda sutrumpinti bandymo trukmę. Autoriai A. Rasooli ir L. Itard (Rasooli & Itard, 2018) teigia, kad jeigu abiejų matuoklių duomenys yra nestabilūs ilgą laiką, vidutinės šiluminės varžos kreivė greičiau taps stabili, nei kažkuri vienos pusės matavimo kreivė, o tai paspartina bandymo atlikimą. Taip pat autoriai pastebėjo, kad abiejų pusių matavimo kreivių stebėjimas suteikia papildomos informacijos apie konstrukciją: homogeniškumą, medžiagiškumą ir pan.

Pagrindinius šilumos srauto matavimo metodo privalumus ir trūkumus, remdamiesi mokslinės literatūros apžvalga, aprašė N. Soares ir kt. (Soares et al., 2019). Autoriai pagrindiniais metodo privalumais įvardino šiuos: metodas yra neardantis; pripažintas tarptautiniu mastu ir plačiai naudojamas; naudojama įranga yra nedidelio svorio ir lengvai perkeliama; metodą galima naudoti tiek kontroliuojamomis aplinkos sąlygomis laboratorijoje, tiek natūrinėmis pastato eksploatacijos sąlygomis; kuo didesnis temperatūrų skirtumas sukuriamas tarp tiriamos konstrukcijos paviršių, tuo tikslesni matavimo rezultatai gaunami. Visgi autoriai pateikė ir labai žymių metodo trūkumų: matavimas atliekamas lokaliai – tai

yra neįvertinamas visas konstrukcijos plotas, o tik nedidelė jo dalis; ilga matavimo trukmė; labiau tinkamas vienalytėms sienų konstrukcijoms; tiriamoje konstrukcijoje esančios oro ertmės ir įvairūs karkaso bei tvirtinimo elementai gali žymiai sumažinti rezultatų patikimumą; rezultatų patikimumas taip pat labai priklauso nuo įrangos kalibravimo, matavimo paklaidų bei duomenų registravimo sistemos tikslumo; rezultatų tikslumą lemia aplinkos temperatūros pokyčiai. Taigi, nors šis natūrinis matavimo metodas yra neardantis, paprastas ir palyginus nebrangus, tačiau jis trunka ilgai, rezultatus lemia daug veiksnių (tarp jų ir šiluminius tiltelius sukūriantys šilumai laidūs tvirtinimo elementai, esantys sienų konstrukcijose ir galintys iškreipti rezultatus, lemdami gana dideles matavimo paklaidas), todėl dažnai gali būti pasirenkami kiti metodai konstrukcijų šilumos perdavimui nustatyti.

Kitas neardantis, taip pat tiesioginio šilumos srauto matavimo metodas, kuris gali būti naudojamas esamų pastatų sienų konstrukcijų šiluminei varžai nustatyti – paprastosios karštosios dėžės – šilumos srauto matuoklio (*angl. Simple Hot Box – Heat Flow Meter Method (SHB-HFM)*) metodas, pasiūlytas tyrėjų X. Meng ir kt. (Meng et al., 2017). Šis matavimo metodas padeda sumažinti aukščiau aprašyto matavimo metodo ribotumą, kai pastate nėra oro kondicionavimo galimybių, kadangi metodas remiasi šilumos srauto matuoklio metodu tik papildomai sukūriant stabilią šiluminę aplinką su paprastąja karštąja dėže. Principinė šio metodo schema pateikiama 1.11 pav.



1.11 pav. Bendroji paprastosios karštosios dėžės – šilumos srauto matuoklio matavimo metodo schema (Roque et al., 2020)

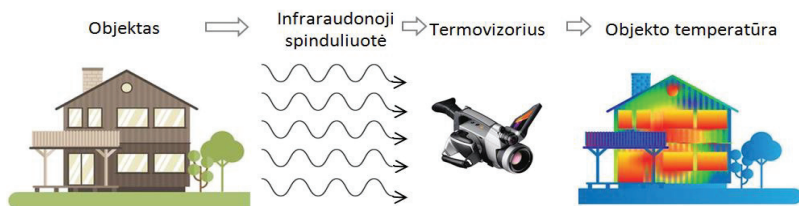
Eksperimentinė įranga yra paprasta, sudaryta iš šilumos srauto matuoklių, temperatūros jutiklių ir karštosios dėžės, kurią sudaro termoizoliacinė rėminė konstrukcija su viduje įrengtais šildytuvais. Šildytuvai padeda palaikyti didesnę temperatūrų skirtumą tarp atitvaros vidaus ir išorės paviršių, todėl sukuriamas intensyvesnis šilumos srautas per konstrukciją, taigi šis matavimo metodas nėra priklausomas nuo sezoniškumo. Rezultatų, gautų šiuo natūriniu matavimo metodu, apdorojimas yra toks pats, kaip gautų prieš tai aprašytu šilumos srauto matuoklio metodu.

E. Roque ir kt. (Roque et al., 2020) nustatė sienos šiluminę varžą paprastosios karštosios dėžės – šilumos srauto matuoklio bei skaitinio modeliavimo metodais. Jų

skirtingais metodais gauti rezultatai sutapo tarpusavyje, todėl autoriai tvirtina eksperimentinio natūrinio matavimo metodo patikimumą. Visgi mokslinėje literatūroje randama ir daugiau publikuojamų tyrimų panaudojant paprastosios karštosios dėžės – šilumos srauto matuoklio metodą, kurie, priklausomai nuo įvairių veiksnių, pateikia žymiai didesnes metodo paklaidas (Francesco Asdrubali, D’alessandro, Baldinelli, & Bianchi, 2014; Desogus, Mura, & Ricciu, 2011). X. Meng ir kt. (Meng et al., 2015) įvardija, kad apie 6 % matavimo paklaida, lyginant su projektine verte, pasiekama sukuriant gana intensyvią šilumos srautą per tiriamą konstrukciją, užtikrinant optimalius karštosios dėžės matmenis bei matavimo jutiklių išdėstymą.

Eksperimentinių natūrinių šilumos perdavimo matavimo metodų pagrindinius privalumus ir trūkumus mokslinės literatūros apžvalgoje pateikė D. Bienvenido-Huertas ir kt. (Bienvenido-Huertas, Moyano, Marin, & Fresco-Contreras, 2019). Autoriai įvardijo šiuos pagrindinius metodo privalumus: nepriklausomas nuo sezoniškumo; neilga matavimo trukmė, palyginus su šilumos srauto matavimo metodu be apsauginės dėžės; naudojama nesudėtinga ir nebrangi įranga. Autoriai išskyrė šiuos pagrindiniais metodo trūkumus: svarbu naudoti reikiamo dydžio apsaugančiąją dėžę, nes per maži jos matmenys gali neužtikrinti gaunamų rezultatų patikimumo (autoriai mini, kad didėjant matuojamos sienos konstrukcijos storiui, atitinkamai turi didėti ir apsauginės dėžės matmenys); šilumos srauto matuoklių ir temperatūros jutiklių išdėstymas lemia matavimo rezultatus (jie neturėtų būti montuojami ant įvairių sujungimų ar mūro skiedinio siūlių, kadangi tai gali lemti žymiai didesnes matavimo paklaidas); metodas dar gana naujas, todėl nėra atlikta užtektinai tyrimų, kad būtų galima įvertinti jo tinkamumą ir pritaikomumą. Autoriai pateikė išvadą, kad tiriant sienų konstrukcijas, kuriose susidaro šiluminiai tilteliai, jų dinaminė elgsena nėra iki galo aiški, todėl kyla abejonių dėl natūrinių matavimo metodų patikimumo, ir dėl šios priežasties reikalinga šiuos metodus tobulinti.

Vienas iš netiesioginių eksperimentinių šiluminės varžos nustatymo metodų – infraraudonųjų spindulių termografija (IRT). Šis metodas dažniausiai naudojamas kaip kokybinis diagnostinis pastatų vertinimo metodas, kuris parodo silpnas vietas, tokias kaip nesandarumai, kuriuose galima drėgmės kondensacija ar šiluminių tiltelių susidarymas (Barreira, Almeida, & Delgado, 2016; Barreira, Almeida, & Moreira, 2017; de Freitas, de Freitas, & Barreira, 2014; Edis, Flores-Colen, & de Brito, 2014; Fox, Coley, Goodhew, & De Wilde, 2015; Kylili, Fokaides, Christou, & Kalogirou, 2014; Lucchi, 2018). Pastatų vertinimas IRT metodu atliekamas pagal standarto LST EN 13187 (2000) reikalavimus. Fasado paviršiaus temperatūros matavimo IRT metodu principinė schema pateikta 1.12 pav.



1.12 pav. Objekto paviršiaus temperatūros matavimo IRT metodu principinė schema

Mokslininkai ir ekspertai, naudodami infraraudonųjų spindulių termografiją, pastebėjo, kad šis metodas gali būti pritaikytas kiekybiniam pastatų šiluminių savybių, pavyzdžiui, atitvarų šiluminei varžai nustatyti. Taikant IRT metodą, išorinės pastato sienos šilumos perdavimas apskaičiuojamas taip:

$$U = \frac{q_r + q_c}{T_i - T_e} \quad (11)$$

čia: q_r – šilumos srautas dėl spinduliavimo, W/m^2 ; q_c – šilumos srautas dėl konvekcijos, W/m^2 ; T_i – vidaus oro temperatūra šalia matuojamo objekto, K ; T_e – išorės oro temperatūra šalia matuojamo objekto, K .

Taigi IRT metodas tapo itin dažnai naudojamas atliekant įvairius mokslinius tyrimus pastatų šiluminės fizikos srityje. Tyrėjai atliko nemažai metodo eksperimentinių ir analitinių analizių, siekdami patvirtinti metodo patikimumą. Mokslininkai M. O'Grady, A. A. Lechowska ir A. M. Harte (O'Grady, Lechowska, & Harte, 2017) nustatė sienos konstrukcijos su plieniniu profiliu, esančiu termoizoliaciniame sluoksnyje, ilginių šiluminių tiltelių vertes priklausomai nuo vėjo greičio keliais skirtingais metodais: IRT, eksperimentiniu „karštosios dėžės“ bei teoriniu skaitinio modeliavimo. Autoriai palygino „karštosios dėžės“ bei IRT metodais gautas vertes ir nustatė, kad vėjo greičiui esant 0,5 m/s, 1,5 m/s ir 4 m/s, skirtumas tarp minėtų metodų siekia atitinkamai 9 %, 6 % ir 12 %. Palyginus skaitinio modeliavimo ir IRT metodais gautas vertes, skirtumai atitinkamai siekė 24 %, 13 % ir 2 %. Remdamiesi rezultatais tyrėjai padarė išvadą, kad IRT metodą ne visada galima pritaikyti esant standartiniam 4 m/s vėjo greičiui, todėl atliko tyrimą, kaip šiluminio tiltelio vertę, gautą esant bet kokiam vėjo greičiui, galima pakoreguoti į vertę, atitinkančią standartinį vėjo greitį. Atlikus papildomus eksperimentinius tyrimus ir padarius korekcijas, pasiūlytas pakoreguotas IRT metodas, kuriuo gautas ilginio šiluminio tiltelio vertes palyginus su skaitinio modeliavimo rezultatais, gaunami gerokai mažesni skirtumai nei taikant nepakoreguotą metodiką: 14 %, 7 % ir 3 % prie atitinkamų vėjo greičių.

F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. Bianchi (F. Asdrubali, Baldinelli, & Bianchi, 2012) taip pat analizavo šiluminių tiltelių pastatuose įvertinimą pritaikant IRT metodą. Autoriai analitiniu būdu įvedė kiekybinį koeficientą, kuris įvertina šiluminių tiltelių poveikį bendrai pastatų šilumos srauto dispersijai, t. y. šis koeficientas apibrėžiamas kaip santykis tarp šilumos srauto realiomis sąlygomis (esant šiluminiams tilteliams) ir šilumos srauto, kai šiluminių tiltelių nėra. Gautus rezultatus autoriai palygino su šilumos srauto matuoklio bei skaitinio modeliavimo metodu gautais rezultatais ir patvirtino, kad IRT metodu nustatytos vertės labai artimos kitais dviem metodais gautoms vertės. Kadangi IRT metodo naudojimas yra paprastas ir greitas, atlikta daug įvairių tyrimų pritaikant šį metodą (Albatici & Tonelli, 2010; Arkadiusz, Joanna, & Dorota, 2017; Baldinelli et al., 2018; Bienvenido-Huertas, Bermudez, Moyano, & Marin, 2019; Donatelli, Aversa, & Luprano, 2016; Lehmann, Ghazi Wakili, Frank, Collado, & Tanner, 2013; Nardi, Lucchi, de Rubeis, & Ambrosini, 2018; Ohlsson & Olofsson, 2014; Taylor, Counsell, & Gill, 2014; Zalewski et al., 2010).

Nors IRT metodas patogus naudoti, greitas, nebrangus ir paprastas, tačiau būtina atsižvelgti į veiksnius, darančius įtaką metodo tikslumui. Vienas šių veiksnių – bandymo aplinkos sąlygos. IRT tyrimo metodas itin jautrus aplinkos sąlygų pokyčiams, todėl tiriamas paviršius neturėtų būti paveiktas tiesioginių saulės spindulių, didelio vėjo ar drėgmės, nes šie poveikiai žymiai lemia matavimo rezultatus (Kirimtat & Krejcar, 2018; Lu & Memari, 2019; Maroy, Carbonez, Steeman, & Van den Bossche, 2017). Siekiant išvengti nuolat kintančių aplinkos sąlygų, esant galimybei, rekomenduojama IRT matavimus atlikti pastato viduje, kur aplinkos sąlygos daug pastovesnės. Taip pat matavimų metu būtina užtikrinti bent 15 laipsnių temperatūros skirtumą tarp tiriamos atitvaros vidinio ir išorinio paviršiaus tam, kad susidarytų pakankamas šilumos srautas per konstrukciją. Siekiant tikslumo, galima atlikti infraraudonųjų spindulių kameros matuojamos temperatūros patikslinimus, panaudojant žinomos spinduliavimo gebos medžiagą, kuri pritvirtinama prie tiriamojo paviršiaus ir padeda išspręsti problemas, susijusias su spinduliavimu bei fokusavimu (Porras-Amores, Mazarron, & Canas, 2013). Autoriai N. Soares ir kt. (Soares et al., 2019) pastatų atitvarų šilumos perdavimo tyrimo metodų apžvalgoje įvardijo šiuos pagrindinius IRT metodo privalumus: metodas neardantysis ir plačiai pritaikomas; gali būti pritaikomas kaip pagalbinis metodas matavimo vietų pasirinkimui, kai konstrukcija nevienalytė ir turi tam tikras silpnas vietas; nereikalingas tiesioginis kontaktas su tiriamos konstrukcijos paviršiumi, todėl galimas matavimas iš didesnio atstumo; lengva matavimo įranga, kurią patogų ir paprasta transportuoti; per trumpą laiką galima įvertinti didelius konstrukcijų plotus realiu laiku; IRT kamera gali automatiškai susikalibruoti. Be minėtų IRT metodo privalumų autoriai išskyrė ir esminius trūkumus: naudojama labai brangi įranga; dirbti su įranga ir analizuoti rezultatus gali tik kvalifikuotas asmuo; metodas labai priklausomas nuo klimato sąlygų; matavimo aplinkoje esantys dūmai ar kita tarša (dėl aukštos emisijos gebos) gali paveikti matavimo rezultatus. Taigi apžvelgus pagrindinius metodo privalumus, trūkumus ir atliktus tyrimus taikant šį metodą, galima apibendrinti, kad IRT metodas tinkamas ir plačiai taikomas tiek kokybinei, tiek kiekybinei pastatų šiluminei diagnostikai, tačiau turi daug apribojimų ir ne visada labai tikslus.

Daug rečiau naudojamas nestandartizuotas netiesioginis šiluminės varžos matavimo metodas – temperatūrinis metodas (*angl. temperature based method, THM*). Pagrindinės naudojamos priemonės – temperatūros jutikliai, kuriais reikalinga išmatuoti tris temperatūras: vidaus oro, išorės oro bei vidinio atitvaros paviršiaus. Pastato atitvaros šilumos perdavimas, naudojant matavimo rezultatus, apskaičiuojamas taip:

$$U = \frac{7.69(T_i - T_{s,in})}{T_i - T_e}, \quad (12)$$

čia: 7.69 – vidaus konvekcijos koeficientas; T_i – vidaus oro temperatūra, K ; $T_{s,in}$ – sienos vidinio paviršiaus temperatūra, K ; T_e – išorės oro temperatūra, K .

Kaip ir ankstesnis matavimo metodas, temperatūrinis metodas yra jautrus aplinkos sąlygų svyravimams, todėl, siekiant patikimų rezultatų, tiriamą konstrukciją neturėtų būti veikiami tiesioginiai saulės spinduliai, stiprus vėjas, temperatūros svyravimai bei drėgmės. Taip pat rekomenduojamas bent 15 laipsnių temperatūros

skirtumas tarp vidinio ir išorinio konstrukcijos paviršių. Visgi šiuo temperatūriniu metodu gaunami rezultatai turi dideles neapibrėžtis. Tyrimas, kurio metu buvo nustatytas aštuonių pastatų išorinių sienų šilumos perdavimas, parodė, kad metodo neapibrėžtis siekia 6–13 % (Bienvenido-Huertas, Rodriguez-Alvaro, Moyano, Rico, & Marin, 2018). G. C. Buzatu ir kt. (Buzatu, Stan-Ivan, Mircea, Manescu, & Ieee, 2017) palygino skirtingų sienos konstrukcijų šilumos perdavimo vertes, kurios buvo nustatytos dviem būdais: apskaičiuotos, sudedant kiekvieno konstrukcijos sluoksnio šilumines varžas, ir pritaikant eksperimentinį temperatūrinį metodą. Šio tyrimo rezultatai parodė labai žymius nesutapimus tarp skirtingais metodais gautų verčių – daugiau kaip 40 %. Kituose moksliniuose tyrimuose, kuriuose eksperimentiniu temperatūriniu metodu nustatytos atitvarų šilumos perdavimo vertės palyginamos su kitais metodais gautomis vertėmis, pateikiami 0.3–83 % skirtumai (Bienvenido-Huertas, Rodriguez-Alvaro, et al., 2018; Kim, Kim, Jeong, & Song, 2018; Kim, Lee, Kim, Yoo, & Jeong, 2018).

Natūralios konvekcijos ir spinduliavimo metodas (*angl. natural convection and radiation method, NCaR*) – taip pat nestandardizuotas eksperimentinis metodas, kuris pagrįstas vidaus ir išorės oro temperatūros matavimu bei vidinio tiriamos atitvaros paviršiaus temperatūros ir spinduliavimo gebos ε matavimu. Paviršiaus spinduliavimo geba ε nustatoma panaudojant infraraudonųjų spindulių kamerą. Turint šiuos matavimų rezultatus, konstrukcijos šilumos perdavimas apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$U = \frac{C \cdot \sum_j (T_i - T_{si})^{n+1} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_j (T_i^4 - T_{si}^4)}{\sum_j (T_i - T_e)}, \quad (13)$$

čia: C ir n yra konstantos standartinėje konvekcijos koeficiento išraiškos formoje; T_i – vidaus oro temperatūra, K; T_{si} – vidinės atitvaros paviršiaus temperatūra, K; ε – vidinio paviršiaus spinduliavimo geba; σ – Stefano Bolcmano konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}, Wm^{-2}K^{-4}$); T_e – išorės oro temperatūra, K.

Taikant natūralios konvekcijos ir spinduliavimo metodą svarbu užtikrinti pastovias matavimo sąlygas, kurios turėtų nekisti bent 72 valandas, o tarp vidinio ir išorinio atitvaros paviršiaus turėtų būti bent 10 laipsnių temperatūros skirtumas (Teni et al., 2019).

Naujausiuose literatūros šaltiniuose aprašomi, analizuojami ir moksliniuose tyrimuose taikomi natūriniai šilumos perdavimo nustatymo metodai yra dažniausiai paprasti, nepažeidžiantys pastatų konstrukcijų ir pigūs matavimo metodai, kuriems atlikti nereikalinga brangi ir sudėtinga įranga. Tačiau natūriniai šilumos perdavimo matavimo metodai pasižymi šiais pagrindiniais trūkumais, kuriuos išsamiaje tyrime įvardijo M. Teni, H. Cristic ir P. Kosinski (Teni et al., 2019):

- per mažai natūrinių tyrimų atlikta šiltuoju metų laikotarpiu, todėl vis dar išlieka sezoniškumo apribojimas;
- ilga matavimų trukmė;
- nenustatytas optimalus matavimų rezultatų kiekis atsižvelgiant į matavimo trukmę ir duomenų registravimo dažnumą;
- nepakankamai tiksliai nustatyti visi matavimo tikslumui poveikį darantys veiksniai.

Dauguma tyrėjų pastebi, kad natūriniai matavimo metodai yra patrauklūs, tačiau vis dar trūksta jų patikimumą užtikrinančių tyrimų.

1.6. Įvairiais metodais apskaičiuotų ir išmatuotų termoizoliacinių sluoksnių su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficientų sulyginamoji analizė

Literatūroje randama daug aprašytų tyrimų, kurių metu pastatų atitvarų šilumos perdavimo vertės nustatomos keliais skirtingais metodais ir gauti rezultatai palyginami tarpusavyje. Atliekant naujausių tyrimų apie šilumai laidžių jungčių poveikį atitvaros šilumos perdavimui apžvalgą pastebėta, kad trūksta tyrimų, lyginant skirtingus šilumos perdavimo nustatymo metodus, kuriuose būtų analizuojamos skirtingos šilumai laidžių jungčių charakteristikos. M. Grauer (Grauer, 2019) atliktame tyrime apie vėdinamų fasadų sistemų indėlį į metinį energijos suvartojimą pastatuose pasirinko įvairius šilumos laidumo koeficientus turinčius tvirtinimo elementus: aliuminio lydinio ($\lambda=160 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), cinko ($\lambda=110 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), plieno ($\lambda=50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), stiklo pluošto ($\lambda=0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Pastatuose susidarantys šiluminiai tilteliai buvo apskaičiuoti panaudojant 2D nekintamų sąlygų skaitinio modeliavimo kompiuterinę programą, tačiau rezultatai nebuvo vertinami ir lyginami su gautais panaudojant kitus skaičiavimo metodus. P. Santos ir kiti (Santos, Goncalves, Martins, Soares, & Costa, 2019) analizavo lengvų plieninio karkaso sienų šilumos perdavimą. Tyrimas buvo atliktas remiantis įvairiais šilumos perdavimo vertinimo metodais: eksperimentiniais matavimais („karštosios dėžės“ metodas), 3D skaitinio modeliavimo programa ANSYS, 2D skaitinio modeliavimo programa THERM bei analitiniu būdu pagal standarto EN ISO 6946 (2017) reikalavimus pastatų komponentams su nehomogeniniais sluoksniais. Tyrimo rezultatai parodė labai gerą tarpusavio atitikimą, nustatant kelių pasirinktų lengvų plieninio karkaso sienų konstrukcijų šilumos perdavimą, taikant skirtingus šilumos perdavimo nustatymo metodus. Didžiausias skirtumas tarp šilumos perdavimo verčių, nustatytų eksperimentiniu bei skaitinio modeliavimo metodais, buvo iki 14 %. Šį skirtumą, autorių teigimu, galėjo lemti temperatūros ir šilumos srauto jutiklių netikslumas, jutiklių išdėstymo netikslumas, bandinių paruošimo trūkumai, netikslumai, konvekcijos poveikio oro tarpe ir termoizoliacijos tvirtinimo smeigių nevertinimas skaitinio modeliavimo metu. Remiantis tyrimo rezultatais būtų galima manyti, kad nėra didelės reikšmės, kurį šilumos perdavimo nustatymo metodą pasirinkti, kadangi, palyginus skirtingais metodais gautas vertes, jos skiriasi labai nežymiai. Visgi vienareikšmiškai pasikliauti šio tyrimo rezultatais nesiūloma, nes sienų šilumos perdavimas buvo nustatytas panaudojant tik plieninius karkaso elementus. M. Gorgolewski (Gorgolewski, 2007) taip pat teigė, kad standartinė empirinė procedūra tinkama vertinti jungčių, kertančių termoizoliacinius atitvarų sluoksnius, poveikį konstrukcijos šilumos perdavimui, tačiau kaip ir ankstesniame tyrime, autorius atliko tyrimą tik su vienos rūšies plieniniais tvirtinimo elementais.

Taigi, atlikus naujausios mokslinės literatūros analizę pastebėta, kad atlikti tyrimai neatskleidžia žymių skaitinio modeliavimo bei standartizuoto apytikslinio analitinio metodų rezultatų tarpusavio skirtumo priežasčių, kai sienos termoizoliacinį sluoksnį kerta šilumai laidžios metalinės jungtys. Šiuos skirtumus aiškiai parodo ekspertų ar projektuotojų atlikti pastatų atitvarų šilumos perdavimo ar reikiamo

termoizoliacinio sluoksnio storio pastatų atitvaroms pagal galiojančius reikalavimus parinkimo skaičiavimai. Jie praktiškai patvirtino, kad taikant du dažniausiai naudojamus skaičiavimo metodus – empirinę standartinę procedūrą bei skaitinį modeliavimą – jų rezultatai reikšmingai skiriasi tarpusavyje. Tai iliustruoja 1.1 lentelėje pateikti išorinės vėdinamos pastato sienos termoizoliacinio sluoksnio storio parinkimo rezultatai, kai tą pačią sienos konstrukciją kerta „L“ formos jungtys. Šilumai laidžių jungčių medžiagos: aliuminio lydinys ($\lambda = 160 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), cinkuotas plienas ($\lambda = 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) ir nerūdijantis plienas ($\lambda = 17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Vėdinamos sienos šilumos perdavimas skaičiuojamas taikant standartinę empirinę procedūrą bei 3D skaitinį modeliavimą kompiuterine programa HEAT3. Atliekant skaičiavimus keičiamas termoizoliacinio sluoksnio storis, kol bendras konstrukcijos šilumos perdavimo koeficientas pasiekia $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ vertę, kurią Lietuvoje turi pasiekti gyvenamųjų renovuojamų pastatų išorinių sienų atitvaros pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ reikalavimus.

1.1 lentelė. Išorinės sienos termoizoliacinio sluoksnio storiai ir šilumos perdavimo koeficientai, apskaičiuoti skirtingais metodais (Sudaryta autorės pagal Statybinės fizikos laboratorijos ataskaitą Nr. 109/18)

Metodas	Apskaičiuotas termoizoliacinio sluoksnio storis, mm		
	Tvirtinimo elementų medžiaga		
	Aliuminio lydinys $\lambda=160 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Cinkuotas plienas $\lambda=50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Nerūdijantis plienas $\lambda=17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
LST EN ISO 6946	380 (U=0,199)	170 (U=0,198)	140 (U=0,194)
EN ISO 10211-1 (HEAT3)	230 (U=0,197)	160 (U=0,196)	140 (U=0,194)
Skirtumas, %	60,5	5,9	0,0

Vėdinama fasado konstrukcija*	Apskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientas U, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$			Skirtumas, %
	Tvirtinimo elementų šilumos laidumas λ , $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	LST EN ISO 6946	EN ISO 10211-1 (HEAT3)	
1.1.	1	0,150	0,150	-0,07
1.2.	17	0,178	0,164	8,70
1.3.	50	0,237	0,171	38,37
1.4.	160	0,433	0,176	146,29
1.5.	230	0,558	0,177	215,86
2.1.	1	0,191	0,191	-0,16
2.2.	17	0,237	0,227	4,18

2.3.	50	0,332	0,265	25,24
2.4.	160	0,648	0,305	112,47
2.5.	230	0,850	0,313	171,29
3.1.	1	0,184	0,184	-0,12
3.2.	17	0,227	0,215	5,73
3.3.	50	0,316	0,241	31,12
3.4.	160	0,611	0,264	131,77
3.5.	230	0,799	0,268	197,78
4.1.	1	0,179	0,179	-0,14
4.2.	17	0,219	0,207	5,68
4.3.	50	0,303	0,231	30,72
4.4.	160	0,581	0,252	129,98
4.5.	230	0,758	0,257	195,10
5.1.	1	0,095	0,095	-0,22
5.2.	17	0,118	0,116	1,57
5.3.	50	0,165	0,141	17,51
5.4.	160	0,322	0,170	89,75
5.5.	230	0,422	0,177	138,47
6.1.	1	0,050	0,050	-0,46
6.2.	17	0,074	0,072	3,73
6.3.	50	0,125	0,096	29,70
6.4.	160	0,292	0,125	134,68
6.5.	230	0,399	0,131	203,61

*Konstrukcijų aprašymai pateikiami 2 priede.

Pagal aukščiau lentelėje pateiktus termoizoliacinio sluoksnio storio skaičiavimų rezultatus identiškomis sienų su skirtingo šiluminio laidumo jungtimis konstrukcijoms, kurios turi pasiekti šilumos perdavimo koeficiento vertę, ne mažesnę nei $0,2 W/(m^2 \cdot K)$, matoma, kad naudojant mažesnio šiluminio laidumo jungtis, cinkuoto ar nerūdijančio plieno, termoizoliacinio sluoksnio storis, parinktas taikant skaitinį ir analitinį metodus, sutampa arba skiriasi itin nežymiai – iki 6 %. Tačiau atitvaros termoizoliacinį sluoksnį kertant aliuminio lydinio jungtimis, kurių šilumos laidumas didžiausias, apskaičiuotos vertės skiriasi labai daug: skaitinio modeliavimo metodu parinkta 230 mm termoizoliacinio sluoksnio storio vertė, o standartiniu empiriniu metodu – 380 mm vertė. Skirtumas tarp šių verčių sudaro net per 60 %.

Antroje lentelės 1.1 dalyje pateikti vėdinamų sienų konstrukcijų su skirtingais konstrukcinių elementų geometriniais ir šiluminiais parametrais šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimų rezultatai, gauti skaitinio modeliavimo ir apytiksliai empiriniu metodu. Palyginus dviem metodais gautus skaičiavimo rezultatus, matoma tendencija, kad naudojant didesnio nei $50 W/m \cdot K$ šiluminio laidumo jungtis, kurios kerta sienos konstrukcijos termoizoliacinį sluoksnį, gaunami žymūs šilumos perdavimo skirtumai: nuo ~18 % iki ~216 %.

Pirmosios (1.1.–1.5.), antrosios (2.1.–2.5.) ir trečiosios (3.1.–3.5.) grupių sienų konstrukcijos buvo skaičiuojamos naudojant to paties storio, tačiau skirtingo šiluminio laidumo laikantįjį sluoksnį. Pirmuoju atveju laikančiojo sluoksnio šilumos laidumo koeficientas buvo $\lambda = 0,10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, antruoju – $\lambda = 2.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, trečiuoju – $0,6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Palyginus šių trijų sienų konstrukcijų grupių šilumos perdavimo rezultatus abiem skaičiavimo metodais, matoma, kad didėjant laikančiojo sluoksnio šiluminiam laidumui, rezultatų skirtumas mažėja. Kai termoizoliacinio sluoksnio šilumos laidumas dvigubai sumažėja (padidėja suminė sienos konstrukcijos šiluminė varža), šilumos perdavimo skaičiavimų rezultatų skirtumas padidėja 30 %–60 %. Šią tendenciją parodė penktos (5.1.–5.5.) ir šeštos (6.1.–6.6.) sienų konstrukcijų grupių palyginimas, kadangi šioms konstrukcijų grupėms termoizoliacinio sluoksnio šilumos laidumo koeficiento vertės atitinkamai buvo taikytos $0,04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ir $0,02 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Siekiant pademonstruoti, kokią praktinę reikšmę standartinės apytikslės empirinės procedūros taikymas turi pastato šiluminėms charakteristikoms, buvo pasirinktas tipinis 9 aukštų daugiabutis gyvenamasis namas ir pastatų energinio naudingumo sertifikavimo kompiuterine programa „NRG5“ apskaičiuoti jo šilumos nuostoliai per sienas (sienų plotas 2170 m^2), kai sienų su aliuminio lydinio jungtimis ($\lambda_c = 160 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) šilumos perdavimas pirmu atveju apskaičiuotas pagal standartinę apytikslę procedūrą, o antruoju atveju – taikant 3D skaitinį modeliavimą. Pirmuoju atveju šilumos nuostoliai per 1 m^2 sienų ploto apskaičiuoti $11,94 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{metai})$, antruoju – $5,82 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{metai})$. Šis skirtumas lemia apie 30 % didesnes šiluminės energijos sąnaudas pastatui šildyti. Kadangi taškiniai šiluminiai tilteliai daugiabučių gyvenamųjų pastatų fasadų sistemose dažniausiai yra identiški, tikėtina, kad jų poveikis tokių pastatų šiluminėms charakteristikoms bus panašus kaip apskaičiuota pasirinktam tipiniam daugiabučiui pastatui.

Nors nei naujausiuose atliktuose tyrimuose, nei standartuose ar reglamentuose neminima, kad empirinė procedūra tinkama tik plieniniams elementams vertinti, akivaizdu, kad naudojant didesnę šiluminę laidumą turinčius tvirtinimo elementus, kurie kerta konstrukcijų termoizoliacinius sluoksnius, ši skaičiavimo procedūra nėra tinkama tiksliai jų poveikiui konstrukcijos šilumos perdavimui įvertinti. Taigi pagrindinis šio tyrimo tikslas yra atlikti šilumos srauto per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimus ir išanalizuoti apytikslėje empirinėje procedūroje naudojamos lygties fizikinę prasmę bei pasiūlyti šios lygties pataisą, pagrįstą nustatytomis konstrukcijos šiluminių, techninių parametru priklausomybėmis, kad šis paprastas empirinio skaičiavimo metodas būtų tinkamas visų tipų jungčių poveikiui šilumos perdavimui vertinti.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados

Atlikus naujausių tyrimų apie šilumos srautus ir šilumos perdavimą per pastatų fasadų konstrukcijas apžvalgą ir išanalizavus šilumos perdavimo per atitvaras nustatymo metodus prieita prie šių išvadų:

1. pastatų konstrukcijose susidarantys ilginiai ir taškiniai šiluminiai tilteliai turi reikšmingą poveikį atitvaros šilumos perdavimo koeficientui ir pastato šilumos nuostoliams pro atitvaras;
2. 3D skaitinio modeliavimo ir eksperimentinis „karštosios dėžės“ metodai yra tiksliausi ir tinkamiausi įvertinti sienos konstrukcijoje termoizoliacinius sluoksnius kertančių jungčių poveikiui bendram šilumos perdavimui;
3. taikant standartinę empirinę skaičiavimo procedūrą, gaunami reikšmingi apskaičiuotų ir skaitinio modeliavimo metodu gautų šilumos perdavimo koeficientų skirtumai, kai vertinamos sienų konstrukcijos su didelio šiluminio laidumo jungtimis, todėl būtina ištirti šių skirtumų priežastis ir pakoreguoti skaičiavimo empirinę lygtį.

2. TYRIMŲ METODIKA

2.1. Tyrimų metodikos pasirinkimas

Siekiant ištirti šilumos perdavimą per termoizoliacinius sluoksnius su šilumai laidžiomis jungtimis ir patikslinti empirinę skaičiavimo procedūrą, pasirinkti du šilumos perdavimo nustatymo metodai – skaitinis modeliavimas bei eksperimentinis „karštosios dėžės“. Šie metodai pasirenkami dėl aukšto patikimumo, kadangi atliekant tyrimus skaitinio modeliavimo metodu yra galimybė tiksliai užfiksuoti aplinkos parametrus, o konstrukcijos geometrija atkartojama itin tiksliai. „Karštosios dėžės“ metodas – tai vienas iš patikimiausių ir labiausiai tinkamų eksperimentinių būdų nustatyti konstrukcijos šilumos perdavimą. Šia laboratorine įranga, kurios aprašymas pateiktas 1.5.3 skyriuje (1.8 pav.), galima išmatuoti viso didelio sienos fragmento šilumos perdavimą, o matavimo rezultatai nepriklauso nuo termoporų bei šilumos srauto matuoklių pridėjimo ant fragmento paviršiaus vietų. Taip pat svarbu tai, kad yra galimybė reguliuoti aplinkos sąlygas ir, sukalibravus matavimo įrangą, tiksliai išmatuoti reikalingus parametrus. Sumontavus tiriamos sienos fragmentą į „karštosios dėžės“ įrangą, matavimai gali būti atliekami keliuose skirtinguose temperatūros režimuose, neišimant bandinio – tai leidžia greičiau ir patogiau atlikti platesnę sienos konstrukcijos analizę.

Tyrimo metu „karštosios dėžės“ metodas buvo taikomas tam, kad būtų patikrintas skaitinio modeliavimo metodu gaunamų rezultatų patikimumas. Skaitinio modeliavimo programa buvo atkuriami identiški vėdinamų sienų su šilumai laidžiomis jungtimis fragmentai, išbandyti eksperimentiniu „karštosios dėžės“ metodu. Atitinkamai buvo atkuriamos ir aplinkos sąlygos, kurios priimtos kaip nekintančios.

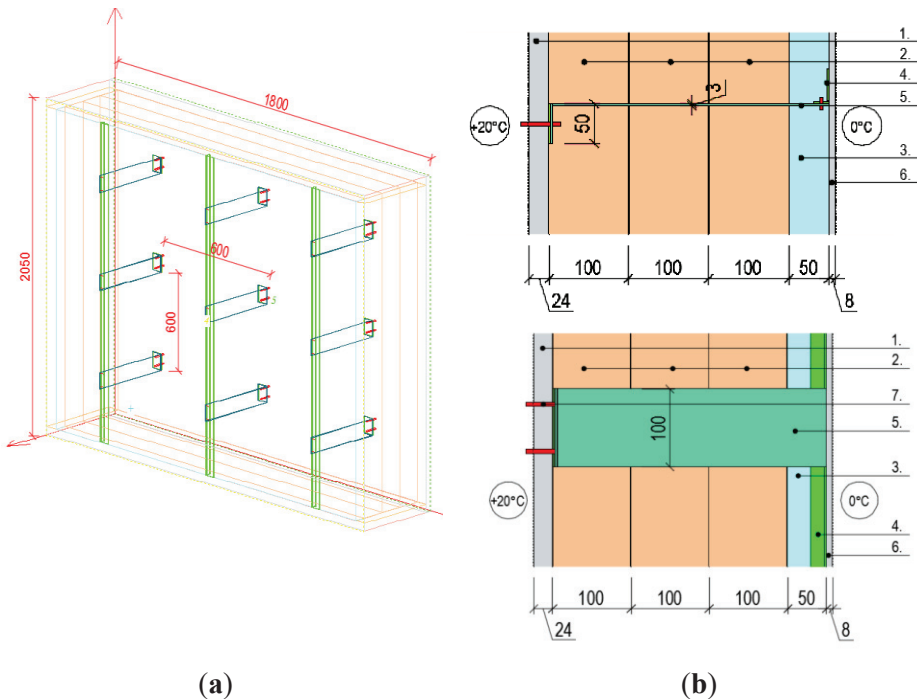
2.2. Sienos fragmento su šilumai laidžiomis jungtimis modelis ir medžiagos

2.2.1. Geometrinis modelis

Eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai atlikti sukūrus geometrinį vėdinamos sienos fragmento su šilumai laidžiomis jungtimis modelį. Sienos modelio geometrinis vaizdas pateiktas 2.1 paveikslėlyje. Sienos fragmento matmenys parenkami pagal bandymo įrangos – „karštosios dėžės“ (1.8 pav.) pertvaros angos matmenis, į kurią montuojamas bandinys: aukštis 2050 mm; plotis 1800 mm. Sienos fragmento storis kinta priklausomai nuo termoizoliacinio sluoksnio storio parinkimo – nuo 282 mm iki 382 mm. Siekiant išvengti papildomų šoninių šilumos nuostolių, visi bandinio pakraščiai yra papildomai izoliuojami 50 mm storio EPS termoizoliaciniu sluoksniu. Parinktos dažniausiai praktikoje naudojamos „L“ formos šilumai laidžios jungtys, kurios tvirtinamos prie laikančiojo konstrukcijos sluoksnio, ir, naudojant aliuminio lydinio kampinį profilį, prie jungčių tvirtinamas išorinis apdailos sluoksnis. Tarp šilumai laidžių jungčių ir laikančiojo pagrindo sluoksnio visais atvejais buvo įrengtos mažai šilumai laidžios 3 mm storio PVC tarpinės, kurių matmenys atitinka „L“ formos jungčių lentynų matmenis – 50 × 100 mm.

„Karštojoje dėžėje“ buvo matuojami sienos fragmentai su nevėdinamu oro tarpu, kadangi vėdinamo oro tarpo šioje įrangoje sukurti negalima. Taigi sukurtas

uždaras oro tarpas, kuriame vyksta konvekcija. Imituojant analogiškus sienos fragmentus kompiuterine programa HEAT3 oro tarpas buvo sukuriamas kaip medžiaga, kurios šilumos laidumo koeficientas buvo apskaičiuotas pagal temperatūrų skirtumą, gautą eksperimentinių matavimų metu. Tyrimas nebuvo orientuotas į fasadų sistemų oro tarpų vėdinimo pobūdžio atitikimą realiomis gyvenimo sąlygomis. Oro tarpo vėdinimas nekeičia pagrindinių šilumos srauto priklausomybių per termoizoliacines sistemas su šilumai laidžiomis jungtimis. Pagal standarto EN 6946 (2017) reikalavimus apytikslė skaičiavimo procedūra taikoma fasadų sistemoms be oro tarpų, taip pat su vėdinamais ar nevėdinamais oro tarpais. Oro tarpo buvimas ar nebuvimas ir jo vėdinimas vertinamas apskaičiuojant šilumos perdavimo koeficientą be jungčių U_0 , o jo poveikis šilumos perdavimo pataisai ΔU_c įvertinamas apskaičiuojant atitvaros elementų suminę šiluminę varžą be šiluminių tiltelių R_{tot} .



2.1 pav. Sienos su šilumai laidžiomis jungtimis fragmentas: a) 3D modelio vaizdas; b) modelio vaizdas iš viršaus ir iš šono (žymėjimai 1–7 pateikti 2.1 lentelėje)

2.2.2. Medžiagos

Sienos fragmento modeliui sukurti parinktos medžiagos pateiktos 2.1 lentelėje. Šioje lentelėje pateikiamų medžiagų eiliškumas atitinka 2.1 b paveikslėlio žymenis.

2.1 lentelė. Išorinės vėdinamos sienos su šilumai laidžiomis jungtimis geometrinio modelio medžiagos

Eil. Nr.	Medžiagos pavadinimas	Storis, mm	Šilumos laidumo koeficientas $\lambda, W / (m \cdot K)$
1.	Cemento-drožlių plokštė	24	0,27
2.	Termoizoliaciniai sluoksniai: EPS / MV	100	0,031 / 0,034
3.	Oro tarpas	50	0,144
4.	Aliuminio lydinio tvirtinimo profilis	3	160
5.	„L“ formos šilumai laidžios jungtys: aliuminio lydinio / plieno / nerūdijančio plieno / stiklo tekstolito	3	220 / 50 / 17 / 0,23
6.	Cemento-drožlių plokštė	8	0,27
7.	Plieniniai varžtai	Ø6	50

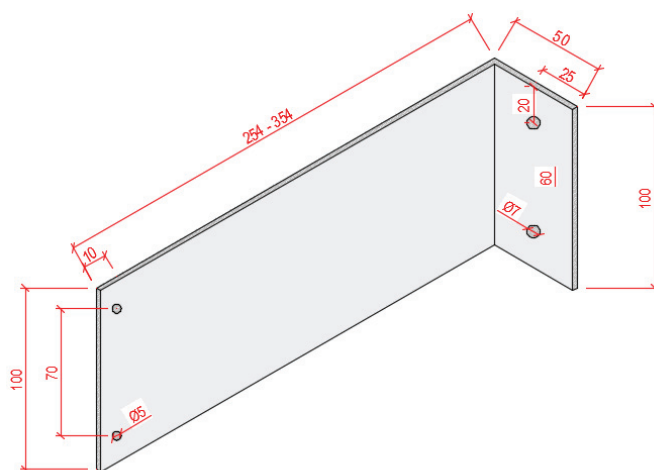
Sienos fragmento modeliui sukurti buvo panaudotos devynios kiekvienos rūšies „L“ formos jungtys, trys vertikaliai tvirtinti „L“ formos aliuminio lydinio profiliai ir plieniniai varžtai elementų tarpusavio sujungimui.

Termoizoliacinės medžiagos

Tyrimai buvo atlikti su dviejų storių termoizoliaciniais sluoksniais: 200 mm ir 300 mm. Reikiamo storio termoizoliaciniais sluoksniais formuoti buvo parinktos dvi medžiagos: pilkasis polistireninis putplastis (EPS), kurio nustatytas šilumos laidumo koeficientas $0,031 W / (m \cdot K)$, ir mineralinė vata (MV), kurios šilumos laidumo koeficientas $0,034 W / (m \cdot K)$. Šios dvi termoizoliacinės medžiagos parinktos ne tik dėl skirtingų šilumos laidumo koeficientų verčių, tačiau ir dėl skirtingų oro pralaidumo savybių. Mineralinė vata yra pluoštinė, lengvai suspaudžiama medžiaga, todėl tyrimams buvo pasirinkta mineralinė vata, kurios oro pralaidumo vertė nustatyta $42 \cdot 10^{-6} m^3 / (m \cdot s \cdot Pa)$. Nors tyrimams pasirinkta kieta mineralinė vata, tačiau pilkasis polistireninis putplastis yra net daugiau kaip šimtą kartų mažiau pralaidi orui medžiaga nei mineralinė vata. Parinktų termoizoliacinių medžiagų savybės padeda išvengti arba kiek įmanoma sumažinti konvekcijos poveikį. Abiejų naudotų termoizoliacinių medžiagų plokštės buvo 100 mm storio ir, panaudojant atitinkamai du arba tris plokščių sluoksnius, buvo gaunamas reikiamas bendras termoizoliacinis sluoksnis.

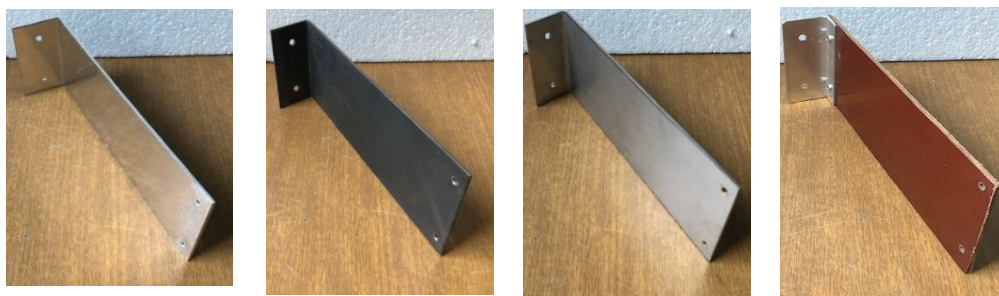
Šilumai laidžios jungtys

Laikantieji „L“ formos elementai buvo pagaminti iš keturių skirtingų medžiagų lakštų: aliuminio lydinio ($\lambda = 220 W / (m \cdot K)$), plieno ($\lambda = 50 W / (m \cdot K)$), nerūdijančio plieno ($\lambda = 17 W / (m \cdot K)$) ir stiklo tekstolito ($\lambda = 0,23 W / (m \cdot K)$). Pagal paruoštą schemą (2.2 pav.) buvo išpjautos dviejų reikiamų ilgių plokštės, jos sulenktos ir išgręžtos reikiamo skersmens skylės tvirtinimo varžtams.



2.2 pav. „L“ formos tvirtinimo elementų paruošimo schema

Visų jungčių matmenys parinkti vienodi: storis – 3 mm, aukštis – 100 mm, lentynos ilgis 50 mm. Tvirtinimo elementų vaizdai matomi 2.3 paveikslėlyje. Stiklo tekstolito jungtis buvo pagaminta kaip kompozitinė, panaudojant „L“ formos aliuminio lydinio kampuočius, kurie pritvirtinti prie ilgųjų jungčių dalių ir atitinka jungčių lentynas. Aliuminio lydinio kampuočių matmenys 40 × 20 mm, storis – 2 mm.



(a)

(b)

(c)

(d)

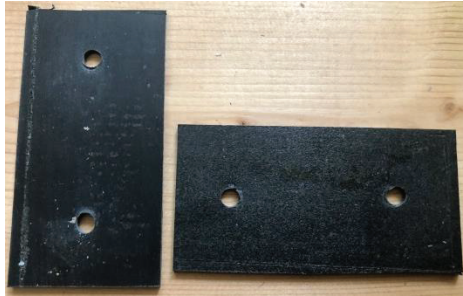
2.3 pav. „L“ formos tvirtinimo elementų vaizdai: a) aliuminio lydinio jungtis; b) plieninė jungtis; c) nerūdijančio plieno jungtis; d) stiklo tekstolito jungtis

Kitos medžiagos

Išoriniam ir vidiniam sienos konstrukcijos sluoksniams buvo parinktos cemento-drožlių plokštės, kurios yra tvirtos ir stabilių matmenų. Plokščių tankis – apie 1350 kg/m^3 .

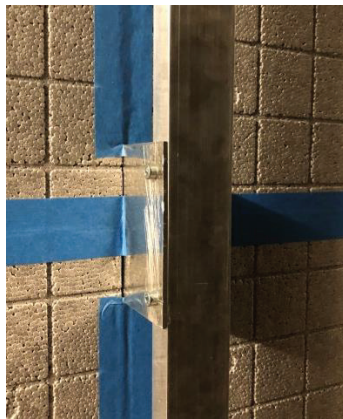
„L“ formos jungtys buvo tvirtinamos prie pagrindo dviem 50 mm ilgio ir 5 mm skersmens plieniniais varžtais. Tarp pagrindo ir jungčių lentynų buvo sumontuotos termoizoliacinės tarpinės, kurių matmenys atitinka jungčių lentynų matmenis: plotis

– 50 mm, aukštis – 100 mm, storis – 3 mm. Tarpinės šilumos laidumo koeficientas – $0,07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Termoizoliacinių tarpinių vaizdas pateiktas 2.4 paveikslėlyje.



2.4 pav. Naudotos termoizoliacinės tarpinės.

Išorinė cemento-drožlių apdailos plokštė tvirtinama aliuminio lydinio kampiniu profiliu, kurio matmenys $20 \times 40 \times 3 \text{ mm}$. Aliuminio profilis ir „L“ formos laikikliai sujungiami 5 mm skersmens ir 16 mm ilgio plieniniais varžtais. Sujungimas pavaizduotas 2.5 paveikslėlyje.



2.5 pav. Aliuminio lydinio profilio tvirtinimo vaizdas

2.2.3. Medžiagų paruošimas

Termoizoliacinių ir kitų medžiagų (išskyrus metalines jungtis, profilius ir varžtus) šilumos laidumo koeficientai buvo nustatyti laboratorijoje standartiniu metodu pagal LST EN 12667 (2002) reikalavimus. Prieš nustatant medžiagų šilumos laidumo koeficientus, buvo paruošti $600 \times 600 \text{ mm}$ matmenų bandiniai. Paruošti bandiniai mažiausiai 48 valandas išlaikyti $23 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros ir 55 % santykinio drėgnumo aplinkoje. Po išlaikymo bandiniai buvo montuojami į vieno bandinio simetrinį šilumos srauto matuoklį, kurio žymuo Nr. 1/99 pagal ISO 8301 (1991). Bandymų metų palaikoma apie $10 \text{ }^\circ\text{C}$ vidutinė bandinio temperatūra ir sukuriama apie $25 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrų skirtumas tarp bandinių išorinio ir vidinio (šaltosios ir karštosios matuoklio plokščių). Taip buvo nustatyti daugumos naudotų medžiagų šilumos laidumo koeficientai. Detalūs medžiagų šiluminių savybių matavimų duomenys

pateikiami 1 priede. Metalinių jungčių, profilių ir varžtų šilumos laidumo koeficientų vertės priimtos gamintojų deklaracijose pateiktos vertės.

Statinio oro srauto metodu pagal standarto LST EN ISO 9053-1 (2019) reikalavimus buvo nustatyta termoizoliacinių medžiagų – pilkojo polistireninio putplasčio ir mineralinės akmens vatos – orinio laidumo vertės. Pilkojo polistireninio putplasčio orinio laidumo vertė – $3,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, akmens vatos – $41,86 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

2.2.4. Eksperimentinių tyrimų eiga

Eksperimentiniams tyrimams parinktas medžiagas išlaikius laboratorinėmis sąlygomis ir standartiniais metodais išmatavus jų šiluminės techninės charakteristikas buvo montuojami sienų fragmentai „karštosios dėžės“ pertvaros angoje, kurios matmenys – $1800 \times 2050 \text{ mm}$, kuri matoma 2.6 (a) paveikslėlyje. Angos kraštai papildomai izoliuoti 50 mm storio polistireninio putplasčio sluoksniu, siekiant sumažinti angokraščio šiluminius nuostolius. Į paruoštą pertvaros angą buvo montuojami sienos fragmentų sluoksniai. Pirmiausiai buvo pritvirtinamas laikantysis pagrindo sluoksnis – 24 mm storio cemento-drožlių plokštė (2.6 (b) pav.). Šis sluoksnis buvo tvirtai ir standžiai pritvirtintas, kadangi keičiant kitus sienų fragmentų sluoksnius pagrindo sluoksnis nebuvo išmontuojamas.



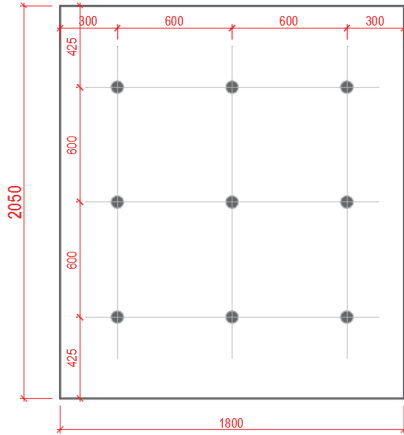
(a)



(b)

2.6 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) papildomai izoliuota pertvaros anga; b) cemento-drožlių plokštės pritvirtinimas

Pagal paruoštą schemą (2.7 (a) pav.) prie pagrindo sluoksnio per termoizoliacines tarpines buvo tvirtinamos „L“ formos jungtys (2.7 (b) pav.).

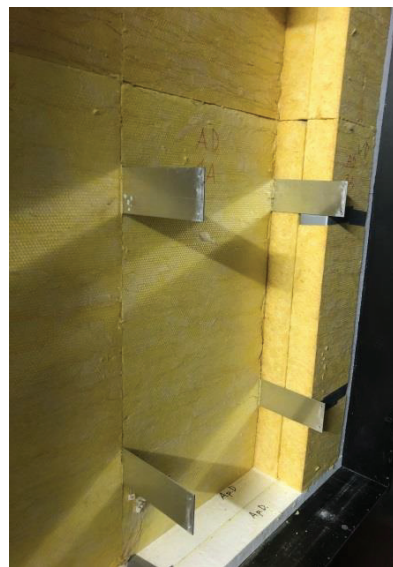
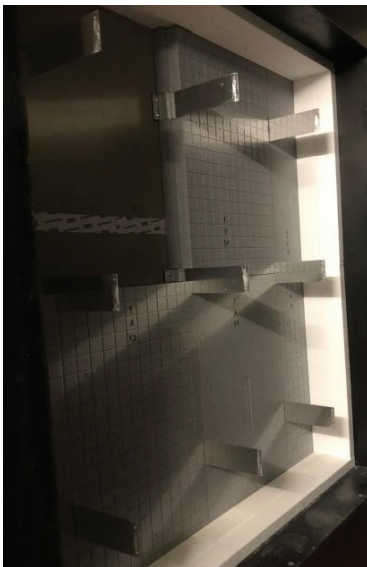


(a)

(b)

2.7 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) jungčių išdėstymo schema; b) jungčių tvirtinimas prie pagrindo sluoksnio

Pritvirtinus jungtis buvo montuojamos 100 mm storio termoizoliacinių medžiagų plokštės. Atitinkamai pagal tiriamo sienos fragmento termoizoliacinio sluoksnio storį buvo montuojami du arba trys termoizoliacinės medžiagos sluoksniai (2.8 pav.).



(a)

(b)

2.8 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) pirmo sluoksnio polistireninio putplasčio plokščių montavimas; b) trijų sluoksnių mineralinės vatos montavimas

Įrengus reikiamo storio termoizoliacinį sluoksnį, prie jungčių buvo tvirtinami vertikalūs aliuminio lydinio profiliai (2.9 (a) pav.), o prie šių profilių tvirtinama 8 mm storio išorinė apdailos plokštė (cemento-drožlių) (2.9 (b) pav.).



(a)



(b)

2.9 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) aliuminio lydinio profilių tvirtinimas;
b) išorinės apdailos plokštės tvirtinimas

Montuojant sienos fragmento elementus buvo užkljuojami temperatūros jutikliai (termoporos): ant išorinio termoizoliacinio sluoksnio paviršiaus (2.10 (a) pav.), ant išorinės apdailos plokštės išorinio paviršiaus (2.10 (b) pav.), ant pagrindo sluoksnio išorinės pusės (2.10 (c) pav.). Papildomos termoporos taip pat įrengtos šalia šilumai laidžios jungties (3.2 pav.), siekiant detaliau išanalizuoti temperatūrinį lauką šioje srityje ir palyginti jį su skaitiniais tyrimais gaunamu temperatūros pasiskirstymu. Eksperimentinių matavimų metu naudotos „T“ tipo (vario-konstantano) termoporos, kurių paklaida – didesnė iš 0,5 °C arba 0,4 %. Duomenų surinkimas vykdytas naudojant duomenų kaupiklius „Keithly 2750“.



(a)



(b)



(c)

2.10 pav. Sienos fragmento įrengimas: a) termoporų išdėstymas ant termoizoliacinio sluoksnio paviršiaus; b) termoporų išdėstymas ant išorinės apdailos plokštės paviršiaus; c) termoporų išdėstymas ant pagrindo sluoksnio paviršiaus

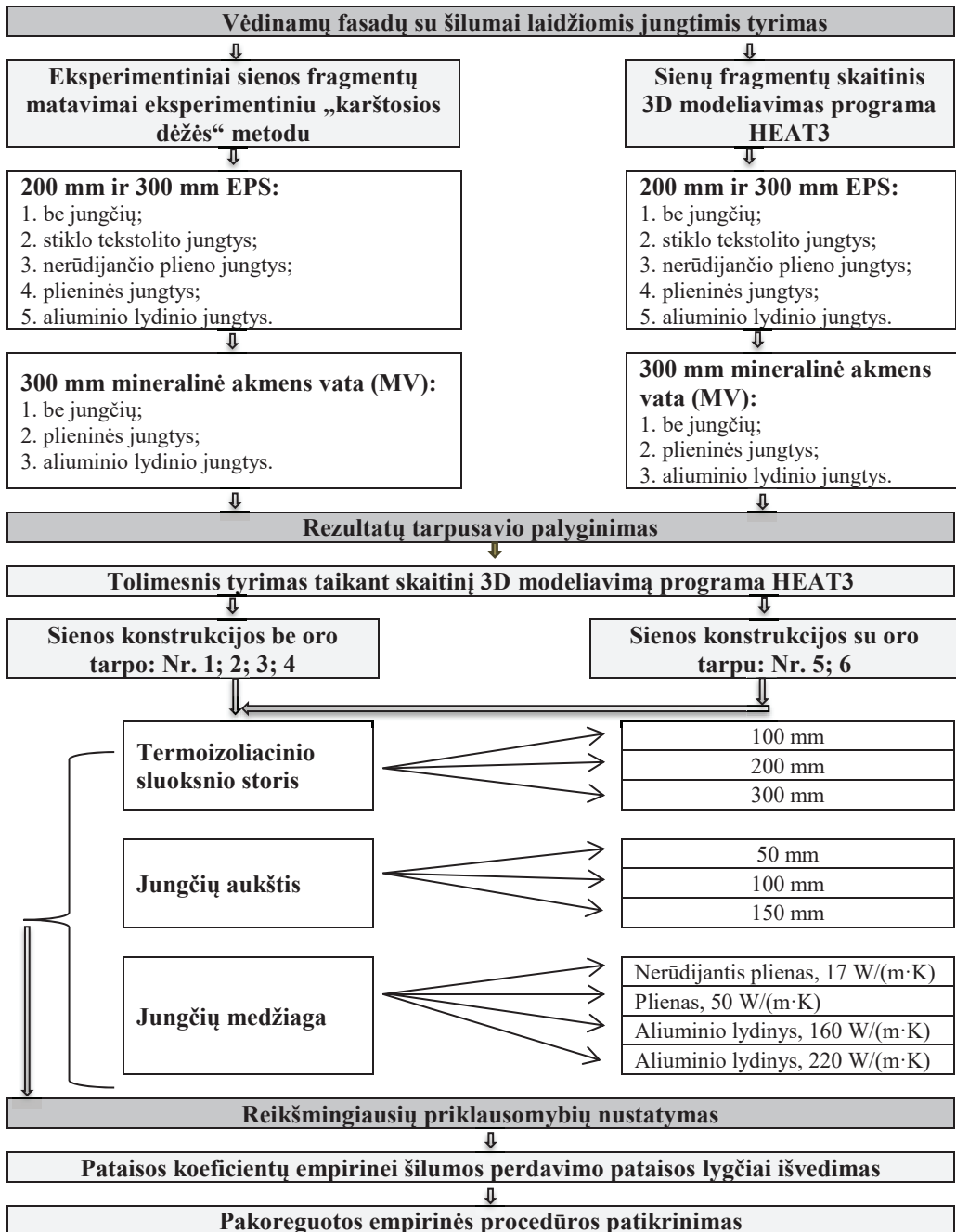
Sumontavus visus sienos fragmento elementus „karštosios dėžės“ pertvaros angoje, pertvara buvo įstatyta tarp karštosios ir šaltosios kamerų ir, nustačius reikiamas aplinkos sąlygas, pradedamas konstrukcijos matavimas. Po matavimo buvo nuimamas išorinės apdailos sluoksnis, pakeičiami reikiami elementai (termoizoliacinio sluoksnio medžiaga arba jungtys) ir atliekamas naujas matavimas. Tokiu būdu buvo atlikti visų suplanuotų sienos fragmentų variantų matavimai.

2.3. Tyrimo sąlygos

Eksperimentiniai ir skaitinio modeliavimo sienos fragmento su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimai atlikti stacionariomis sąlygomis. Temperatūros režimas buvo nustatytas 20 °C vidinėje konstrukcijos pusėje ir 0 °C išorinėje konstrukcijos pusėje. Matuojant konstrukcijas „karštojoje dėžėje“, šaltosios pusės temperatūra dažniausiai nustatoma 0 °C. Ši 0 °C išorės temperatūra yra artima vidutinei šildymo sezono temperatūrai, o matavimo metu vidutinė bandinio temperatūra tampa +10 °C, kas atitinka šilumos srauto matuoklyje naudojamas sąlygas, nustatant medžiagų šilumos laidumą. Siekiant įvertinti didesnio temperatūrinio skirtumo įtaką sienos fragmento šilumos perdavimui, vienas fragmentas buvo išmatuotas temperatūros režimui esant -15 °C ir 20 °C. Aplinkos sąlygos laboratorijoje buvo išlaikomos pastovios: temperatūra 23±2 °C, santykinis drėgnumas 50±5 %. Skaičiuojant eksperimentiniu ir skaitinio modeliavimo metodais tirtų sienos fragmentų šilumos perdavimo koeficiento vertes buvo naudojamos standartinės paviršinių šiluminių varžų vertės: vidinio paviršiaus – 0,13 m²·K/W, išorinio paviršiaus – 0,04 m²·K/W.

2.4. Grafinis tyrimo algoritmas

Vėdinamų fasadų sistemų su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimas buvo atliekamas pagal sudarytą algoritmą, kuris pateikiamas 2.11 paveikslėlyje.



2.11 pav. Tyrimų grafinis algoritmas

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Vėdinamų fasadų su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimui panaudotos metalinės stačiakampio formos jungtys, kurių poveikio šilumos perdavimui vertinimo skirtumai didžiausi.

2. Tiriamųjų sienų fragmentų matmenys ir jungčių išdėstymas atitinka šių sistemų naudojimą praktiką ir eliminuoja šilumos mainus tarp gretutinių jungčių.

3. Tiriamųjų fragmentų termoizoliaciniam sluoksniams panaudotos mineralinės vatos ir polistireninio putplasčio plokštės, siekiant ištirti skirtingo jungties kontakto su termoizoliacine medžiaga įtaką tyrimo rezultatams.

4. Atitvarų fragmentų eksperimentinio šilumos perdavimo koeficiento matavimo metu šalia jungčių buvo įrengtos termoporos, kurios suteikė papildomų duomenų temperatūrinio lauko šalia jungčių analizei.

3. REZULTATAI

3.1. Skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių matavimų rezultatų sulyginamoji analizė

Kadangi vėdinamų fasadų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo vertinimo praktika parodė, jog skirtingais metodais gaunami žymūs šilumos perdavimo koeficientų skirtumai, pirmiausiai buvo palyginti eksperimentiniu „karštosios dėžės“ ir 3D skaitinio modeliavimo metodais gauti sienų fragmentų šilumos perdavimo koeficientai. Siekiant išsamiau išanalizuoti galimų skirtumų priežastis, palyginti ne tik šilumos perdavimo koeficientų, bet ir temperatūrinių laukų pokyčius, sienų fragmentuose šalia šilumai laidžių jungčių termoporomis išmatuotos ir 3D programa apskaičiuotos dvylikos taškų temperatūros.

3.1.1. Išmatuotų ir apskaičiuotų sienų fragmentų šilumos perdavimo koeficientų palyginimas

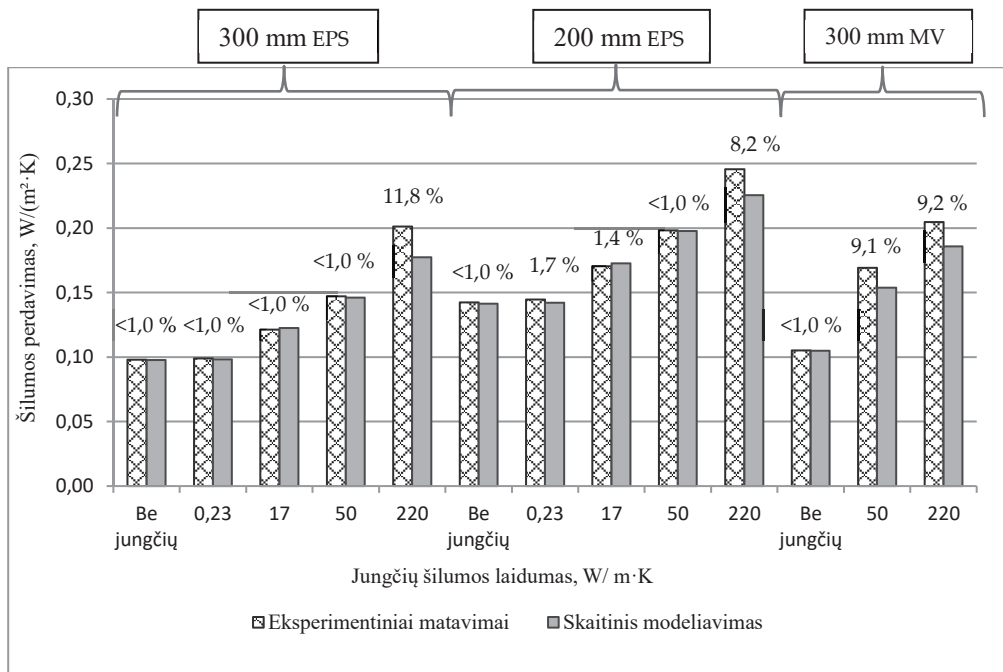
Eksperimentiniams matavimams paruošti sienų konstrukcijų fragmentai buvo sumontuoti „karštosios dėžės“ pertvareje, kuri įstatoma tarp šaltosios ir karštosios kamerų. Temperatūrinis režimas aprašytas 2.3. skyriuje. Kadangi sienų fragmentų bandiniai buvo masyvūs, bandymo trukmė siekdavo 120–144 valandas. Pirmieji rezultatai buvo fiksuojami po 24 arba 48 valandų, vėliau kas 24 valandas fiksuojami pakartotinai, kol registruojami duomenys nebekisdavo arba kisdavo labai nežymiai (matavimo paklaidų ribose).

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti su dviejų rūšių termoizoliacinėmis medžiagomis – pilkuoju polistireniniu putplasčiu (EPS) ir mineraline vata (MV). Pirmieji matavimai buvo atlikti panaudojant 300 mm storio EPS sluoksnį ir visų rūšių jungtis (jungčių aprašymas pateiktas 2.2.2. skyriuje), vėlesni matavimai – su 200 mm storio EPS sluoksniu ir visų rūšių jungtimis, paskutiniai matavimai – su 300 mm MV sluoksniu ir plieninėmis bei aliuminio lydinio jungtimis. Kadangi atliekant sienų fragmentų eksperimentinius ir skaitinius tyrimus su EPS medžiaga ir stiklo tekstolito bei nerūdijančio plieno jungtimis gauti minimalūs skirtumai tarp metodų, buvo nuspręsta sienų fragmentus su mineraline vata išbandyti tik su didžiausio šiluminio laidumo aliuminio lydinio ir plieninėmis jungtimis. „Karštosios dėžės“ ir 3D skaitinio modeliavimo metodais gauti sienų fragmentų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Sienų fragmentų su įvairių charakteristikų šiluminiais sluoksniais ir juos kertančiomis skirtingo šiluminio laidumo jungtimis šilumos perdavimo skaičiavimų ir matavimų rezultatai

Jungčių medžiaga	„Karštosios dėžės“ metodas				Skaitinio modeliavimo metodas			
	Φ , W	U, W/(m ² ·K)	χ , W/K	ΔU , W/(m ² ·K)	Φ , W	U, W/(m ² ·K)	χ , W/K	ΔU , W/(m ² ·K)
300 mm EPS								
Be jungčių	7,224	0,0979	-	-	7,203	0,0976	-	-
Stiklo tekstolitas	7,296	0,0989	0,0004	0,0010	7,237	0,0981	0,0002	0,0005
Nerūd. plienas	8,953	0,1213	0,0096	0,0234	9,032	0,1224	0,0102	0,0248
Plienas	10,851	0,1470	0,0202	0,0491	10,775	0,1460	0,0198	0,0484
Aliuminio lydinys	14,835	0,2010	0,0423	0,1031	13,082	0,1773	0,0327	0,0797
200 mm EPS								
Be jungčių	10,512	0,1424	-	-	10,438	0,1414	-	-
Stiklo tekstolitas	10,676	0,1447	0,0009	0,0022	10,492	0,1422	0,0003	0,0007
Nerūd. plienas	12,568	0,1703	0,0114	0,0279	12,745	0,1727	0,0128	0,0313
Plienas	14,615	0,1980	0,0228	0,0556	14,595	0,1978	0,0231	0,0563
Aliuminio lydinys	18,115	0,2455	0,0422	0,1030	16,633	0,2254	0,0344	0,0839
300 mm MV								
Be jungčių	7,756	0,1051	-	-	7,743	0,1049	-	-
Plienas	12,476	0,1691	0,0262	0,0640	11,338	0,1536	0,0200	0,0487
Aliuminio lydinys	15,102	0,2046	0,0408	0,0995	13,707	0,1857	0,0331	0,0808

Siekiant palyginti skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių matavimų rezultatus, 3D skaitinio modeliavimo programoje sienų fragmentų oro tarpai buvo vertinami kaip nevėdinami. Oro tarpo sluoksnis buvo sukurtas kaip medžiagos sluoksnis, kurio šilumos laidumo koeficientas buvo apskaičiuotas naudojant eksperimentų metu temperatūros jutikliais išmatuotas sienos fragmento paviršių temperatūros ir šilumos srauto vertes. Tokiu būdu, vertinant jungčių poveikį šilumos perdavimui per sienos fragmentą, 3D skaitinio modeliavimo programa buvo sukurtos oro tarpo sąlygos kaip įmanoma panašesnės į eksperimentines. Eksperimentinių matavimų ir skaitinio modeliavimo rezultatų palyginimas visais atvejais patvirtino skaitinio modeliavimo metodo patikimumą. Eksperimentinių matavimų ir skaitinio modeliavimo metodais gautų išorinės sienos bandinių šilumos perdavimo koeficientų verčių palyginimas pateiktas 3.1 pav.



3.1 pav. Eksperimentiniu ir skaitiniu metodu gautų šilumos perdavimo verčių palyginimas

Palyginus rezultatus matoma, kad 11,8 % yra didžiausias šilumos perdavimo skirtumas, gaunamas naudojant aliuminio lydinio jungtis, kurių šilumos laidumas yra daugiau kaip 7000 kartų didesnis nei termoizoliacinio EPS sluoksnio. Skaitinio modeliavimo metodu yra sukuriama idealus sienos fragmento su termoizoliacinį sluoksnį kertančiomis jungtimis atvejis, kai visų jungčių paviršius turi idealų kontaktą su termoizoliaciniu sluoksniu. Atliekant eksperimentinius matavimus tokio idealaus sukibimo užtikrinti praktiškai neįmanoma, kadangi tarp jungčių ir termoizoliacinio sluoksnio susidaro mikro tarpeliai, kurie daro poveikį šilumos mainams ir lemia atsirandančius skirtumus tarp eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo metodais gaunamų rezultatų.

3.1 paveikslėlyje pateiktas rezultatų palyginimas taip pat parodė, kad dauguma atsirandančių skirtumų tarp eksperimentinių ir teorinių šilumos perdavimo koeficientų verčių patenka į matavimo prietaisų neapibrėžčių ribas. Apskaičiuotos matavimų išplėstinių neapibrėžčių vertės patenka į šiuos intervalus: 1,69–2,46 % sienų fragmentams su 300 mm storio EPS sluoksniu; 1,64–1,92 % sienų fragmentams su 200 mm storio EPS sluoksniu; 1,72–2,23 % sienų fragmentams su 300 mm storio MV sluoksniu.

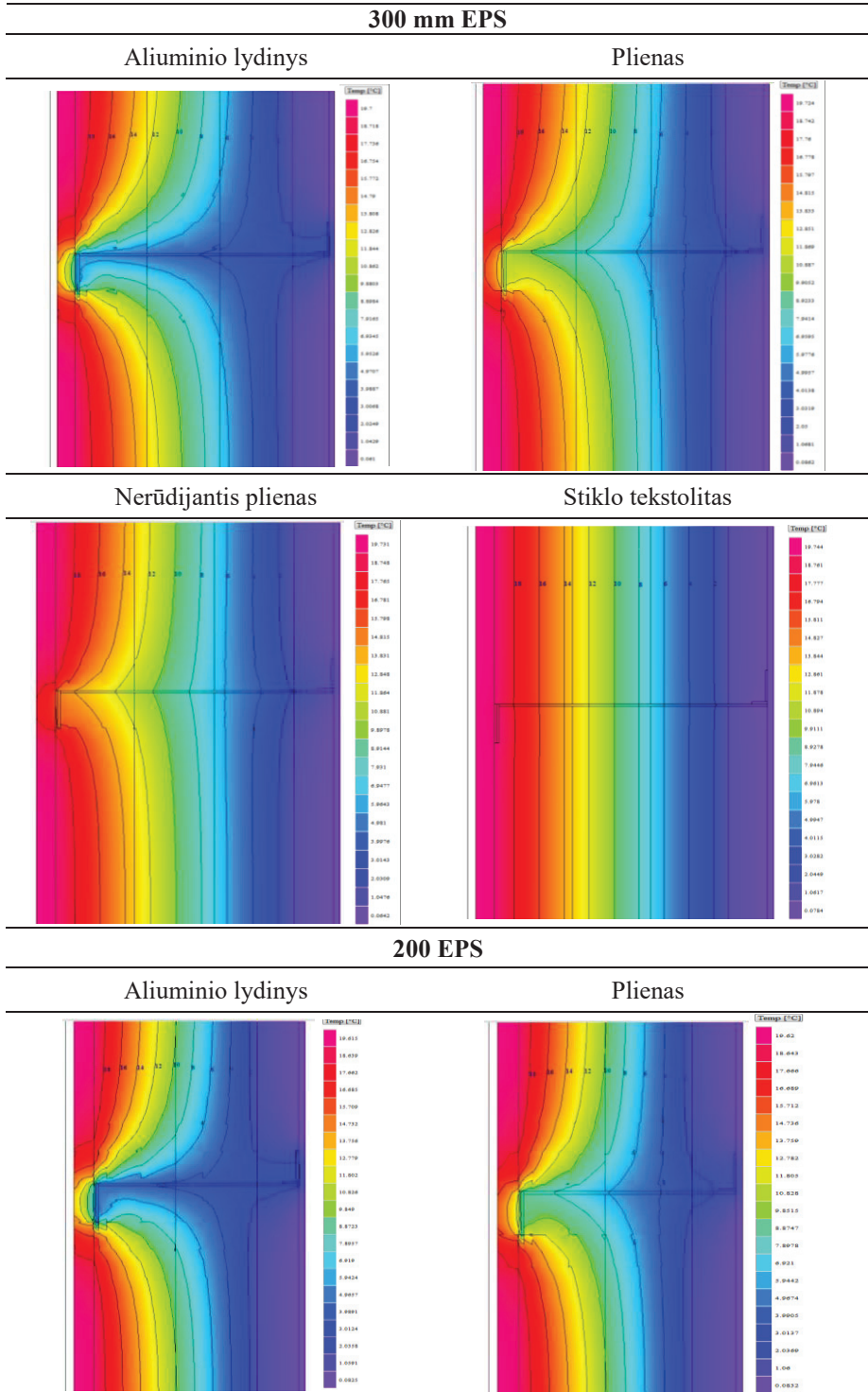
Mažesni rezultatų neatitikimai pastebimi, kai sienos fragmentams buvo naudojama MV šiltinantis sluoksnis, kadangi ši medžiaga, palyginus su EPS, leidžia užtikrinti geresnį kontaktą su šilumai laidžių jungčių paviršiumi. Visgi MV pasižymi mažesniu struktūros homogeniškumu nei EPS, o tai irgi turi poveikį galutiniam matavimų rezultatui. Kontakto tarp jungčių paviršiaus ir šilumos izoliacijos įtaką matuojamo sienos fragmento šilumos perdavimo koeficientui patvirtina ir tai, kad didesni skirtumai buvo gauti tuomet, kai buvo matuojami bandiniai su storesniu termoizoliaciniu sluoksniu, atitinkamai ir su ilgesnėmis jungtimis.

Remiantis eksperimentinio ir skaitinio metodų palyginimo rezultatais nustatyta, kad jungčių, kurių šilumos laidumo koeficientas itin žemas ir panašus į plastiko, įtaka šilumos perdavimui per vėdinamą sienos konstrukciją gali būti nevertinama. Atsižvelgiant į tai, kad išmatuotos ir apskaičiuotos sienų be jungčių šilumos perdavimo koeficiento vertės skiriasi ne daugiau kaip 1 %, galima teigti, jog eksperimentiškai išmatuotos ir skaitiniu metodu apskaičiuotos sienų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficientų vertės yra lygiavertės, naudojant jas pastatų šilumos nuostolių vertinimo praktikoje. Be to, šio tyrimo rezultatai parodė, kad termoizoliacinių medžiagų struktūros ir šiluminio laidumo skirtumai nedaro reikšmingo poveikio šilumos perdavimui per sienų konstrukcijas su šilumai laidžiomis jungtimis. Reikšmingo poveikio fasado konstrukcijos šiluminei varžai neturi ir temperatūros skirtumas. Atlikus sienos fragmento su 300 mm MV sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis eksperimentinius matavimus dviejuose temperatūros režimuose (0 °C / 20 °C ir -15 °C / 20 °C), buvo gautas 2 % skirtumas tarp šiluminės varžos verčių. Nors tyrimas nebuvo orientuotas į fasadų sistemų oro tarpų vėdinimo pobūdžio palyginimą su realiomis sąlygomis, buvo žinoma, kad vėdinamas ir nevėdinamas oro tarpas turi skirtingos įtakos galutiniam sienos fragmento šilumos perdavimo rezultatui. Siekiant palyginti vėdinamo ir nevėdinamo oro tarpo įtaką galutiniam rezultatui, vienas sienos fragmentas (300 mm EPS su aliuminio lydinio jungtimis) buvo išmatuotas be išorinio apdailos sluoksniu (8 mm cemento-drožlių plokštės). Tokiu būdu „karštojoje dėžėje“ buvo imituojamas vėdinamas oro tarpas. Išmatuota sienos fragmento su nevėdinamu oro tarpu šiluminė varža $R = 4,7791 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, su vėdinamu oro tarpu – $R = 4,3754 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Taigi, skirtumas tarp verčių yra apie 8 %. Oro tarpo vėdinimas nekeičia pagrindinių šilumos srauto priklausomybių per termoizoliacines sistemas su šilumai laidžiomis jungtimis. Pagal standarto EN 6946 (2017) reikalavimus, apytikslė procedūra taikoma fasadų sistemoms be oro tarpų, taip pat su vėdinamais ar nevėdinamais oro tarpais. Oro tarpo buvimas ar nebuvimas ir jo vėdinimo pobūdis vertinamas apskaičiuojant konstrukcijos be jungčių šilumos perdavimo koeficientą U_0 (2). Poveikis ΔU_c įvertinamas apskaičiuojant R_{tot} (3). Taigi, remiantis šio tyrimo rezultatais buvo nuspręsta tolimesnius vėdinamų sienų fragmentų tyrimus atlikti skaitinio modeliavimo metodu, panaudojant EPS apšiltinimo sluoksnį ir 0 °C / 20 °C temperatūros režimą.

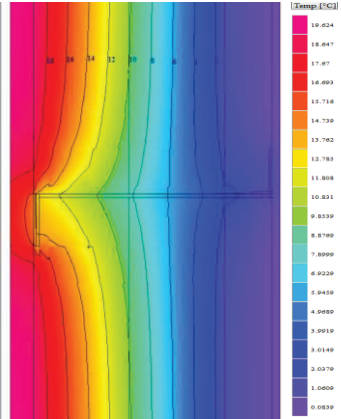
3.1.2. Temperatūrinių laukų apie jungtis palyginimas

Nors sienų fragmentų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficientų vertės, nustatytos eksperimentiniu „karštosios dėžės“ ir 3D skaitinio modeliavimo metodais, skyrėsi nežymiai, buvo nuspręsta palyginti temperatūrinių laukų, nustatytų abiem metodais, pokyčius dėl jungčių poveikio. Temperatūros pasiskirstymas sienos konstrukcijoje apie jungtis žymiai skiriasi naudojant skirtingo šiluminio laidumo jungtis. 3D skaitinio modeliavimo rezultatai padėjo atlikti vaizdžią temperatūros pasiskirstymo aplink sienų konstrukcijose esančias jungtis analizę. Lentelėje 3.2 pateikiami analizuotų sienos konstrukcijų temperatūros laukai aplink „L“ formos jungtis.

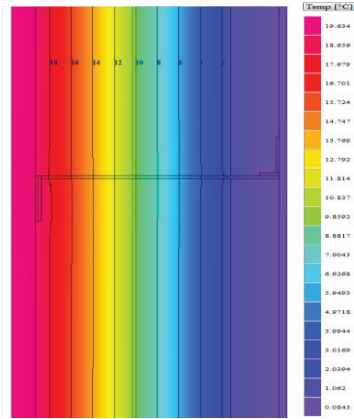
3.2 lentelė. Temperatūros laukai sienų fragmentuose aplink šilumai laidžias jungtis



Nerūdijantis plienas

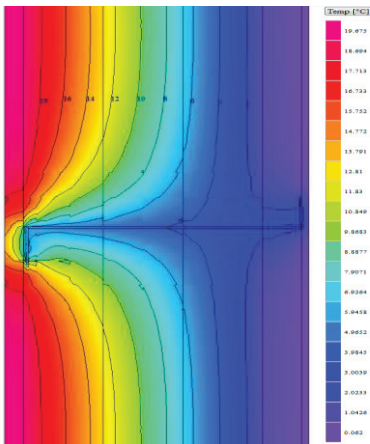


Stiklo tekstolitas

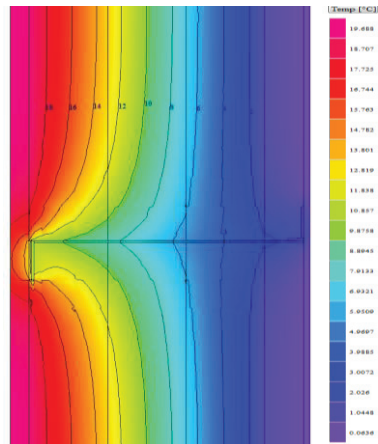


300 MV

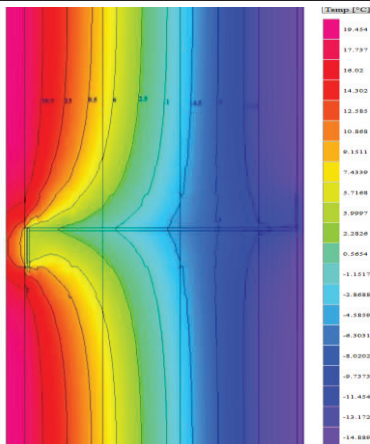
Aluminio lydinys



Plienas

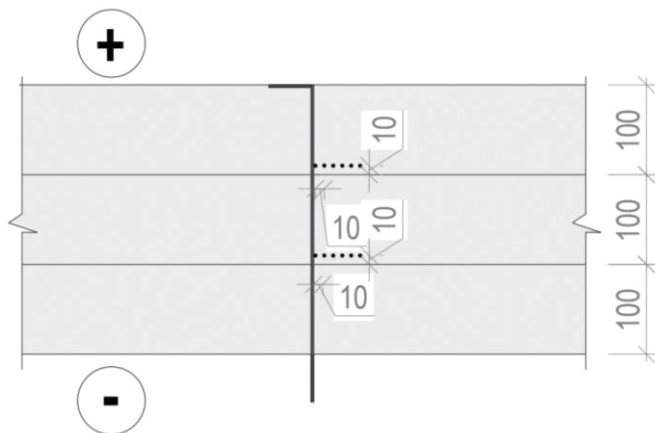


Plienas (-15°C/20°C)



Grafinis temperatūrinio lauko pavaizdavimas aplink konstrukcijų termoizoliacinius sluoksnius kertančias jungtis parodė akivaizdžius skirtumus, kurie priklauso nuo jungčių šiluminio laidumo. Pastebėta, kad kuo didesnio šiluminio laidumo jungtys naudojamos, tuo labiau tolygus temperatūros laukas yra iškreipiamas, ir tuo žemesnė temperatūra pasiekia vidinius atitvaros sluoksnius ties jungčių paviršiais. Pavyzdžiui, konstrukcijoje su 300 mm storio EPS sluoksniu naudojant plieno jungtis, temperatūra ties jungties lentyna yra apie 12 °C, o naudojant aliuminio lydinio jungtis, toje pačioje vietoje temperatūra siekia vos 6 °C. Konstrukcijoje su 200 mm storio EPS sluoksniu su atitinkamomis jungtimis temperatūra ties jungties lentyna yra 10 °C ir 5 °C. Nerūdijančio plieno jungtys temperatūros lauką iškreipia nežymiai. Apie itin mažo šiluminio laidumo jungtis, kaip šiuo atveju stiklo tekstolito, temperatūrinis laukas yra tolygus, be žymesnių iškraipymų, todėl galima daryti išvadą, kad tokios jungtys gali būti nevertinamos, nustatant atitvaros šilumos perdavimą.

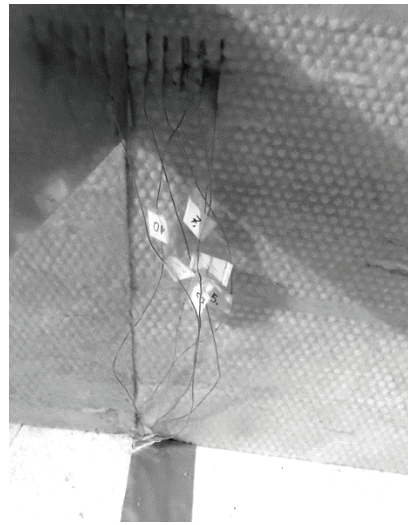
Atliekant sienų fragmentų eksperimentinius tyrimus buvo papildomai matuojama temperatūra dvylikoje taškų šalia tvirtinimo elemento. Šešios papildomos termoporos buvo įrengtos ties 100 mm storio termoizoliaciniu sluoksniu ir kitos šešios papildomos termoporos – ties 200 mm storio termoizoliaciniu sluoksniu. Visos termoporos į termoizoliacinę medžiagą buvo įgilintos apie 10 mm, todėl temperatūra buvo matuojama taškuose ties termoizoliaciniu sluoksniu, kurio storis 90 mm ir 190 mm. Kiekviename sluoksnyje pirmasis temperatūros jutiklis buvo įrengtas greta jungties paviršiaus (50 mm jungties aukštyje), o kitos – kas 10 mm tolyn nuo jungties. Temperatūros jutikliai kiekvienu atveju buvo įrengiami šalia vidurinės, žemiausiai sienos fragmentuose esančios jungties. Papildomų termoporų įrengimo schema ir vietos matomos 3.2 pav.



(a)



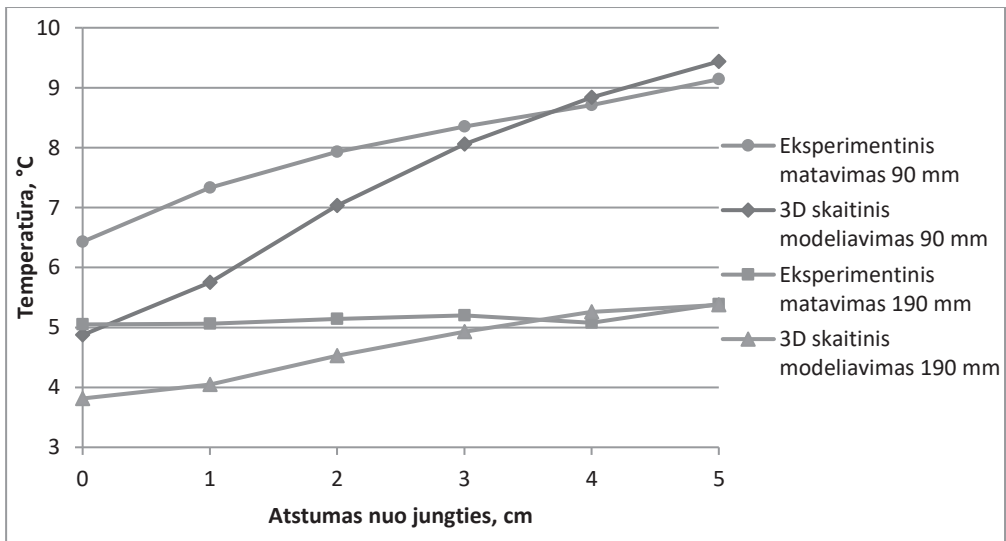
(b)



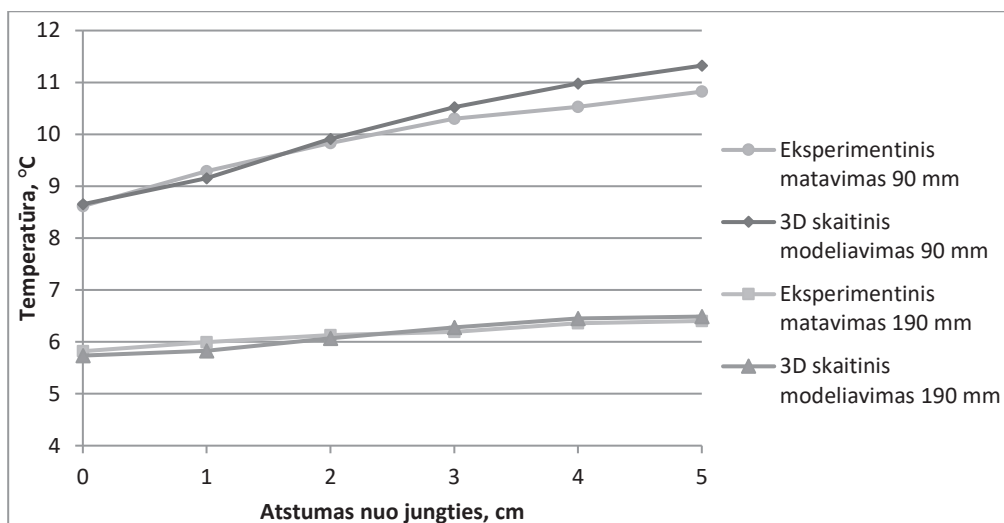
(c)

3.2 pav. Papildomų termoporų įrengimas šalia tvirtinimo elemento: a) termoporų įrengimo schema; b) vaizdas ties 100 mm storio EPS sluoksniu; c) vaizdas ties 100 mm storio MV sluoksniu

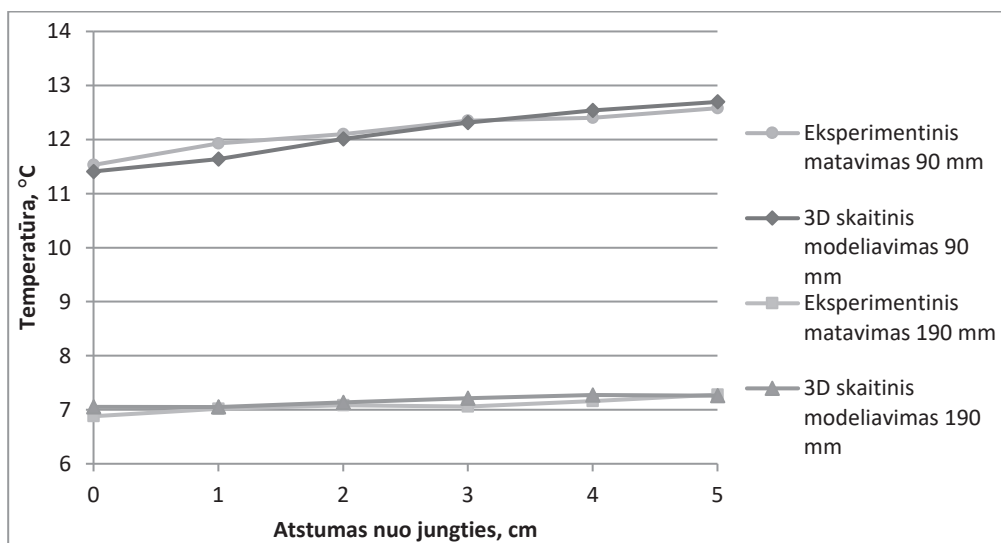
Papildomais temperatūros jutikliais išmatuotos vertės buvo palygintos su temperatūros vertėmis, gautomis 3D skaitinio modeliavimo metodu. Temperatūrų pasiskirstymas parodytas grafiškai 3.3–3.6 pav.



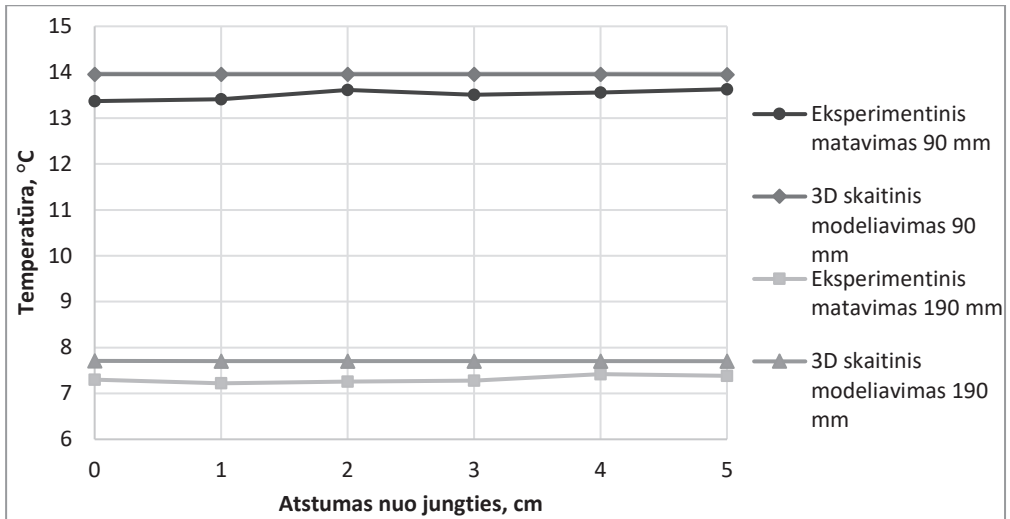
3.3 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis aliuminio lydinio jungtimis



3.4 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis



3.5 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis nerūdijančio plieno jungtimis



3.6 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis stiklo tekstolito jungtimis

Grafinis temperatūrų pavaizdavimas sienų konstrukcijose su 300 mm storio EPS sluoksniu parodė, kad didžiausias temperatūros pokytis per vienoje plokštumoje kas 10 mm išdėstytus temperatūros jutiklius gaunamas konstrukcijoje su aliuminio lydinio jungtimis 90 mm storio termoizoliacinio sluoksniu plokštumoje. Čia temperatūra greta jungties paviršiaus išmatuota 6,4 °C, o 50 mm nuo jungties paviršiaus – 9,1 °C, atitinkamuose taškuose konstrukcijoje su plieninėmis jungtimis – 8,6 °C ir 10,8 °C, konstrukcijoje su nerūdijančio plieno jungtimis atitinkamai – 11,5 °C ir 12,6 °C, konstrukcijoje su stiklo tekstolito jungtimis atitinkamai – 13,4 °C ir 13,6 °C. Taigi kuo šilumai laidesnės jungtys kerta termoizoliacinius sienų konstrukcijų sluoksnius, tuo didesnė šilumos dalis praeina per šias jungtis, ir tuo labiau nukrenta temperatūra šalia jungčių paviršiaus.

Palyginus temperatūrų pokyčius, užfiksuotus įrengtomis papildomomis termoporomis konstrukcijose su 200 mm storio EPS sluoksniu, matomos tos pačios tendencijos kaip ir ankstesnėse konstrukcijose su 300 mm storio EPS sluoksniu. Grafinis temperatūrų palyginimas pateikiamas 3 priede (1–4 pav.). Šiuo atveju šiek tiek žymesnis temperatūrų, nustatytų eksperimentiniu ir 3D skaitinio modeliavimo metodu, nesutapimas matomas ties 190 mm storio EPS. Čia eksperimentiškai išmatuota temperatūra greta plieninės jungties 6,61 °C, o 50 mm atstumu nuo jungties paviršiaus – 8,64 °C, atitinkamuose taškuose 3D skaitinio modeliavimo metodu nustatyta – 6,48 °C ir 9,00 °C temperatūra. Palyginus temperatūras ties 190 mm storio EPS sluoksniu esančia stiklo tekstolito jungtimi, eksperimentiškai išmatuota temperatūra šalia jungties 1,02 °C, o 50 mm atstumu nuo jungties paviršiaus – 0,87 °C, atitinkamuose taškuose 3D skaitinio modeliavimo metodu nustatyta – 2,40 °C ir 2,11 °C temperatūra. Atsiradusius skirtumus tarp temperatūrų labiausiai galėjo lemti

termoporų įrengimo vietų ir skaitinio modeliavimo programoje parenkamų taškų koordinatų neatitikimas.

Temperatūrų, išmatuotų eksperimentiškai ir nustatytų 3D skaitinio modeliavimo programa sienų fragmentuose su 300 mm storio MV sluoksniu šalia aliuminio lydinio ir plieninio tvirtinimo elementų, skirtumai neviršija 1 °C (3 priedas 5–6 pav.). 3 priedo 6 ir 7 paveikslėliuose pavaizduoti temperatūrų pokyčiai konstrukcijose su MV termoizoliaciniu sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis, tačiau pirmuoju atveju konstrukcija buvo tiriama temperatūriniame režime 20 °C / 0 °C, o antruoju – 20 °C / -15 °C. Abiem atvejais temperatūros tuose pačiuose taškuose, nustatytos skirtingais metodais, skiriasi labai nežymiai.

Palyginus temperatūras, išmatuotas eksperimentiškai ir atitinkamuose taškuose gautas 3D skaitinio modeliavimo metodu, matoma, kad visais atvejais skirtumai yra labai nežymūs – iki 2 °C, įvertinant galimas paklaidas, atsirandančias tiek dėl temperatūrinių jutiklių įrengimo vietos tikslumo, tiek dėl pačios matavimo įrangos tikslumo. Eksperimentiniu būdu išmatuotų temperatūrų atitikimas skaitinio modeliavimo metodu nustatytoms temperatūroms tuose pačiuose taškuose taip pat patvirtina skaitinio modeliavimo metodo tinkamumą konstrukcijų šiluminėms savybėms vertinti.

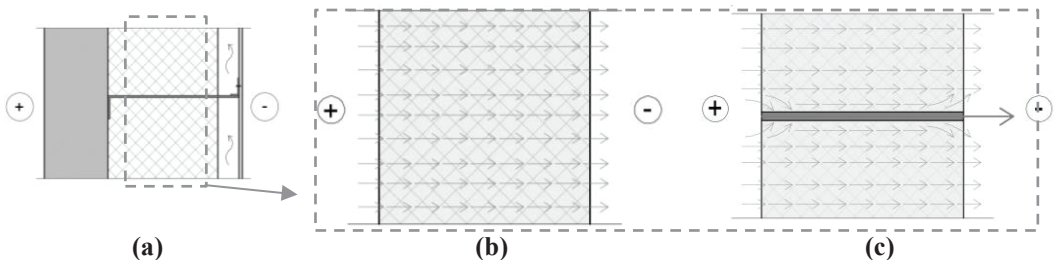
3.2. Apytikslės šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros analizė

3.2.1. Apytikslėje skaičiavimo procedūroje naudojamos lygties fizikinė prasmė

Šilumos perdavimas per sienos konstrukciją su metaliniais tvirtinimo elementais pagal lygtį (1) skaičiuojamas sumuojant šilumos perdavimą konstrukcijos be tvirtinimo elementų ir šilumos perdavimo pataisą ΔU dėl metalinių tvirtinimo elementų poveikio (3.7 pav.), apskaičiuojamą pagal lygtį (2). Šios lygties narys $\frac{\lambda_c \cdot A_c \cdot n_c}{d_1}$ apibūdina šilumos perdavimą per jungtį, kurios plotas yra lygus $A_c \cdot n_c$:

$$\frac{\lambda_c \cdot A_c \cdot n_c}{d_1} = U_c \cdot A_c \cdot n_c. \quad (14)$$

Čia: λ_c – tvirtinimo elementų šilumos laidumo koeficientas ($W/(m \cdot K)$); n_c – tvirtinimo elementų kiekis atitvaros kvadratiniam metre (vnt/m^2); A_c – tvirtinimo elemento skerspjūvio plotas (m^2); d_1 – tvirtinimo elemento ilgis, kertantis termoizoliacinį sluoksnį (m); U_c – šilumos perdavimas per jungtį ($W/(m^2 \cdot K)$).



3.7 pav. Šilumos srautas per termoizoliacinį sluoksnį: a) visa sienos konstrukcija; b) be jungčių; c) su jungtimis

Pagal apytikslę empirinę skaičiavimo procedūrą šilumos perdavimas per metalinę jungtį yra koreguojamas dviem pataisais koeficientais: 0,8 (tuo atveju, kai tvirtinimo elementas kerta šiluminės izoliacijos sluoksnį) ir šiluminių varžų santykiu antrajame laipsnyje $\left(\frac{R_1}{R_{tot}}\right)^2$. Koeficiento 0,8 fizikinė prasmė nėra aiški, kadangi neaišku, kodėl būtent tokia koeficiento vertė taikoma ir kaip ji buvo nustatyta. Galbūt šis koeficientas buvo pritaikytas tam tikrai jungčių geometrinei formai ar medžiagai, tačiau ši informacija nenurodoma nei standarte, nei kitoje literatūroje. Santykis $\left(\frac{R_1}{R_{tot}}\right)^2$ parodo, kaip kinta šilumos perdavimas per tvirtinimo elementą priklausomai nuo termoizoliacinio sluoksnio šiluminės varžos ir visos atitvaros be metalinių jungčių šiluminės varžos santykio antrajame laipsnyje. Šis koeficientas artėja prie 1, kai sienos konstrukcijos termoizoliacinio sluoksnio šiluminės varžos vertė artėja prie konstrukcijos suminės šiluminės varžos vertės bei turi nežymų poveikį šilumos perdavimui per tvirtinimo elementą. Šio koeficiento vertė paraboliskai mažėja, kai konstrukcijos laikančiojo (pagrindo) sluoksnio šiluminė varža didėja. Tai reiškia, kad šilumos perdavimas (perėjimas) per jungtį į šiltinantį sluoksnį mažėja, kai mažėja šiltinančio sluoksnio poveikis visai sienos konstrukcijai. Taigi apytikslėje empirinėje šilumos perdavimo per pastato atitvarą su šilumai laidžiomis jungtimis skaičiavimo lygtyje lieka neaiški tik pataisos koeficiento 0,8, kuris reikšmingai koreguoja galutinį skaičiavimo rezultatą, fizikinė prasmė.

3.2.2. Apytikslės skaičiavimo procedūros korekcijos etapai

Siekiant nustatyti pataisos koeficiento 0,8 fizikinę prasmę ir tinkamumą empirinei skaičiavimo procedūrai, vietoj šio neapibrėžto koeficiento 0,8 įvedamas naujas koeficientas, kuris pažymimas simboliu a . Tuomet santykis tarp skaitiniu 3D metodu apskaičiuotos šilumos perdavimo koeficiento pataisos dėl jungčių poveikio ΔU_c ir šilumos perdavimo per jungtį, apskaičiuoto empiriškai priklausomai nuo jungties medžiagos šilumos laidumo koeficiento bei skerspjūvio ploto, išreiškiamas šia lygybe:

$$a = \frac{\Delta U_c}{U_c \cdot A_c \cdot n_c \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}}\right)^2}, \quad (15)$$

čia: U_c – šilumos perdavimas per jungtis, $(W/m^2 \cdot K)$; A_c – jungčių skerspjūvio plotas, (m^2) ; R_1 – termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta jungtis, šiluminė varža, $((m^2 \cdot K)/W)$; R_{tot} – sienos atitvaros be jungčių suminė šiluminė varža, $((m^2 \cdot K)/W)$.

Empirinės skaičiavimo procedūros patikslinimas atliekamas etapais, keičiant konstrukcijos geometrinius parametrus ir šiluminio sluoksnio charakteristikas. Siekiant nustatyti reikšmingiausią poveikį konstrukcijos šilumos perdavimui turinčius parametrus ir priklausomybes nuo jų, pirmiausia buvo analizuojama paprasčiausia konstrukcija, kurioje termoizoliacinį sluoksnį kerta šilumai laidži jungtis. Vėliau buvo pridėdami papildomi konstrukciniai sluoksniai ir stebima jų įtaka šilumos srautui. Buvo parinktos šešios vis daugiau elementų turinčios sienų konstrukcijos:

1. konstrukcija, sudaryta iš termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta tiesi šilumai laidų jungtis;
2. konstrukcija, sudaryta iš termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta lenkta „L“ formos šilumai laidų jungtis;
3. konstrukcija, sudaryta iš laikančiojo pagrindo sluoksnio ir termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta lenkta „L“ formos šilumai laidų jungtis;
4. konstrukcija, sudaryta iš išorinio apdailinio sluoksnio, laikančiojo pagrindo sluoksnio ir termoizoliacinio sluoksnio, kurį kerta lenkta „L“ formos šilumai laidų jungtis;
5. konstrukcija, sudaryta iš termoizoliacinio ir oro tarpo sluoksnių, kuriuos kerta lenkta „L“ formos šilumai laidų jungtis;
6. konstrukcija, sudaryta iš apdailinio sluoksnio, laikančiojo pagrindo sluoksnio, termoizoliacinio ir oro tarpo sluoksnių, kuriuos kerta lenkta „L“ formos šilumai laidų jungtis.

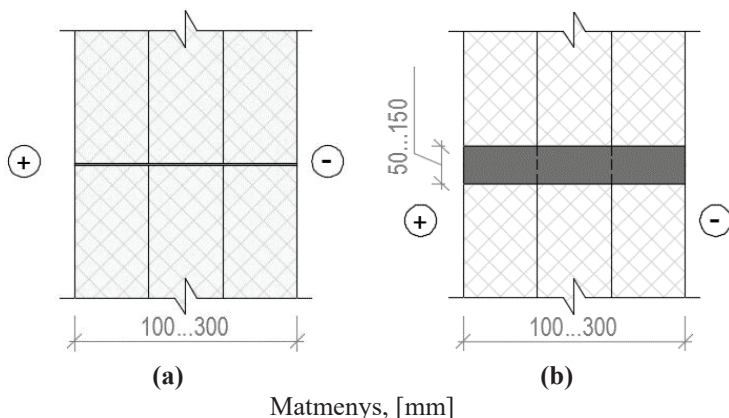
Kiekvieno etapo sienų konstrukcijos buvo sukurtos skaitinio modeliavimo programa. Skaičiavimai buvo atlikti nustatant standartinę temperatūros režimą: 0° C išorinėje konstrukcijos pusėje; 20° C vidinėje konstrukcijos pusėje.

3.2.3. Šilumos srautų per konstrukcijas su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimai

Analizuojant kiekvieną konstrukciją buvo apskaičiuojama šilumos perdavimo pataisa ΔU_c dėl šilumai laidžių jungčių poveikio, vertinta kaip skirtumas tarp šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir per konstrukciją be jungčių, ir pataisos koeficientas a . Santykis tarp ΔU_c ir U_c buvo analizuojamas siekiant nustatyti priklausomybes nuo jungčių charakteristikų. Konstrukcijose naudojamos šilumai laidžios jungtys kiekvienu atveju buvo 3 mm storio. Buvo parinkti trys skirtingi jungčių skerspjūvio aukščiai: 50 mm, 100 mm ir 150 mm. Taip pat buvo naudojami trijų skirtingų storių termoizoliacinio sluoksniai: 100 mm, 200 mm ir 300 mm. Eksperimentiniai sienų fragmentų tyrimai buvo atlikti su aliuminio lydinio jungtimis, kurių šilumos laidumo koeficientas $\lambda = 220 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, kadangi tokia vertė buvo nurodyta medžiagos gamintojo deklaracijoje. Detalūs skaitiniai konstrukcijų tyrimai buvo atlikti su dviem aliuminio lydinio jungčių šiluminio laidumo vertėmis: $\lambda = 160 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, ir $\lambda = 220 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, kadangi pastatų energinio naudingumo projektavimo ir sertifikavimo standarte (STR 2.01.02:2016) aliuminio lydinio šilumos laidumo koeficiento vertė nurodyta $160 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Taigi skaitiniai tyrimai atlikti su abiem minėtomis vertėmis, o tai leido ištirti platesnį jungčių šiluminio laidumo intervalą. Šilumos perdavimas per jungtis U_c buvo skaičiuojamas priimanč, kad šilumos mainai tarp jungties ir termoizoliacinio sluoksnio medžiagos nevyksta.

Šilumos srauto per konstrukciją Nr. 1 analizė

Pirmiausia nagrinėjama paprasčiausia konstrukcija (3.8 pav.), sudaryta iš šiltinančios medžiagos sluoksnių, kuriuos kerta tiesios metalinės jungtys.



3.8 pav. Konstrukcija Nr. 1, sudaryta iš termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta tiesios metalinės jungtys: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

Termoizoliacinio sluoksnio medžiagos šilumos laidumo koeficiento vertė buvo priimta kaip standartiniu eksperimentiniu metodu nustatyta polistireninio putplasčio EPS šilumos laidumo vertė ($\lambda = 0.0312 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Apskaičiuoto termoizoliacinio sluoksnio su jungtimis ir be jungčių šilumos perdavimo skirtumai pateikiami 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta tiesios jungtys

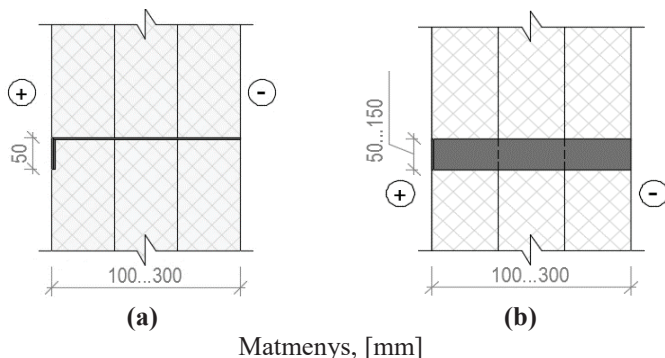
Jungčių medžiaga ($\lambda_c, \text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								
	100			200			300		
	Jungčių aukštis, mm								
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
	Šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas $\Delta U_c, \text{W}/\text{m}^2\text{K}$								
Nerūdijantis plienas (17)	0,005	0,010	0,014	0,006	0,012	0,018	0,007	0,013	0,019
Plienas (50)	0,006	0,010	0,015	0,007	0,013	0,020	0,009	0,016	0,023
Aliuminio lydinys (160)	0,006	0,011	0,015	0,008	0,015	0,021	0,009	0,018	0,025
Aliuminio lydinys (220)	0,006	0,011	0,015	0,008	0,015	0,021	0,010	0,018	0,026
	Koeficientas a								
Nerūdijantis plienas (17)	0,075	0,070	0,068	0,171	0,174	0,175	0,304	0,283	0,275
Plienas (50)	0,027	0,025	0,024	0,069	0,064	0,066	0,132	0,118	0,113
Aliuminio lydinys (160)	0,009	0,008	0,008	0,024	0,022	0,022	0,043	0,041	0,038
Aliuminio lydinys (220)	0,006	0,006	0,006	0,018	0,017	0,016	0,034	0,030	0,029

Šio etapo skaičiavimo rezultatai parodė, kad šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ΔU_c dėl jungčių poveikio yra proporcingas jungties skerspjūvio plotui. Tai reiškia, jog šilumos mainai tarp jungčių ir šiltinančios medžiagos yra nežymūs. Jungties medžiagos šilumos laidumo poveikis šilumos perdavimo padidėjimui ΔU_c taip pat yra nedidelis, pavyzdžiui, keičiant šilumai laidžias jungtis, konstrukcijos su 100 mm storio termoizoliaciniu sluoksniu atveju dydis ΔU_c išlieka beveik nepakitęs.

Skaičiavimo rezultatų analizė parodė tendenciją, kad ΔU_c vertė didėja neproporcingai, kai šilumos izoliacijos sluoksnio storis didėja, pavyzdžiui, 100 mm aukščio nerūdijančio plieno jungties atveju ΔU_c padidėjo 20 %, kai šilumos izoliacijos sluoksnio storis padidėjo du kartus (nuo 100 mm iki 200 mm), ir 30 %, kai šilumos izoliacijos sluoksnio storis padidėjo trigubai (nuo 100 mm iki 300 mm). Tai paaiškino, kodėl koeficiento a vertės yra atvirkščiai proporcingos jungčių medžiagos šilumos laidumui: kuo didesnis jungties šiluminis laidumas, tuo mažesnė šilumos perdavimo dalis per jungtį turi būti įtraukta į bendrą šilumos perdavimą per visą konstrukciją, nes intensyvesnį šilumos perdavimą per jungtį riboja jungties paviršiaus plotas, per kurį šiluma patenka iš vidaus aplinkos į jungtį ir iš jungties – į išorę. Šiame tyrimo etape nustatyta, kad jungčių ilgieji šonai yra izoliuoti nuo vidaus ir išorės aplinkų, o jungčių paviršiaus plotas, veikiamas aplinkos abiejose šilumos izoliacijos sluoksnio pusėse, nėra pakankamas, kad per jį būtų perduodamas toks šilumos kiekis, koks įprastai gali būti perduodamas per atitinkamo šiluminio laidumo jungtis, nesančias termoizoliaciniame sluoksnyje. Todėl kitame tyrimo etape skaičiavimai buvo pakartoti naudojant jungtis su 50 mm ilgio lentynomis, kurios paprastai naudojamos jungtims prie sienos pritvirtinti.

Šilumos srauto per konstrukciją Nr. 2 analizė

Šiame etape buvo analizuojamas šilumos srautas per termoizoliacinį sluoksnį, kurį kerta metaliniai „L“ formos tvirtinimo elementai. Kaip ir dažniausiai praktikoje, po jungčių lentynomis buvo sumodeliuotos 3 mm storio termoizoliacinės tarpinės, kurių šilumos laidumas priimtas $0,07 W/(m \cdot K)$. Nagrinėjama konstrukcija pavaizduota 3.9 paveikslėlyje. Atliktų konstrukcijos šilumos perdavimo padidėjimo dėl metalinių jungčių poveikio bei koeficiento a skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.4 lentelėje.



3.9 pav. Konstrukcija Nr. 2, sudaryta iš termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

3.4 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksni kerta „L“ formos jungtys

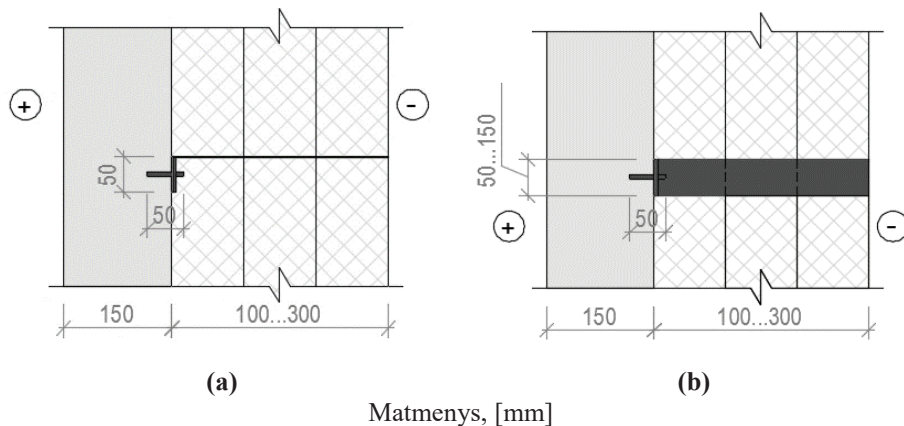
Jungčių medžiaga ($\lambda_c, W/m \cdot K$)	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								
	100			200			300		
	Jungčių aukštis, mm								
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas $\Delta U_c, W/m^2K$									
Nerūdijantis plienas (17)	0,009	0,018	0,026	0,009	0,019	0,028	0,009	0,017	0,026
Plienas (50)	0,010	0,020	0,030	0,012	0,024	0,035	0,012	0,024	0,037
Aliuminio lydinys (160)	0,011	0,021	0,031	0,013	0,027	0,039	0,014	0,028	0,043
Aliuminio lydinys (220)	0,011	0,021	0,031	0,013	0,027	0,039	0,015	0,029	0,044
Koeficientas a									
Nerūdijantis plienas (17)	0,130	0,127	0,126	0,260	0,272	0,268	0,373	0,376	0,379
Plienas (50)	0,050	0,049	0,049	0,113	0,118	0,116	0,179	0,179	0,180
Aliuminio lydinys (160)	0,017	0,016	0,016	0,039	0,041	0,040	0,065	0,065	0,066
Aliuminio lydinys (220)	0,012	0,012	0,012	0,029	0,030	0,029	0,049	0,048	0,049

Šio etapo skaičiavimo rezultatai parodė, kad padidinus jungčių kontakto su aplinka plotą (pridėtos 50 mm ilgio lentynos), per kurį į jungtis gali patekti šiluma, padidėja ΔU_c vertė, tačiau termoizoliacinio sluoksnio storio (jungties ilgio) įtaka ΔU_c mažėja. Analizuojant konstrukcijos su mažiausio šiluminio laidumo nerūdijančio plieno jungtimis atvejį pastebėta, kad jungčių ilgis neturi reikšmingos įtakos šilumos perdavimui per jungtį. Pataisa dėl jungčių poveikio šilumos izoliacijos sluoksnio šilumos pralaidumui ΔU_c išlieka proporcinga jungties aukščiui (skerspjūvio plotui).

Buvo analizuojamas ryšys tarp koeficiento a verčių ir tvirtinimo elementų medžiagų šilumos laidumo. Nustatyta, jog koeficiento a santykis nerūdijančio plieno ir plieno jungčių panaudojimo atveju yra apie 2,6, o šių medžiagų šilumos laidumo verčių santykis yra 2,9; plieno ir aliuminio lydinio medžiagų panaudojimo atveju minėti santykiai yra atitinkamai 3,5 ir 4,4, o nerūdijančio plieno ir aliuminio lydinio ($\lambda_c = 220 W/(m \cdot K)$) – atitinkamai 9,0 ir 12,9. Tai rodo, kad pridėjus lentyną buvo sudarytos sąlygos patekti didesniai šilumos kiekiui iš aplinkos į jungtį, lyginant su jungties be lentynos atveju, ir koeficiento a vertė tapo proporcinga jungties šilumos laidumui.

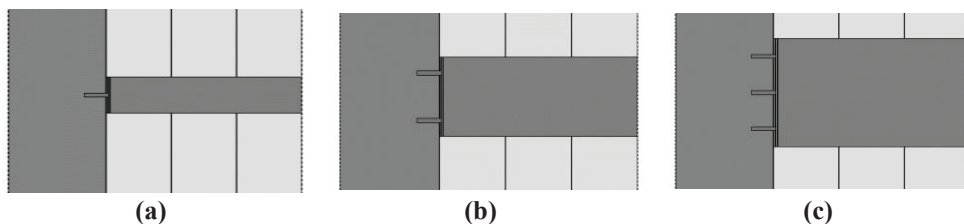
Šilumos srauto per konstrukciją Nr. 3 analizė

Šiame šilumos srauto analizės etape prie ankstesnės konstrukcijos buvo pridėdamas laikantysis 150 mm storio sluoksnis, kurio medžiagos šilumos laidumo koeficientas priimtas $\lambda = 0,50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. „L“ formos metalinės jungtys prie laikančiojo pagrindo sluoksnio tvirtinamos 50 mm ilgio plieniniais varžtais ($\lambda = 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), kurių skerspjūviai kompiuterinėje programoje supaprastintai priimti kaip kvadratiniai su 6 mm ilgio kraštinėmis. Analizuojamos konstrukcijos vaizdas pateiktas 3.10 paveikslėlyje.



3.10 pav. Konstrukcija Nr. 3, sudaryta iš laikančiojo pagrindo ir termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

50 mm aukščio „L“ formos jungtys prie laikančiojo sluoksnio tvirtinamos 1 plieniniu varžtu, 100 mm aukščio jungtys – 2 plieniniais varžtais, o 150 mm aukščio jungtys – 3 plieniniais varžtais (3.11 pav.).



3.11 pav. Skirtingo aukščio „L“ formos metalinių jungčių tvirtinimas prie laikančiojo sluoksnio: a) 50 mm aukščio jungtys; b) 100 mm aukščio jungtys; c) 150 mm aukščio jungtys

Atliktų konstrukcijos šilumos perdavimo padidėjimo dėl metalinių jungčių poveikio bei koeficiento a skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys, pritvirtintos prie laikančiojo pagrindo

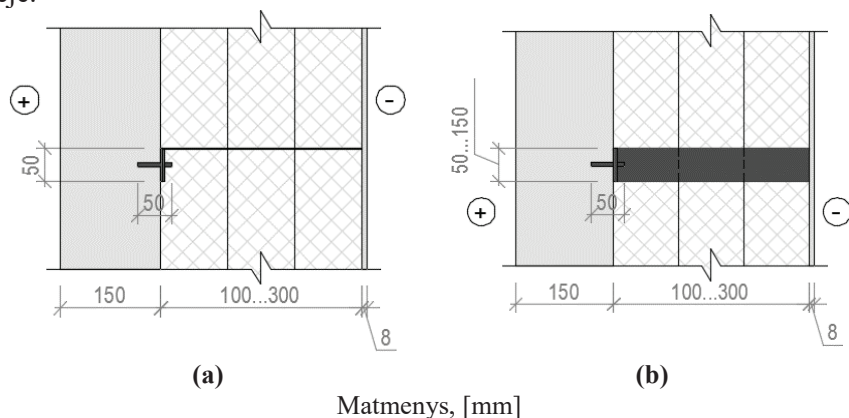
Jungčių medžiaga ($\lambda_c, W/m \cdot K$)	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								
	100			200			300		
	Jungčių aukštis, mm								
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas $\Delta U_c, W/m^2K$									
Nerūdijantis plienas (17)	0,009	0,017	0,024	0,010	0,019	0,028	0,010	0,018	0,026
Plienas (50)	0,011	0,020	0,028	0,014	0,025	0,037	0,015	0,027	0,038
Aliuminio lydinys (160)	0,011	0,021	0,030	0,016	0,029	0,042	0,018	0,033	0,046
Aliuminio lydinys (220)	0,012	0,021	0,030	0,016	0,029	0,043	0,019	0,034	0,047
Koeficientas a									
Nerūdijantis plienas (17)	0,172	0,161	0,155	0,342	0,317	0,317	0,467	0,438	0,420
Plienas (50)	0,069	0,064	0,061	0,159	0,143	0,142	0,243	0,220	0,207
Aliuminio lydinys (160)	0,023	0,021	0,020	0,057	0,051	0,050	0,094	0,083	0,077
Aliuminio lydinys (220)	0,017	0,016	0,015	0,042	0,038	0,037	0,071	0,062	0,058

Šio etapo skaičiavimų rezultatai 100 mm termoizoliacinio sluoksnio storio atveju parodė lygų arba šiek tiek sumažėjusį jungčių poveikį šilumos perdavimui per konstrukciją palyginus su ankstesnio etapo skaičiavimų rezultatais. Kitais atvejais, kai termoizoliacinio sluoksnio storis buvo 200 mm ar 300 mm, jungčių įtaka konstrukcijos šilumos perdavimui padidėjo. Apskritai matomi labai nežymūs skirtumai (daugiausiai $0,005 W/m^2 \cdot K$ su 300 mm storio termoizoliaciniu sluoksniu ir jį kertančiomis aliuminio lydinio jungtimis), todėl galima teigti, kad laikantysis pagrindo sluoksnis turi nežymų poveikį sienos konstrukcijos šilumos perdavimo pokyčiui dėl jungčių įtakos. Didėjant metalinių jungčių ir termoizoliacinio sluoksnio sąlyčio plotui (jungčių aukščiui), apskaičiuotos koeficiento a vertės šiek tiek mažėjo. Visgi koeficiento a vertės išlieka proporcingos termoizoliacinio sluoksnio storiui.

Šilumos srauto per konstrukciją Nr. 4 analizė

Paskutiniuoju sienų konstrukcijų be oro tarpo analizės metu prie ankstesnės konstrukcijos pridamas 8 mm storio išorinės apdailos sluoksnis. Šio papildomo sluoksnio šilumos laidumo koeficiento vertė priimta kaip eksperimentiškai išmatuotų cemento-drožlių plokščių – $\lambda = 0,2672 W/(m \cdot K)$. Analizuojama konstrukcija pavaizduota 3.12 iliustracijoje. Atliktų konstrukcijos šilumos perdavimo padidėjimo

dėl metalinių jungčių poveikio bei koeficiento a skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.6 lentelėje.



3.12 pav. Konstrukcija Nr. 4, sudaryta iš laikančiojo pagrindo, termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys, ir išorinės apdailos sluoksnių: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

3.6 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys, pritvirtintos prie laikančiojo pagrindo ir išorinės apdailos sluoksnių

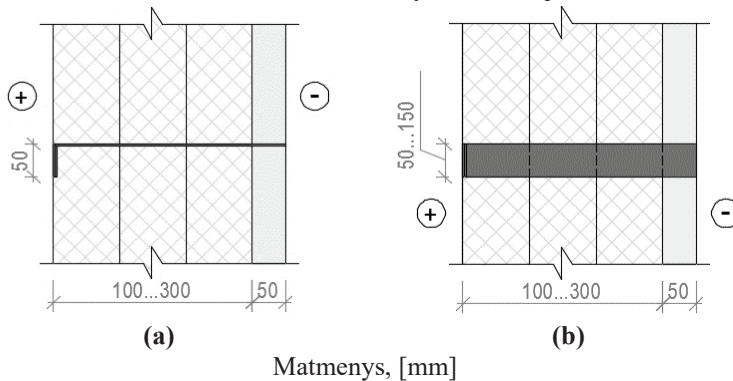
Jungčių medžiaga ($\lambda_c, W/m \cdot K$)	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								
	100			200			300		
	Jungčių aukštis, mm								
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas $\Delta U_c, W/m^2K$									
Nerūdijantis plienas (17)	0,010	0,021	0,028	0,011	0,022	0,031	0,010	0,019	0,029
Plienas (50)	0,013	0,025	0,033	0,015	0,031	0,042	0,016	0,029	0,044
Aliuminio lydiny (160)	0,014	0,027	0,035	0,018	0,036	0,048	0,020	0,036	0,053
Aliuminio lydiny (220)	0,014	0,027	0,036	0,018	0,036	0,049	0,021	0,037	0,055
Koeficientas a									
Nerūdijantis plienas (17)	0,201	0,201	0,180	0,373	0,373	0,347	0,495	0,460	0,465
Plienas (50)	0,082	0,082	0,073	0,177	0,175	0,160	0,263	0,238	0,237
Aliuminio lydiny (160)	0,028	0,028	0,024	0,064	0,063	0,057	0,103	0,091	0,090
Aliuminio lydiny (220)	0,021	0,020	0,018	0,048	0,047	0,042	0,078	0,069	0,068

Šioje konstrukcijoje iš vidaus į išorės aplinką per jungtis perduodamas šilumos kiekis yra tik šiek tiek didesnis nei ankstesniame etape. Pataisa dėl jungties šilumos

pralaidumo ΔU_c įtakos šiek tiek padidėjo, palyginti su ankstesnio tyrimo etapo rezultatais, nes konstrukcijos šilumos pralaidumas be jungčių sumažėjo pridėdant išorinės apdailos sluoksnį. Tokia pati tendencija pastebima ir koeficiento a skaičiavimo rezultatuose: ši vertė yra didesnė nei ankstesniame skaičiavime ir priklauso nuo metalinių jungčių paviršiaus ploto ir šilumos izoliacijos storio. Koeficiento a vertės taip pat išlieka proporcingos šiltinančio sluoksnio storiui.

Šilumos srauto per konstrukciją Nr. 5 analizė

Šiame etape buvo analizuojama termoizoliacinių sluoksnių konstrukcija Nr. 5, kurią kerta „L“ formos metalinės jungtys, išorėje išeinančios už termoizoliacinio sluoksnio į $0\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros lauko aplinką. Analizuojama konstrukcija pavaizduota 3.13 paveikslėlyje. Atliktų konstrukcijos šilumos perdavimo padidėjimo dėl metalinių jungčių poveikio bei koeficiento a skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.7 lentelėje.



3.13 pav. Konstrukcija Nr. 5, sudaryta iš termoizoliacinių sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys, išeinančios į išorinį oro tarpą: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

3.7 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai šilumos izoliacijos sluoksnį kerta „L“ formos jungtys, išeinančios į išorinį oro sluoksnį

Jungčių medžiaga ($\lambda_c, W/m\cdot K$)	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								
	100			200			300		
	Jungčių aukštis, mm								
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas $\Delta U, W/m^2K$									
Nerūdijantis plienas (17)	0,019	0,037	0,048	0,016	0,031	0,043	0,013	0,026	0,034
Plienas (50)	0,026	0,051	0,063	0,025	0,049	0,066	0,022	0,045	0,059
Aliuminio lydiny (160)	0,030	0,058	0,071	0,032	0,061	0,082	0,030	0,061	0,079
Aliuminio lydiny (220)	0,031	0,059	0,073	0,033	0,063	0,085	0,032	0,064	0,083

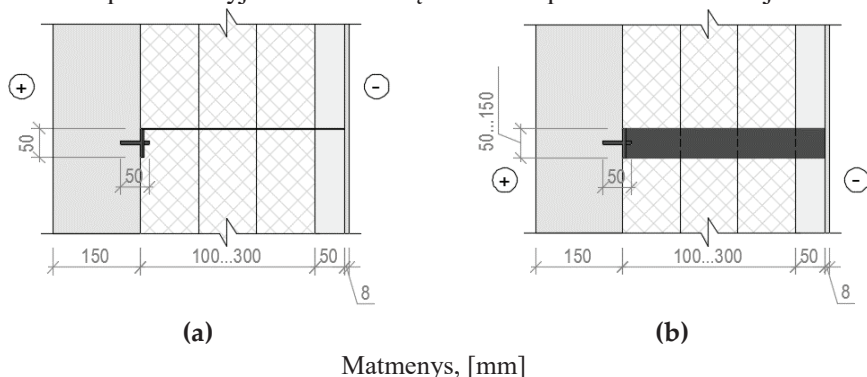
Koeficientas a									
Nerūdijantis plienas (17)	0,272	0,266	0,230	0,454	0,444	0,419	0,551	0,556	0,491
Plienas (50)	0,127	0,124	0,104	0,246	0,239	0,218	0,329	0,330	0,289
Aliuminio lydinys (160)	0,046	0,045	0,037	0,097	0,094	0,084	0,140	0,140	0,122
Aliuminio lydinys (220)	0,034	0,033	0,027	0,074	0,071	0,063	0,107	0,107	0,093

Skaičiavimų rezultatai parodė, kad, padidėjus jungties šilumos perdavimo plotui, sienos šilumos perdavimo korekcijos vertė ΔU padidėjo daugiau nei du kartus palyginus su analogiška konstrukcija be oro tarpo (konstrukcija Nr. 2). Tai dar kartą patvirtina, kad šilumos pralaidumas per jungtį pirmiausia priklauso nuo jungties šilumos mainų su aplinka galimybių. Koeficiento a skaičiavimų rezultatai parodė, kad didėjant šilumos izoliacijos sluoksnio storiui, anksčiau nustatyta šio koeficiento priklausomybė nuo jungčių ilgio išlieka plieninių ir aliuminio lydinio jungčių atveju, tačiau pastebima koeficiento a mažėjimo tendencija mažiau šilumai laidžiu nerūdijančio plieno jungčių atveju.

Šio tyrimo etapo rezultatų analizė parodė, kad net ir mažiausio šiluminio laidumo jungčių, pagamintų iš nerūdijančio plieno, atveju turėtų būti įvertinta tik pusė šilumos srauto, kuris gali praeiti per šias jungtis, kai jos susisiečia su vidine ir išorine aplinka. Visgi realiomis sąlygomis jungtys pritvirtinamos prie laikančiojo sluoksnio, kuris taip pat turi tam tikrus šilumos izoliacijos parametrus, sumažinančius šilumos perdavimą į jungtis. Todėl kitame etape tiriama konstrukcija su laikančiuoju sluoksniu ir oro tarpu išorinėje konstrukcijos pusėje.

Šilumos srauto per konstrukciją Nr. 6 analizė

Paskutiniajame etape buvo analizuojama sienos konstrukcija, kurią sudaro laikantysis pagrindo sluoksnis, termoizoliaciniai sluoksniai ir 50 mm storio oro tarpas, kuriuos kerta metalinės jungtys, bei išorinės apdailos sluoksnis. Temperatūra oro tarpo sluoksnyje buvo sumodeliuota kaip ir išorės – 0 °C. Konstrukcijos vaizdas matomas 3.14 paveikslėlyje. Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.8 lentelėje.



3.14 pav. Konstrukcija Nr. 6, sudaryta iš laikančiojo sienos sluoksnio, termoizoliacines medžiagos ir oro tarpo sluoksnių, kuriuos kerta „L“ formos metalinės jungtys, bei išorinės apdailos sluoksnio: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

3.8 lentelė. Šilumos perdavimo koeficiento padidėjimas ir santykis su teoriniu jungties šilumos perdavimo koeficientu, kai sienos konstrukciją sudaro laikantysis pagrindo sluoksnis, šilumos izoliacijos ir oro tarpo sluoksniai, kuriuos kerta „L“ formos jungtys, bei išorinės apdailos sluoksnis

Jungčių medžiaga ($\lambda_c, W/m \cdot K$)	Termoizoliacinio sluoksnio storis, mm								
	100			200			300		
	Jungčių aukštis, mm								
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas $\Delta U_c, W/m^2K$									
Nerūdijantis plienas (17)	0,021	0,039	0,051	0,017	0,033	0,047	0,014	0,027	0,035
Plienas (50)	0,032	0,059	0,074	0,031	0,057	0,078	0,026	0,052	0,066
Aliuminio lydinys (160)	0,040	0,072	0,088	0,043	0,077	0,096	0,040	0,077	0,096
Aliuminio lydinys (220)	0,041	0,074	0,091	0,045	0,081	0,103	0,043	0,082	0,103
Koeficientas a									
Nerūdijantis plienas (17)	0,412	0,390	0,340	0,586	0,559	0,533	0,663	0,661	0,574
Plienas (50)	0,216	0,200	0,168	0,356	0,331	0,305	0,437	0,429	0,366
Aliuminio lydinys (160)	0,084	0,076	0,063	0,155	0,141	0,126	0,206	0,198	0,166
Aliuminio lydinys (220)	0,063	0,057	0,047	0,119	0,107	0,096	0,161	0,154	0,129

Šio etapo šilumos perdavimo pataisos rezultatus palyginus su konstrukcijos be oro tarpo Nr. 4 rezultatais, pastebėtas smarkus padidėjimas. Jungčių paviršiaus plotas, esantis oro tarpo ertmėje, lėmė, kad šilumos perdavimo per konstrukciją su jungtimis ir be jungčių skirtumas ΔU_c padidėjo 2–3 kartus priklausomai nuo jungčių šilumos laidumo.

3.2.4. Pataisos koeficiento a skirtingo šiluminio laidumo jungtims pritaikymas

Apibendrinant šilumos srautų per įvairias sienų konstrukcijas analizės ir pataisos koeficientų skaičiavimų rezultatus buvo išvestos vidutinės koeficientų a matematinės išraiškos, tiesiogiai priklausančios nuo jungčių ilgio. Koeficientų a vertės, pateiktos 3.3–3.8 lentelėse, buvo padalintos iš atitinkamo jungčių ilgio atskirai kiekvienam skirtingo jungčių šiluminio laidumo atvejui ir, suskaičiavus vidutines vertes bei jas suapvalinus, buvo gautos koeficientų a lygtys (16)–(19) ir (22)–(25). Vidutinės koeficientų a vertės gautos kiekvienam skirtingo šiluminio laidumo jungčių atvejui bei dviem sienų konstrukcijų atvejams: su oro tarpu ir be jo.

3.2.4.1. Koeficiento a supaprastintas pritaikymas sienų konstrukcijoms be oro tarpo

Pagal atliktus skaičiavimus, sienų konstrukcijoms be oro tarpo šilumos perdavimo pataisos koeficientai a apytiksliai gali būti apskaičiuojamas pagal lygtis:

$$a = 1,8 \cdot L - \text{nerūdijančio plieno jungtys } (\lambda_c = 17 \text{ W}/(m \cdot K)); \quad (16)$$

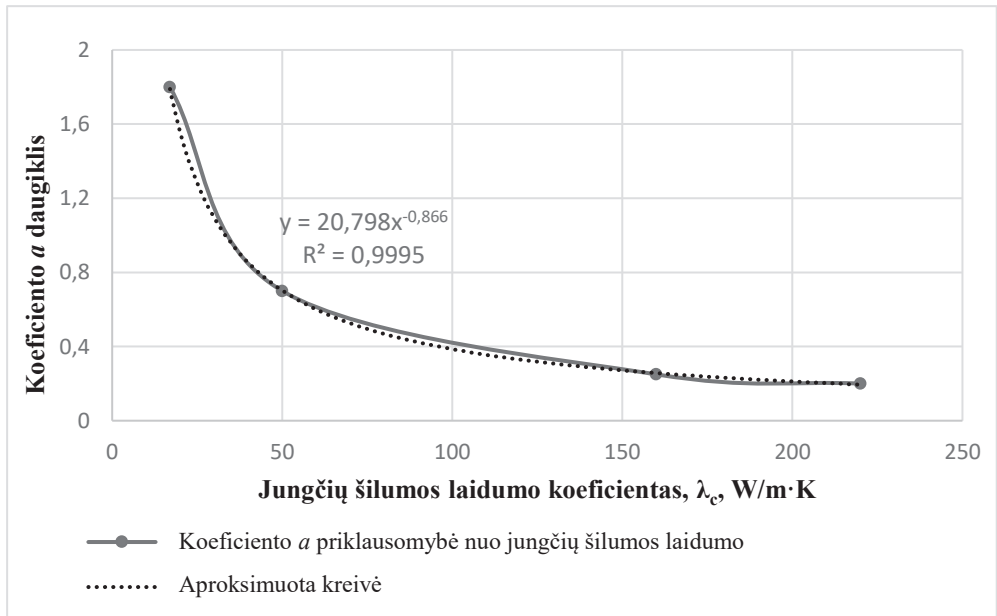
$$a = 0,7 \cdot L - \text{plieno jungtys } (\lambda_c = 50 \text{ W}/(m \cdot K)); \quad (17)$$

$$a = 0,25 \cdot L - \text{aliuminio lydinio jungtys } (\lambda_c = 160 \text{ W}/(m \cdot K)); \quad (18)$$

$$a = 0,2 \cdot L - \text{aliuminio lydinio jungtys } (\lambda_c = 220 \text{ W}/(m \cdot K)); \quad (19)$$

čia: L – jungčių ilgis (termoizoliacinio sluoksnio storis).

Siekiant išvesti vieną lygtį, skirtą šilumos perdavimo pataisos koeficientui a apskaičiuoti, kai naudojamos bet kokio šiluminio laidumo jungtys, buvo išvesta priklausomybės nuo jungčių šiluminio laidumo lygtis pagal apskaičiuotus koeficiento a daugiklius (lygtys 16, 17, 18, 19). Priklausomybės grafikas pateikiamas 3.15 paveikslėlyje.



3.15 pav. Koeficiento a priklausomybė nuo jungčių šilumos laidumo koeficiento: konstrukcija be oro tarpo

Tuomet koeficientas a sienų konstrukcijoms be oro tarpo gali būti apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$a = \frac{20,798}{\lambda_c^{0,866}} \cdot L. \quad (20)$$

Praktiniam naudojimui ankstesnė lygtis buvo supaprastinta ir perrašyta taip:

$$a = \frac{21}{\lambda_c^{0,87}} \cdot L. \quad (21)$$

3.2.4.2. Koeficiento a supaprastintas pritaikymas sienų konstrukcijoms su oro tarpu

Pagal anksčiau atliktus skaičiavimus sienų konstrukcijoms su oro tarpu šilumos perdavimo pataisos koeficientai a apytiksliai gali būti apskaičiuojami pagal išraiškas:

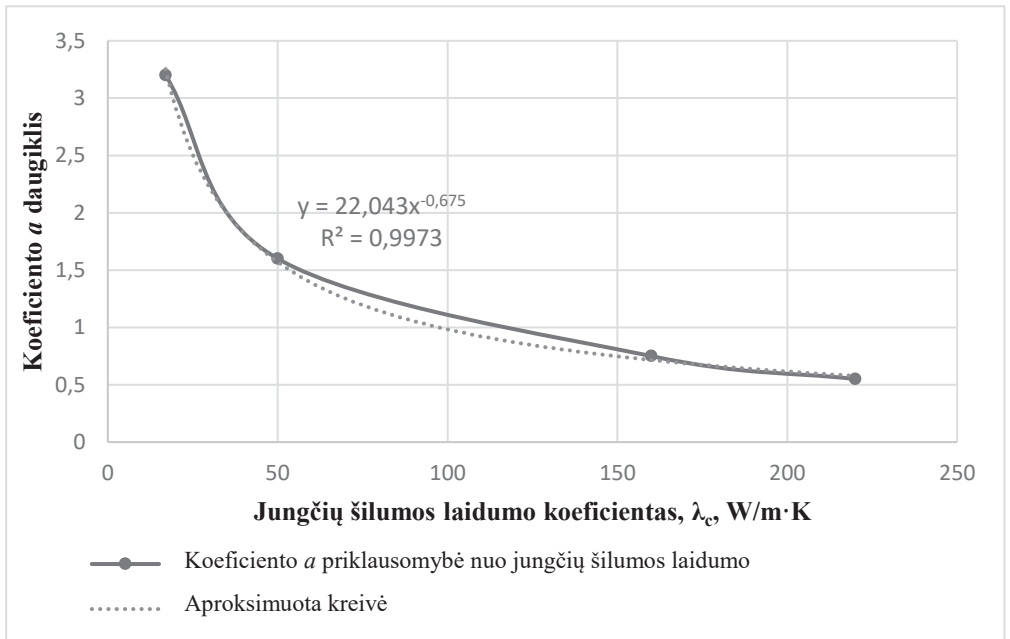
$$a = 3,2 \cdot L - \text{nerūdijančio plieno jungtys } (\lambda_c = 17, W/(m \cdot K)); \quad (22)$$

$$a = 1,6 \cdot L - \text{plieno jungtys } (\lambda_c = 50, W/(m \cdot K)); \quad (23)$$

$$a = 0,75 \cdot L - \text{aliuminio lydinio jungtys } (\lambda_c = 160, W/(m \cdot K)); \quad (24)$$

$$a = 0,55 \cdot L - \text{aliuminio lydinio jungtys } (\lambda_c = 220, W/(m \cdot K)); \quad (25)$$

Kaip ir konstrukcijų be oro tarpo atveju, buvo išvesta priklausomybės nuo jungčių šiluminio laidumo lygtis pagal apskaičiuotus koeficiento a daugiklius (lygtys 22, 23, 24, 25). Priklausomybės grafikas pateikiamas 3.16 pav.



3.16 pav. Koeficiento a priklausomybė nuo jungčių šilumos laidumo koeficiento: konstrukcija su oro tarpu

Pataisos koeficientas a sienų konstrukcijoms su oro tarpu gali būti apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$a = \frac{22,043}{\lambda_c^{0,675}} \cdot L. \quad (26)$$

Praktiniam naudojimui ankstesnė lygtis buvo supaprastinta ir perrašyta taip:

$$a = \frac{22}{\lambda_c^{0,68}} \cdot L. \quad (27)$$

Po atliktų skaičiavimų ir matematinių veiksmų pritaikymo šilumos perdavimo pataisa dėl šilumai laidžių jungčių poveikio ΔU apskaičiuojama pagal (28) lygtį, kurioje naudojamas naujas pataisos koeficientas a , atitinkamai pagal tai, ar sienos konstrukcija yra su oro tarpu ar be jo:

$$\Delta U_c = a \cdot \frac{\lambda_c \cdot A_c \cdot n_c}{a_1} \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2. \quad (28)$$

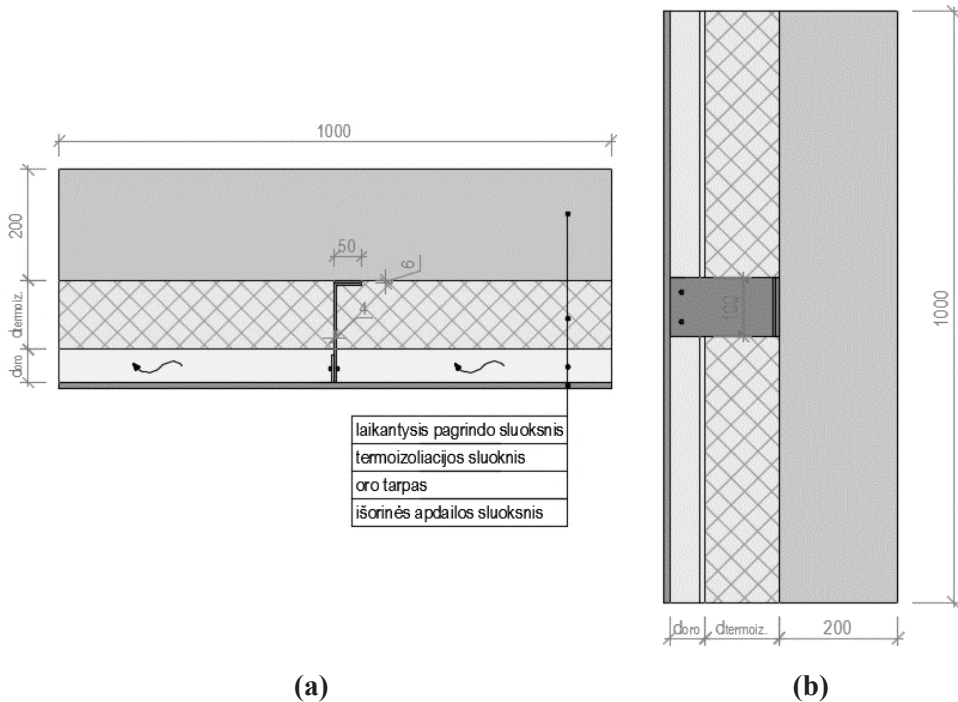
3.3. Pakoreguotos šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros patikrinimas

Atlikus empirinės šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros korekcijas, patikslinta empirinė išraiška buvo patikrinta, gaunamus rezultatus palyginant su mokslinėje literatūroje paskelbtų tyrimų apie vėdinamų fasadų sistemų šilumos perdavimą rezultatais. Šiam palyginimui buvo panaudoti du moksliniai tyrimai, kuriuose sienų konstrukcijų šilumos perdavimas buvo nustatytas panaudojant kompiuterines skaitinio modeliavimo programas. Pirmasis palyginimui pasirinktas tyrimas buvo atliktas autorių T. G. Theodosiou ir kt. (T. G. Theodosiou et al., 2015). Autoriai nagrinėjo vėdinamų fasadų su plieninėmis jungtimis konstrukcijose susidarantių šiluminių tiltelių įtaką šilumos perdavimui. Antrasis pasirinktas tyrimas, atliktas autorių K. Nowak ir A. Byrdy (Nowak & Byrdy, 2019), kuriame taip pat analizuojamas šilumos perdavimas per vėdinamas fasadų sistemas, kuriose termoizoliacinius sluoksnius kerta aliuminio lydinio ir plieninės jungtys.

3.3.1. Fasado konstrukcija su plieninėmis jungtimis

Autorių T. G. Theodosiou ir kt. (T. G. Theodosiou et al., 2015) analizuota fasadų sistemos tipinė konstrukcija pavaizduota 3.17 pav. Analizuodami vėdinamų fasadų konstrukcijų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimą autoriai priėmė, kad sienos tipinę konstrukciją sudaro 200 mm storio laikantysis pagrindo sluoksnis, kurio šilumos laidumo koeficientas priimtas kaip armuoto betono ($\lambda = 2,4 \text{ W}/(m \cdot K)$), 100 mm, 200 mm arba 250 mm storio termoizoliacinis sluoksnis, kurio šilumos laidumo koeficientas priimtas $\lambda = 0,03 \text{ W}/(m \cdot K)$, 20 mm storio oro tarpo sluoksnis, kuris vertintas kaip vėdinamas, nevėdinamas arba konstrukcija be oro tarpo, bei išorinės apdailos sluoksnis, kuriam parinktos aliuminio lydinio plokštės ($\lambda = 160 \text{ W}/(m \cdot K)$). Termoizoliacinį sluoksnį kerta „L“ formos plieninės jungtys, kurių šilumos laidumo vertė priimta $\lambda = 60 \text{ W}/(m \cdot K)$. Plieninės jungtys prie laikančiojo pagrindo sluoksnio tvirtinamos per plastikines tarpines, kurių matmenys sutampa su plieninių jungčių lentynų matmenimis ($50 \times 100 \text{ mm}$), o šilumos laidumo koeficientas priimtas $\lambda = 0,09 \text{ W}/(m \cdot K)$. Parinkti plieniniai tvirtinimo varžtai ($\lambda = 60 \text{ W}/(m \cdot K)$), kuriais „L“ formos jungtys per termoizoliacines tarpines tvirtinamos prie laikančiojo sluoksnio ir prie aliuminio lydinio profilio, prie kurio

virtinama konstrukcijos išorinė apdailos plokštė. Atliekant tyrimą autoriai priėmė, kad fasado konstrukcijoje „L“ formos jungtys bus išdėstomos kas 1000 mm tiek horizontalia, tiek vertikalia kryptimi, todėl jungčių kiekis kvadratiniam metre lygus 1,0 ($n_c = 1.0 \text{ vnt}/m^2$). Taigi skaitinio modeliavimo programa buvo analizuojamas fasado konstrukcijos elementas, kurio matmenys 1000×1000 mm su viena „L“ formos plienine jungtimi centre (3.17 pav.).



3.17 pav. Sienos fragmento su plieninėmis jungtimis konstrukcija: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

Pritaikius pakoreguotą empirinę procedūrą (lygtys (20), (26) ir (28)) buvo apskaičiuotas aukščiau aprašytos fasado konstrukcijos šilumos perdavimas bei gauti rezultatai palyginti su autorių T. G. Theodosiou ir kt. (T. G. Theodosiou et al., 2015) gautais rezultatais. Skaičiavimų bei palyginimo rezultatai pateikiami 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Fasado sistemos su plieninėmis jungtimis šilumos perdavimo, gauto pakoreguotu empiriniu ir 3D skaitinio modeliavimo metodais, rezultatų palyginimas

Laikantysis pagrindo sluoksnis	Oro tarpo vėdinimo pobūdis	Termoiz. sluoksnio storis, mm	U, W/m ² K			Skirtumas %	
			Apytikslė procedūra	Pakoreguota apytikslė procedūra	3D skaitinis metodas	3D/apytikslė procedūra	3D/pakoreg. apytikslė procedūra
Armuotas betonas ($\lambda = 2,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)	Vėdinamas	100	0,430	0,299	0,29	48,2	3,2
	Nėvėdinamas	200	0,234	0,175	0,17	37,4	3,2
	Be oro tarpo	250	0,189	0,130	0,125	51,0	4,0

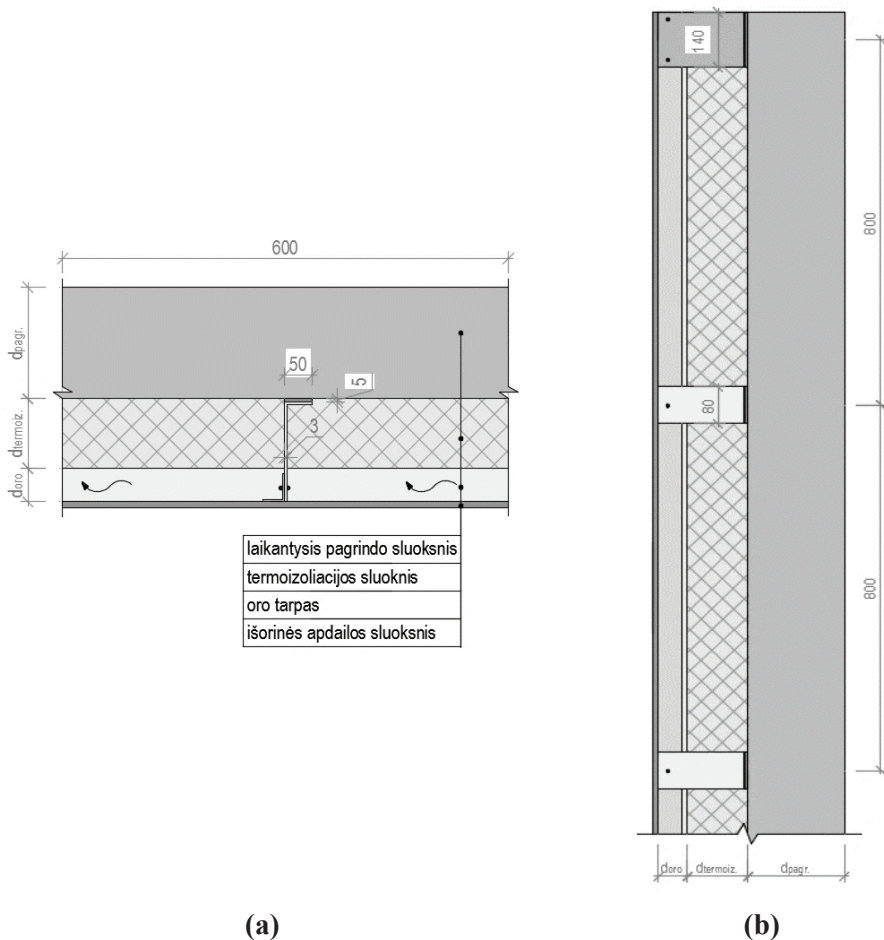
Atlikto palyginimo rezultatai parodė, kad šilumos perdavimo vertės, nustatytos 3D skaitinio modeliavimo ir pakoreguotos apytikslės empirinės procedūros metodais skiriasi nežymiai – iki 4 %. Taigi galima teigti, kad pakoreguota empirinė skaičiavimo procedūra yra tiksli ir tinkama šilumos perdavimui per sienų konstrukcijas su metalinėmis jungtimis vertinti.

3.3.2. Fasado konstrukcija su aliuminio lydinio jungtimis

Autoriai K. Nowak ir A. Byrdy (Nowak & Byrdy, 2019) atliko tyrimą, kuriame analizavo metalinių tvirtinimo elementų poveikį vėdinamų fasadų šiluminėms savybėms. Dalis autorių atlikto tyrimo rezultatų buvo panaudoti pakoreguotos empirinės šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros patikrinimui. Vertintos vėdinamo fasado konstrukcijos schema pavaizduota 3.18 iliustracijoje.

Kadangi pagrindo sluoksnio šilumos laidumas turi žymų poveikį sienos šilumos perdavimui, autoriai analizuojamos sienos konstrukcijai parinko dvi laikančiojo pagrindo medžiagas, kurių šilumos laidumo koeficientai skiriasi 17 kartų: armuotas betonas ($\lambda = 1,7 \text{ W}/(m \cdot K)$) ir akytasis betonas ($\lambda = 0,10 \text{ W}/(m \cdot K)$). Abiem atvejais laikančiojo sluoksnio storis buvo 240 mm. Autoriai tyrė konstrukciją, keisdami termoizoliacinio sluoksnio storį nuo 100 iki 250 mm (kas 50 mm), tačiau šilumos perdavimo palyginimui buvo pasirinktas vienas storis – 200 mm, kurio šilumos laidumo koeficientas ($\lambda = 0,04 \text{ W}/(m \cdot K)$). Termoizoliacinį sluoksnį kerta „L“ formos metalinės jungtys, kurios taip pat parinktos dviejų skirtingų medžiagų: aliuminio lydinio jungtys ($\lambda = 200 \text{ W}/(m \cdot K)$), kurios išdėstomos kas 800 mm vertikalia kryptimi ir kas 600 mm horizontalia kryptimi, vadinasi jų kiekis yra $n_c = 2,08 \text{ vnt}/m^2$; nerūdijančio plieno jungtys ($\lambda = 17 \text{ W}/(m \cdot K)$), pasižyminčios geresnėmis stiprumo savybėmis nei aliuminio lydinio jungtys ir montuojamos į gelžbetonines sijas, jų kiekis – $n_c = 0,56 \text{ vnt}/m^2$. Aliuminio lydinio jungčių matmenys: aukštis – 80 mm, storis – 3 mm, ilgis – pagal termoizoliacinio sluoksnio storį. Nerūdijančio plieno jungčių matmenys buvo parinkti didesni, kadangi tai didesnę apkrovos dalį laikančios jungtys: aukštis – 140 mm, storis – 4 mm, ilgis – pagal termoizoliacinio sluoksnio storį. Aliuminio lydinio jungtys prie laikančiojo pagrindo sluoksnio tvirtinamos per 5 mm storio plastikines tarpines, kurių šilumos laidumo koeficientas – $\lambda = 0,12 \text{ W}/(m \cdot K)$, o matmenys atitinka „L“ formos jungčių lentynų matmenis – $50 \times 80 \text{ mm}$.

Palyginimas šilumos perdavimo verčių, apskaičiuotų pritaikius pakoreguotą empirinę procedūrą (lygtys (26) ir (28)) ir autorių naudotą skaitinio modeliavimo metodą, pateikiamas 3.10 lentelėje.



3.18 pav. Vėdinamos sienos fragmento su aliuminio lydinio ir plieninėmis jungtimis konstrukcija: a) vaizdas iš viršaus; b) vaizdas iš šono

3.10 lentelė. Fasado sistemos su aliuminio lydinio ir nerūdijančio plieno jungtimis šilumos perdavimo, gauto pakoreguotu empiriniu ir 3D skaitinio modeliavimo metodais, rezultatų palyginimas

Laikantysis pagrindo sluoksnis	Oro tarpo vėdinimo pobūdis	Termoiz. sluoksnio storis, mm	U, W/m ² K			Skirtumas %	
			Apytikslė procedūra	Pakoreguota apytikslė procedūra	3D skaitinis metodas	3D/apytikslė procedūra	3D/pakoreg. apytikslė procedūra
Armuotas betonas ($\lambda = 1,7$ W/m·K)	Vėdinamas	200	0,546	0,253	0,265	105,9	4,6
Akytasis betonas ($\lambda = 0,10$ W/m·K)	Vėdinamas	200	0,310	0,164	0,165	87,8	0,5

Atliktas vėdinamo fasado sistemos su aliuminio lydinio ir nerūdijančio plieno jungtimis šilumos perdavimo, nustatyto 3D skaitinio modeliavimo ir pakoreguotos apytikslės empirinės procedūros metodais, palyginimas kaip ir ankstesnis parodė labai nedidelius skirtumus – iki 5 %. Taigi galima teigti, kad empirinės šilumos perdavimo skaičiavimo procedūros korekcija atlikta tinkamai ir minėta skaičiavimo procedūra tinkama šilumos perdavimo per vėdinamas fasadų konstrukcijas vertinimui.

3.3.3. Įvairių charakteristikų vėdinami fasadai

Šiame skyriuje pateikti tų pačių konstrukcijų šilumos perdavimo koeficientai, kurie 1.6. skyriuje buvo apskaičiuoti 3D skaitinio modeliavimo metodu ir apytiksle empirine skaičiavimo procedūra (pagal Statybinės fizikos laboratorijos ataskaitą Nr. 109/18). Šiame skyriuje vėdinamų fasadų šilumos perdavimas apskaičiuotas pagal pakoreguotą empirinę procedūrą (lygtys (27) ir (28)) ir palygintas su ankstesniais 3D skaitinio metodo rezultatais (3.11 lentelė). Fasadų šiluminių ir geometrinių savybių aprašymai pateikti 2 priede.

3.11 lentelė. Vėdinamų fasadų šilumos perdavimo koeficientai, apskaičiuoti skirtingais metodais (sudaryta autorės pagal Statybinės fizikos laboratorijos ataskaitą Nr. 109/18)

Vėdinamo fasado konstrukcija*		Apskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientas U, W/(m ² ·K)		
Eil. Nr.	Tvirtinimo elementų šilumos laidumas λ, W/(m·K)	EN ISO 10211-1 (HEAT3)	Pakoreguota empirinė skaičiavimo procedūra	Skirtumas, %
1.1.	1	0,150	0,158	5,3
1.2.	17	0,164	0,172	5,0
1.3.	50	0,171	0,182	6,4
1.4.	160	0,176	0,198	12,4
1.5.	230	0,177	0,204	15,4
2.1.	1	0,191	0,204	6,6
2.2.	17	0,227	0,227	-0,1
2.3.	50	0,265	0,243	-8,2
2.4.	160	0,305	0,268	-12,1
2.5.	230	0,313	0,278	-11,2
3.1.	1	0,184	0,196	6,4
3.2.	17	0,215	0,218	1,5
3.3.	50	0,241	0,233	-3,2
3.4.	160	0,264	0,256	-2,7
3.5.	230	0,268	0,266	-1,0
4.1.	1	0,179	0,190	6,2
4.2.	17	0,207	0,211	1,6

4.3.	50	0,231	0,225	-2,9
4.4.	160	0,252	0,247	-2,3
4.5.	230	0,257	0,255	-0,5
5.1.	1	0,095	0,109	14,8
5.2.	17	0,116	0,133	14,2
5.3.	50	0,141	0,149	5,6
5.4.	160	0,170	0,173	2,1
5.5.	230	0,177	0,183	3,5
6.1.	1	0,050	0,065	30,0
6.2.	17	0,072	0,090	25,5
6.3.	50	0,096	0,107	11,4
6.4.	160	0,125	0,133	7,2
6.5.	230	0,131	0,144	9,5

*Konstrukcijų aprašymai pateikti 2 priede.

Palyginus vėdinamų fasadų šilumos perdavimo koeficientus, apskaičiuotus 3D skaitiniu metodu ir pakoreguota empirine procedūra, pastebėta, kad gaunami didesni skirtumai nei 3.3.1. ir 3.3.2. skyriuose. Didžiausi skirtumai – iki 30 % – gauti tuo atveju, kai fasado konstrukcija apšiltinta 400 mm storio ir $0,020 W/m \cdot K$ šiluminio laidumo termoizoliaciniu sluoksniu, kurį kerta mažiausio šiluminio laidumo plastikinės ar nerūdijančio plieno jungtys. Kai termoizoliacinio sluoksnio storis lieka tas pats – 400 mm, bet jo šilumos laidumo koeficientas padidėja iki $0,040 W/m \cdot K$, sienų su plastikinėmis ir nerūdijančio plieno jungtimis šilumos perdavimo verčių skirtumai sumažėja dvigubai. Konstrukcijų 1.1.–1.5. ir 2.1.–2.5. laikančiojo sluoksnio storis buvo 150 mm, o šilumos laidumas atitinkamai – $0,10 W/m \cdot K$ ir $2,50 W/m \cdot K$. Šios ribinės laikančiojo sluoksnio šilumos laidumo vertės taip pat lėmė žymesnius sienos šilumos perdavimo rezultatų skirtumus – iki 15 %. Kitų analizuotų sienų konstrukcijų skaitiniu metodu ir pagal pakoreguotą lygtį apskaičiuotų šilumos perdavimo koeficientų skirtumai nežymūs – iki 6 %. Pastebėjus žymesnius rezultatų skirtumus, nustatyti pakoreguotos empirinės skaičiavimo procedūros taikymo apribojimai.

3.4. Pakoreguotos apytikslės skaičiavimo procedūros rekomendacijos praktikai ir jos taikymo apribojimai

Pakoreguota empirinė skaičiavimo procedūra gali būti taikoma fasadų sistemų su oro tarpu ir be jo šilumos perdavimo koeficientui apskaičiuoti. Sienos konstrukcijose esantis oro tarpas gali būti vėdinamas arba nevėdinamas. Taikant pakoreguotą apytikslę skaičiavimo procedūrą šilumos perdavimui per sienos konstrukciją su ją kertančiomis metalinėmis jungtimis turi būti laikomasi šių sąlygų ir apribojimų:

1. nustatytos priklausomybės turi būti taikomos atskirai konstrukcijoms be oro tarpo ir su oro tarpu, kuris gali būti vėdinamas arba nevėdinamas.

Taikant pakoreguotą skaičiavimo procedūrą konstrukcijai su oro tarpu, jo vėdinimo pobūdis įvertinamas skaičiuojant konstrukcijos be jungčių šilumos perdavimo koeficientą;

2. sienų konstrukcijų termoizoliaciniai sluoksniai gali būti iš polimerinių arba pluoštinių termoizoliacinių medžiagų, tačiau jų oro pralaidumo savybės bei montavimo būdas turi užtikrinti, kad nebūtų oro judėjimo, sukeliančio šiluminę konvekciją. Šio reikalavimo nepaisymas gali reikšmingai paveikti skaičiavimo rezultatus, kadangi susidarys konvekciniai šilumos mainai tarp jungčių ir judančio oro termoizoliaciniame sluoksnyje;
3. nors tyrimų metu nustatyta, kad jungčių skerspjūvio plotas neturi reikšmingo poveikio koeficiento a pokyčiui, tačiau tyrimai buvo atlikti tik su dažniausiai naudojamomis stačiakampio skerspjūvio jungtimis, kurių aukštis – nuo 50 mm iki 150 mm, o storis – 3 mm, todėl apytikslė pakoreguota skaičiavimo procedūra gali būti taikoma sienų konstrukcijų su stačiakampio skerspjūvio ir panašių matmenų jungtimis šilumos perdavimui apskaičiuoti;
4. pakoreguota apytikslė skaičiavimo procedūra negali būti taikoma konstrukcijoms su mažesniu kaip 100 mm storio termoizoliaciniu sluoksniu, kur šilumai laidžių jungčių poveikis bus jaučiamas visame termoizoliacinio sluoksnio storyje. Tokiu atveju šilumos mainų schema tarp jungties ir aplinkos pakinta ir gali lemti reikšmingas skaičiavimų paklaidas;
5. pakoreguota apytikslė skaičiavimo procedūra negali būti taikoma konstrukcijoms, kurių laikančiojo pagrindo šiluminė varža lygi arba didesnė už termoizoliacinio sluoksnio varžą. Tokiu atveju santykio $\left(\frac{R_1}{R_{tot}}\right)^2$ vertė tampa labai maža, todėl šilumos perdavimo koeficiento pataisos vertė ΔU_c reikšmingai sumažėja. Tai gali lemti didesnes skaičiavimo rezultatų paklaidas, kadangi visas konstrukcijos termoizoliacinis sluoksnis su jį kertančiomis jungtimis yra žemesnėje aplinkos temperatūroje, o tai lemia šilumos mainų tarp jungčių ir išorinės aplinkos pokyčius.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Eksperimentiniu „karštosios dėžės“ ir 3D skaitinio modeliavimo metodais gauti sienų fragmentų šilumos perdavimo koeficientai skiriasi nežymiai, kaip ir šiais metodais išmatuotos ir apskaičiuotos sienos fragmentų taškų šalia šilumai laidžių jungčių temperatūros. Šie nedideli skirtumai susidaro dėl skirtingo kontakto tarp jungčių ir termoizoliacinių plokščių eksperimentiniame sienos fragmente ir skaitiniame modelyje.

2. Išanalizavus šilumos perdavimo koeficiento pataisos apskaičiavimo empirinę lygtį nustatyta, kad joje esančio pataisos koeficiento 0,8 fizikinė prasmė neaiški, todėl skaitinio modeliavimo metodu atlikti išsamūs šilumos srauto per sienų konstrukcijas su ir be oro tarpo tyrimai, siekiant nustatyti priklausomybes tarp šilumos srauto

intensyvumo ir reikšmingiausių poveikį turinčių konstrukcijų elementų šiluminių ir geometrinių parametrų.

3. Atlikus sienų konstrukcijų, keičiant metalinių jungčių matmenis ir šilumos laidumą bei termoizoliacinio sluoksnio storį, tyrimus nustatyta, kad šilumos perdavimo prieaugis dėl jungčių poveikio ΔU_c daugiausiai priklauso nuo jungčių ilgio ir šilumos laidumo. Nustačius šilumos srauto nuo šių reikšmingiausių parametrų priklausomybes, buvo išvesti du nauji šilumos perdavimo pataisos dėl jungčių poveikio empirinės skaičiavimo lygties pataisos koeficientai – konstrukcijoms su oro tarpu ir konstrukcijoms be oro tarpo.

4. Taikant pakoreguotą empirinę šilumos perdavimo skaičiavimo procedūrą gauti fasadų sistemų šilumos perdavimo koeficientai nežymiai skiriasi nuo apskaičiuotų skaitinio modeliavimo metodu, įvertinus šiai procedūrai nustatytus apribojimus.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Pastatų fasadų sistemų termoizoliacinius sluoksnius kertančios metalinės jungtys sukuria taškinius šiluminius tiltelius, reikšmingai padidinančius šilumos perdavimą. Standartinės apytikslės empirinės procedūros taikymas pastato fasado taškinių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientams suskaičiuoti gali 30 % padidinti pastato energijos sąnaudas šildymui, todėl tikslesnis šių tiltelių šiluminių savybių nustatymas yra svarbus pastatų energinio efektyvumo vertinimo sistemos tobulinimo uždavinys.

2. Eksperimentiniai sienų fragmentų su šilumai laidžiomis jungtimis tyrimai „karštosios dėžės“ metodu patvirtino 3D skaitinio modeliavimo metodo tinkamumą išsamiems šilumos perdavimo per fasadų sistemas su oro tarpais ir be jų tyrimams.

3. Esminis fasadų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimo, taikant standartinę lygtį, trūkumas – lygtyje neįvertintos jungties šilumos mainų su konstrukcijos aplinka sąlygos.

4. Ryšys tarp jungties šilumos laidumo ir šilumos perdavimo per termoizoliacinį sluoksnį su jungtimis padidėjimo nėra tiesioginis: kuo didesnis jungties medžiagos šilumos laidumas, tuo mažesnė šilumos srauto dalis per jungtį turi būti įtraukta į bendrą sienos konstrukcijos šilumos perdavimą. Šis santykis priklauso nuo jungties paviršiaus ploto, per kurį šiluma patenka iš vidaus aplinkos į jungtį ir iš jungties – į išorę.

5. Didėjant fasadų termoizoliacinio sluoksnio storiui, didžiausią šiluminį laidumą turinčių aliuminio lydinio jungčių poveikis bendram šilumos perdavimui reikšmingai nesikeičia, o mažesnio šiluminio laidumo plieninių ar nerūdijančio plieno jungčių poveikis netgi sumažėja. Ši nustatyta tendencija suteikia papildomų galimybių fasadų šiltinimo sistemas su šilumai laidžiomis jungtimis naudoti aukšto energinio naudingumo pastatuose.

6. Fasadų sistemų šilumos perdavimo koeficientų vertės, apskaičiuotos taikant pakoreguotą apytikslę procedūrą, skiriasi nuo kitų mokslininkų 3D skaitinio modeliavimo metodu apskaičiuotų verčių ne daugiau kaip 5 %. Atsižvelgiant į taikymo apribojimus, patikslinta skaičiavimo lygtis gali būti taikoma empiriškai apskaičiuoti sienų konstrukcijų su šilumai laidžiomis jungtimis šilumos perdavimą praktiniais tikslais.

LITERATŪROS SARAŠAS

- Akustika. Orinės varžos nustatymas. 1 dalis. Statinio oro srauto metodas (ISO 9053-1:2018). (2019). (2019-03-29. ed.): Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Al-Sanea, S. A., & Zedan, M. F. (2012). Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions. [Article]. *Applied Energy*, 98, 584–593.
- Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. [Article]. *Energy and Buildings*, 42(11), 2177–2183.
- Arkadiusz, U., Joanna, S., & Dorota, W.-M. (2017). Analysis of thermal properties and heat loss in construction and isothermal materials of multilayer building walls. *Advances in science & technology, research journal*, 11(2), 33–37.
- Asdrubali, F., & Baldinelli, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. [Article]. *Energy and Buildings*, 43(7), 1618–1626.
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2012). A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. [Article; Proceedings Paper]. *Applied Energy*, 97, 365–373.
- Asdrubali, F., D'alessandro, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2014). Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 1(C), 53–59.
- Baldinelli, G., Bianchi, F., Rotili, A., Costarelli, D., Seracini, M., Vinti, G., et al. (2018). A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography. [Article]. *Applied Energy*, 211, 854–864.
- Barreira, E., Almeida, R., & Delgado, J. (2016). Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. [Article]. *Construction and Building Materials*, 110, 251–269.
- Barreira, E., Almeida, R., & Moreira, M. (2017). An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings. [Article]. *Energy and Buildings*, 140, 224–235.
- Ben Larbi, A. (2005). Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings. [Article]. *Energy and Buildings*, 37(9), 945–951.
- Ben Larbi, A., Couchaux, M., & Bouchair, A. (2017). Thermal and mechanical analysis of thermal break with end-plate for attached steel structures. [Article]. *Engineering Structures*, 131, 362–379.
- Berardi, U., & Akos, L. (2019). Thermal bridges of metal fasteners for aerogel-enhanced blankets. [Article]. *Energy and Buildings*, 185, 307–315.
- Bergero, S., & Chiari, A. (2018). The influence of thermal bridge calculation method on the building energy need: a case study. [Proceedings Paper]. *Ati 2018 - 73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*, 148, 1042–1049.

- Bienvenido-Huertas, D., Bermudez, J., Moyano, J., & Marin, D. (2019). Comparison of quantitative IRT to estimate U-value using different approximations of ECHTC in multi-leaf walls. [Article]. *Energy and Buildings*, 184, 99–113.
- Bienvenido-Huertas, D., Moyano, J., Marin, D., & Fresco-Contreras, R. (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. [Review]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 102, 356–371.
- Bienvenido-Huertas, D., Quinones, J. A. F., Moyano, J., & Rodriguez-Jimenez, C. E. (2018). Patents Analysis of Thermal Bridges in Slab Fronts and Their Effect on Energy Demand. [Article]. *Energies*, 11(9), 18.
- Bienvenido-Huertas, D., Rodriguez-Alvaro, R., Moyano, J. J., Rico, F., & Marin, D. (2018). Determining the U-Value of Facades Using the Thermometric Method: Potentials and Limitations. [Article]. *Energies*, 11(2), 17.
- Bjarlov, S. P., & Vladykova, P. (2011). The potential and need for energy saving in standard family detached and semi-detached wooden houses in arctic Greenland. [Article]. *Building and Environment*, 46(8), 1525–1536.
- Boafo, F. E., Kim, J. H., & Kim, J. T. (2019). Numerical study of slim curtain wall spandrel with integrated vacuum insulation panel: Concept, performance evaluation and challenges. [Article]. *Energy and Buildings*, 183, 139–150.
- Bruma, B., Moga, L., & Moga, I. (2016). Aspects regarding dynamic calculation of plan building elements having thermal bridges. [Proceedings Paper]. *Eenviro-Yrc 2015 - Bucharest*, 85, 77–84.
- Buzatu, G. C., Stan-Ivan, F. E., Mircea, P. M., Manescu, L. G., & Ieee. (2017). Thermal transmittance determination for different components of buildings. [Proceedings Paper]. *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (Optim) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (Acemp)*, 227–232.
- Capozzoli, A., Gorrino, A., & Corrado, V. (2013). A building thermal bridges sensitivity analysis. [Article]. *Applied Energy*, 107, 229–243.
- Cappelletti, F., Gasparella, A., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls. [Article]. *Energy and Buildings*, 43(6), 1435–1442.
- Ciampi, M., Lecce, F., & Tuoni, G. (2003). Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy*, 75(6), 491–502.
- Colinart, T., Bendouma, M., & Glouannec, P. (2019). Building renovation with prefabricated ventilated facade element: A case study. [Article]. *Energy and Buildings*, 186, 221–229.
- Daza, A. N., & Zamora, J. L. (2019). Acoustic performance in a lightweight ventilated facade for building refurbishment: analysing the impact of variations in airborne sound insulation according to the ventilation characteristics. [Article]. *Revista De La Construccion*, 18(2), 247–257.
- de Freitas, S. S., de Freitas, V. P., & Barreira, E. (2014). Detection of facade plaster detachments using infrared thermography - A nondestructive technique. [Article]. *Construction and Building Materials*, 70, 80–87.

- de Freitas, J. R., & da Cunha, E. G. (2018). Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches. [Article]. *Energy and Buildings*, 169, 271–282.
- Desogus, G., Mura, S., & Ricciu, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. [Article]. *Energy and Buildings*, 43(10), 2613–2620.
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union L 153/13*, 2010. (2010). Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>.
- Donatelli, A., Aversa, P., & Luprano, V. A. M. (2016). Set-up of an experimental procedure for the measurement of thermal transmittances via infrared thermography on lab-made prototype walls. [Article]. *Infrared Physics & Technology*, 79, 135–143.
- Dumitrescu, L., Baran, I., & Pescaru, R. A. (2017). The Influence of Thermal Bridges in the Process of Buildings Thermal Rehabilitation. [Proceedings Paper]. *10th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, Inter-Eng 2016*, 181, 682–689.
- Edis, E., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2014). Passive thermographic detection of moisture problems in facades with adhered ceramic cladding. [Article]. *Construction and Building Materials*, 51, 187–197.
- Erkoreka, A., Garcia, E., Martin, K., Teres-Zubiaga, J., & Del Portillo, L. (2016). In-use office building energy characterization through basic monitoring and modelling. [Article]. *Energy and Buildings*, 119, 256–266.
- Escudero, C., Martin, K., Erkoreka, A., Flores, I., & Sala, J. M. (2013). Experimental thermal characterization of radiant barriers for building insulation. [Article]. *Energy and Buildings*, 59, 62–72.
- Evola, G., Margani, G., & Marietta, L. (2011). Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate. [Article]. *Energy and Buildings*, 43(9), 2385–2393.
- Falk, J., & Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process. [Article]. *Building and Environment*, 60, 173–184.
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., & De Wilde, P. (2015). Time-lapse thermography for building defect detection. [Article]. *Energy and Buildings*, 92, 95–106.
- Gao, Y., Roux, J. J., Teodosiu, C., & Zhao, L. H. (2004). Reduced linear state model of hollow blocks walls, validation using hot box measurements. [Article]. *Energy and Buildings*, 36(11), 1107–1115.
- Garay, R., Uriarte, A., & Apraiz, I. (2014). Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building facade. [Article]. *Energy and Buildings*, 85, 579–591.
- Gaspar, K., Casals, M., & Gangolells, M. (2016). A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of facades U-value. [Article]. *Energy and Buildings*, 130, 592–599.

- Gaspar, K., Casals, M., & Gangoellés, M. (2018). In situ measurement of fa ades with a low U-value: Avoiding deviations. [Article]. *Energy and Buildings*, 170, 61–73.
- Ge, H., & Baba, F. (2015). Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building. [Article]. *Energy and Buildings*, 105, 106–118.
- Ge, H., McClung, V. R., & Zhang, S. S. (2013). Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. [Article]. *Energy and Buildings*, 60, 163–173.
- Genova, E., & Fatta, G. (2018). The thermal performances of historic masonry: In-situ measurements of thermal conductance on calcarenite stone walls in Palermo. [Article]. *Energy and Buildings*, 168, 363–373.
- Ghazi Wakili, K., Simmler, H., & Frank, T. (2007). Experimental and numerical thermal analysis of a balcony board with integrated glass fibre reinforced polymer GFRP elements. [Article]. *Energy and Buildings*, 39(1), 76–81.
- Ghazi Wakili, K., & Tanner, C. (2003). U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks - Hot box measurement versus numerical analysis. [Article]. *Energy and Buildings*, 35(7), 675–680.
- Gomes, A. P., de Souza, H. A., & Tribess, A. (2013). Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil. [Article]. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 84–89.
- Gorgolewski, M. (2007). Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. [Article]. *Building and Environment*, 42(1), 230–236.
- Goulouti, K., de Castro, J., Vassilopoulos, A. P., & Keller, T. (2014). Thermal performance evaluation of fiber-reinforced polymer thermal breaks for balcony connections. [Article]. *Energy and Buildings*, 70, 365–371.
- Grauer, M. (2019). Ventilated rainscreen cladding system subframe contribution to annual source energy use in mid-size office buildings. [Article]. *Energy and Buildings*, 187, 269–280.
- Guillen, I., Gomez-Lozano, V., Fran, J. M., & Lopez-Jimenez, P. A. (2014). Thermal behavior analysis of different multilayer facade: Numerical model versus experimental prototype. [Article]. *Energy and Buildings*, 79, 184–190.
- Ibrahim, M., Biwole, P. H., Wurtz, E., & Achard, P. (2014). Limiting windows offset thermal bridge losses using a new insulating coating. [Article]. *Applied Energy*, 123, 220–231.
- Ilomets, S., Kuusk, K., Paap, L., Arumagi, E., & Kalamees, T. (2017). Impact of linear thermal bridges on thermal transmittance of renovated apartment buildings. [Article]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(1), 96–104.
- Isaia, F., Fantucci, S., Capozzoli, A., & Perino, M. (2017). Thermal bridges in vacuum insulation panels at building scale. [Article; Proceedings Paper]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Engineering Sustainability*, 170(1), 47–60.
- Ji, R., Guo, S., & Wei, S. (2020). Evaluation of anchor bolt effects on the thermal performance of building insulation materials. [Journal Article]. *Journal of Building Engineering*, 29, 101200.

- Ji, R., Zhang, Z. T., He, Y., Liu, J., & Qu, S. L. (2017). Simulating the effects of anchors on the thermal performance of building insulation systems. [Article]. *Energy and Buildings*, 140, 501–507.
- Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. [Review]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 415–425.
- Kim, S. H., Kim, J. H., Jeong, H. G., & Song, K. D. (2018). Reliability Field Test of the Air-Surface Temperature Ratio Method for In Situ Measurement of U-Values. [Article]. *Energies*, 11(4), 15.
- Kim, S. H., Lee, J. H., Kim, J. H., Yoo, S. H., & Jeong, H. G. (2018). The Feasibility of Improving the Accuracy of In Situ Measurements in the Air-Surface Temperature Ratio Method. [Article]. *Energies*, 11(7), 18.
- Kirimtat, A., & Krejcar, O. (2018). A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects. [Review]. *Energy and Buildings*, 176, 390–406.
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. [Article]. *Applied Energy*, 134, 531–549.
- Lehmann, B., Ghazi Wakili, K., Frank, T., Collado, B. V., & Tanner, C. (2013). Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. [Article]. *Applied Energy*, 110, 29–43.
- Levinskytė, A., Banionis, K., & Geležiūnas, V. (2016). *The influence of thermal bridges for buildings energy consumption of "A" energy efficiency class*. Kaunas University of Technology, Kaunas.
- Levinskytė, A., Blūdžius, R., & Kapačiūnas, R. (2018). The comparison of a numerical and empirical calculation of thermal transmittance of ventilated facade with different heat-conductive connections. *Journal of sustainable architecture and civil engineering*, 23(2), 39–48.
- Lipnevič, A. (2015). Daugiabučių namų atnaujinimas Lietuvoje: problemos ir gyventojų iniciatyva. *Viešojo politika ir administravimas*, 14(2), 177–193.
- Lopez, F. P., & Santiago, M. R. D. (2015). Sensitivity study of an opaque ventilated facade in the winter season in different climate zones in Spain. [Article]. *Renewable Energy*, 75, 524–533.
- LST EN ISO 8990:1999. Termoizoliacija. Nuostoviojo šilumos perdavimo savybių nustatymas. Saugiosios karštos ir kalibruotos dėžės metodai(ISO 8990:1994). (1999). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Lu, X. R., & Memari, A. (2019). Application of infrared thermography for in-situ determination of building envelope thermal properties. [Article]. *Journal of Building Engineering*, 26, 12.
- Lucchi, E. (2018). Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. [Review]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 3077–3090.
- Manzan, M., De Zorzi, E. Z., & Lorenzi, W. (2015). Experimental and numerical comparison of internal insulation systems for building refurbishment.

- [Proceedings Paper]. *70th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Ati2015*, 82, 493–498.
- Manzan, M., De Zorzi, E. Z., & Lorenzi, W. (2018). Numerical simulation and sensitivity analysis of a steel framed internal insulation system. [Article]. *Energy and Buildings*, 158, 1703–1710.
- Mao, S., Kan, A. K., & Wang, N. (2020). Numerical analysis and experimental investigation on thermal bridge effect of vacuum insulation panel. [Article]. *Applied Thermal Engineering*, 169, 10.
- Marinosci, C., Semprini, G., & Morini, G. L. (2014). Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen facade building. [Article]. *Energy and Buildings*, 72, 280–287.
- Maroy, K., Carbonez, K., Steeman, M., & Van den Bossche, N. (2017). Assessing the thermal performance of insulating glass units with infrared thermography: Potential and limitations. [Article]. *Energy and Buildings*, 138, 175–192.
- Martin, K., Campos-Celador, A., Escudero, C., Gomez, I., & Sala, J. M. (2012). Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility. [Article]. *Energy and Buildings*, 50, 139–149.
- Martin, K., Erkoreka, A., Flores, I., Odriozola, M., & Sala, J. M. (2011). Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. [Article]. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 529–535.
- Martinez, R. G. (2017). Highly Insulated Systems for Energy Retrofitting of Facades on its Interior. [Proceedings Paper]. *Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale*, 38, 3–10.
- Meng, X., Gao, Y. N., Wang, Y., Yan, B. A., Zhang, W., & Long, E. S. (2015). Feasibility experiment on the simple hot box-heat flow meter method and the optimization based on simulation reproduction. [Article]. *Applied Thermal Engineering*, 83, 48–56.
- Meng, X., Luo, T., Gao, Y. N., Zhang, L. L., Shen, Q. O., & Long, E. S. (2017). A new simple method to measure wall thermal transmittance in situ and its adaptability analysis. [Article]. *Applied Thermal Engineering*, 122, 747–757.
- Misiopecki, C., Bouquin, M., Gustavsen, A., & Jelle, B. P. (2018). Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position. [Article]. *Energy and Buildings*, 158, 1079–1086.
- Nardi, I., Lucchi, E., de Rubeis, T., & Ambrosini, D. (2018). Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. [Article]. *Building and Environment*, 146, 190–205.
- Nardi, I., Perilli, S., de Rubeis, T., Sfarra, S., & Ambrosini, D. (2019). Influence of insulation defects on the thermal performance of walls. An experimental and numerical investigation. [Article]. *Journal of Building Engineering*, 21, 355–365.
- Nowak, K., & Byrdy, A. (2019). Effect of mounting brackets on thermal performance of buildings with ventilated facades. [Article]. *Journal of Building Physics*, 43(1), 46–56.

- O'Grady, M., Lechowska, A. A., & Harte, A. M. (2017). Quantification of heat losses through building envelope thermal bridges influenced by wind velocity using the outdoor infrared thermography technique. [Article]. *Applied Energy*, 208, 1038–1052.
- Ohlsson, K. E. A., & Olofsson, T. (2014). Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface. [Article]. *Applied Energy*, 134, 499–505.
- Olsson, L. (2018). Rain resistance of facades with facade details: A summary of three field and laboratory studies. [Article]. *Journal of Building Physics*, 41(6), 521–532.
- Pastato komponentai ir elementai. Šiluminė varža ir šilumos perdavimo koeficientas. Skaičiavimo metodai (ISO 6946:2017). (2017). (2017-11-30. ed.). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Patania, F., Gagliano, A., Nocera, F., Ferlito, A., & Galesi, A. (2010). Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades. [Article]. *Energy and Buildings*, 42(7), 1148–1155.
- Porras-Amores, C., Mazarron, F. R., & Canas, I. (2013). Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature. [Article]. *Energy and Buildings*, 65, 292–298.
- Quinten, J., & Feldheim, V. (2016). Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method. [Article]. *Energy and Buildings*, 110, 284–293.
- Rasooli, A., & Itard, L. (2018). In-situ characterization of walls' thermal resistance: An extension to the ISO 9869 standard method. [Article]. *Energy and Buildings*, 179, 374–383.
- Rasooli, A., Itard, L., & Ferreira, C. I. (2016). A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings. [Article]. *Energy and Buildings*, 119, 51–61.
- Recatala, M. A., Morales, S. G., & van den Bossche, N. (2018). Experimental assessment of rainwater management of a ventilated facade. [Article]. *Journal of Building Physics*, 42(1), 38-67.
- Rodler, A., Guernouti, S., & Musy, M. (2019). Bayesian inference method for in situ thermal conductivity and heat capacity identification: Comparison to ISO standard. [Article]. *Construction and Building Materials*, 196, 574–593.
- Roque, E., Vicente, R., Almeida, R. M. S. F., Mendes Da Silva, J., & Vaz Ferreira, A. (2020). Thermal characterisation of traditional wall solution of built heritage using the simple hot box–heat flow meter method: In situ measurements and numerical simulation. *Applied Thermal Engineering*, 169.
- Sadauskiene, J., Ramanauskas, J., Seduikyte, L., Dauksys, M., & Vasylius, A. (2015). A Simplified Methodology for Evaluating the Impact of Point Thermal Bridges on the High-Energy Performance of a Passive House. [Article]. *Sustainability*, 7(12), 16687–16702.
- Sala, J. M., Urresti, A., Martin, K., Flores, I., & Apaolaza, A. (2008). Static and dynamic thermal characterisation of a hollow brick wall: Tests and numerical analysis. [Article]. *Energy and Buildings*, 40(8), 1513–1520.

- Santos, P., Goncalves, M., Martins, C., Soares, N., & Costa, J. J. (2019). Thermal transmittance of lightweight steel framed walls: Experimental versus numerical and analytical approaches. [Article]. *Journal of Building Engineering*, 25, 14.
- Sierra, F., Gething, B., Bai, J. P., & Maksoud, T. (2017). Impact of the position of the window in the reveal of a cavity wall on the heat loss and the internal surface temperature of the head of an opening with a steel lintel. [Review]. *Energy and Buildings*, 142, 23–30.
- Soares, N., Martins, C., Goncalves, M., Santos, P., da Silva, L. S., & Costa, J. J. (2019). Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review. [Review]. *Energy and Buildings*, 182, 88–110.
- Song, J. H., Lim, J. H., & Song, S. Y. (2016). Evaluation of alternatives for reducing thermal bridges in metal panel curtain wall systems. [Article]. *Energy and Buildings*, 127, 138–158.
- Sprengard, C., & Holm, A. H. (2014). Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions. [Article]. *Energy and Buildings*, 85, 638–643.
- Statybinių konstrukcijų šilumos tilteliai. Šilumos srautai ir paviršiaus temperatūros. Detalieji skaičiavimai (ISO 10211:2017). (2017). (2017-11-30.; Lietuviška versija: 2018-02-28. ed.). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
- STR 2.01.02:2016 Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas. (2016). Vilnius: Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija.
- STR 2.04.01:2018 Pastatų atitvaros. sienos, stogai, langai ir išorinės įėjimo durys. (2018). Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija.
- STR 2.05.06:2005. Aliuminių konstrukcijų projektavimas. (2005). Vilnius: Rekona.
- STR 2.05.08:2005. Plieninių konstrukcijų projektavimas. Pagrindinės nuostatos. (2005). Vilnius: Rekona.
- Tadeu, A., Simoes, I., Simoes, N., & Prata, J. (2011). Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. [Article]. *Energy and Buildings*, 43(12), 3685–3695.
- Taylor, T., Counsell, J., & Gill, S. (2014). Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building facades. [Article]. *Energy and Buildings*, 76, 130–142.
- Teni, M., Krstic, H., & Kosinski, P. (2019). Review and comparison of current experimental approaches for in-situ measurements of building walls thermal transmittance. [Review]. *Energy and Buildings*, 203, 17.
- Tenpierik, M., & Cauberg, H. (2007). Analytical models for calculating thermal bridge effects caused by thin high barrier envelopes around vacuum insulation panels. [Article]. *Journal of Building Physics*, 30(3), 185–215.
- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., & Bikas, D. (2017). Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades. [Proceedings Paper]. *Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale*, 38, 397–404.

- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Tsoka, S., & Chastas, P. (2019). Thermal bridging problems on advanced cladding systems and smart building facades. [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 214, 62–69.
- Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. [Article]. *Energy and Buildings*, 40(11), 2083–2089.
- Theodosiou, T. G., Tsikaloudaki, A. G., Kontoleon, K. J., & Bikas, D. K. (2015). Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades. [Article]. *Energy and Buildings*, 109, 377–384.
- Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance Heat flow meter method. (2014). (2014-07-29. ed.). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus. (1991). (1991-08-08. ed.): Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Ujma, A., & Pomada, M. (2019). Analysis of the temperature distribution in the place of fixing the ventilated facade. *E3S Web of Conferences*, 97.
- Viot, H., Sempey, A., Pauly, M., & Mora, L. (2015). Comparison of different methods for calculating thermal bridges: Application to wood-frame buildings. [Article]. *Building and Environment*, 93, 339–348.
- Woltman, G., Noel, M., & Fam, A. (2017). Experimental and numerical investigations of thermal properties of insulated concrete sandwich panels with fiberglass shear connectors. [Article]. *Energy and Buildings*, 145, 22–31.
- Woltman, G., Tomlinson, D., & Fam, A. (2013). Investigation of Various GFRP Shear Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. [Article]. *Journal of Composites for Construction*, 17(5), 711–721.
- Zalewski, L., Lassue, S., Rouse, D., & Boukhalfa, K. (2010). Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. [Article]. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2869–2877.
- Šiluminės pastatų charakteristikos. Pastatų atitvarų šiluminio nevienalytiškumo aptikimas. Infraraudonosios spinduliuotės metodas (ISO 6781:1983 modifikuotas). (2000). (2000-12-04. ed.): Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Šiluminės pastatų komponentų charakteristikos. Dinaminės šiluminės charakteristikos. Skaičiavimo metodai (ISO 13786:2017, pataisyta 2018-03 versija). (2017). (2017-11-30. ed.): Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Šiluminės statybinių medžiagų ir gaminių savybės. Šiluminės varžos nustatymas apsaugotos karštosios plokštės ir šilumos srauto matuoklio metodais. Didelės ir vidutinės šiluminės varžos gaminiai. (2002). (2002-05-02. ed.): Lietuvos standartizacijos departamentas.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

STRAIPSNIAI RECENZUOJAMUOSE MOKSLO LEIDINIUOSE

Web of Science duomenų bazėje indeksuotuose leidiniuose su cituojamumo rodikliu (JCR SCIE)

Tarptautinėse leidyklose

1. **Stonkuvienė, Aurelija**; Bliūdžius, Raimondas; Burlingis, Arūnas; Ramanauskas, Juozas. The impact of connector's thermal and geometrical characteristics on the energy performance of facade systems // Journal of building engineering. Amsterdam: Elsevier. ISSN 2352-7102. 2021, vol. 35, art. no. 102085, p. 1-13. DOI: 10.1016/j.jobee.2020.102085. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus] [IF: 3,379; AIF: 3,177; IF/AIF: 1,063; Q1 (2019, InCites JCR SCIE)] [M.kr.: T 002].

Web of Science duomenų bazėje indeksuotuose leidiniuose be cituojamumo rodiklio (JCR SCIE)

Tarptautinėse leidyklose

1. **Levinskytė, Aurelija**; Bliūdžius, Raimondas; Burlingis, Arūnas; Makaveckas, Tomas. Dependencies of heat transmittance through the ventilated wall system on thermal conductivity of connectors crossing thermal insulation layer // MATEC web of conferences: 4th Central European symposium on building physics (CESBP 2019), Prague, Czech Republic, September 2-5, 2019. Les Ulis : EDP Sciences. eISSN 2261-236X. 2019, vol. 282, art. no. 2089, p. 1-7. DOI: 10.1051/mateconf/201928202089. [Conference Proceedings Citation Index - Science (Web of Science); DOAJ] [M.kr.: T 002].

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Nacionalinėse leidyklose

1. **Levinskytė, Aurelija**; Bliūdžius, Raimondas; Kapačiūnas, Robertas. The comparison of a numerical and empirical calculation of thermal transmittance of ventilated facade with different heat-conductive connections // Journal of sustainable architecture and civil engineering = Darnioji architektūra ir statyba. Kaunas: Technologija. ISSN 2029-9990. eISSN 2335-2000. 2018, vol. 23, iss. 2, p. 39-48. DOI: 10.5755/j01.sace.23.2.21204. [Index Copernicus] [M.kr.: T 002];

2. **Levinskytė, Aurelija**; Banionis, Karolis; Geležiūnas, Valdemaras. The influence of thermal bridges for buildings energy consumption of “A” energy efficiency class // Journal of sustainable architecture and civil engineering = Darnioji architektūra ir statyba. Kaunas: Technologija. ISSN 2029-9990. eISSN 2335-2000. 2016, vol. 14, iss. 2, p. 47-58. DOI: 10.5755/j01.sace.15.2.15351. [Index Copernicus] [M.kr.: T 002].

MOKSLINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ SKELBIMAS KONFERENCIJOSE

**Kitos konferencijų tezės ir straipsniai nerecenzuojamoje konferencijų
pranešimų medžiagoje**

1. **Levinskytė, Aurelija**; Bliūdžius, Raimondas; Kapačiūnas, Robertas. The comparison of a numerical and empirical calculation of thermal transmittance of ventilated facade with different heat-conductive connections // *Advanced construction 2018: proceedings of the 6th international scientific conference, September 20th, 2018, Kaunas, Lithuania: book of abstracts*. Kaunas: Kaunas University of Technology. ISSN 2029-1213. eISSN 2538-8983. 2018, p. 32-33. DOI: 10.5755/e01.2538-8983.2018. [M.kr.: T 002];

2. **Levinskytė, Aurelija**; Banionis, Karolis; Geležiūnas, Valdemaras. The influence of thermal bridges for buildings energy consumption of "A" energy efficiency class // *Advanced construction 2016: proceedings of the 5th international conference, 6 October, 2016, Kaunas, Lithuania*. Kaunas : Kaunas University of Technology. ISSN 2029-1213. 2016, p. 42. [M.kr.: T 002].

PRIEDAI

1 priedas

I. 24 mm storio cemento-drožlių šilumos laidumo matavimo duomenys.

KTU ARCHITEKTŪROS IR STATYBOS INSTITUTAS
STATYBINĖS FIZIKOS LABORATORIJA

GAMINIO ŠILUMINIŲ SAVYBIŲ MATAVIMAS

Matavimo prietaisas - Šilumos laidumo nustatymo prietaisas

Vieno bandinio simetrinis šilumos srauto matuoklis Nr.1/99 pagal ISO 8301

Matavimo standartas: **LST EN 12667**

Matavimo lapas Nr.: **09 - 10**

Matavimo data: **2018.09.11**

Bandinio kodas: **Aurelijos**

Bandinio medžiaga: **Cetris 24mm**

Bandinio paruošimas pagal:

Bandinio išlaikymo sąlygos:	T °C	RH%	Trukmė, h	Masės pokytis, %
	23	55	48	-

Šilumos srauto kryptis: **aukštyn**

Masė prieš matuojant (kg):	-	Tūris, m ³	-
Tankis prieš matuojant (kg/m ³):	#VALUE!		
Masė po matavimo (kg):	-		
Tankis po matavimo (kg/m ³):	#VALUE!		
Masės pokytis, %:	#VALUE!		

Visa bandymo trukmė, h:	3,0
Nuostovių sąlygų trukmė, h:	2,0
Matavimo trukmė, h:	0,50
Bandinio būklė:	orasausis
Bandinio matmenys plane (mm):	600 x 600
Bandinio storis (mm):	24,24
Storis matuotas pagal:	

Matavimo duomenys:	
karštosios plokštės temperatūra T(h)	16,21
karštosios plokštės šil.sr.tankis q(h)	57,61
šaltosios plokštės temperatūra T(c)	2,55
šaltosios plokštės šil.sr.tankis q(c)	58,70

Vidut. šilumos srauto tankis per bandinį q(vid), W/m ²	58,155
Vidut. temperatūros perkrytis per bandinį ΔT, K	5,28
Vidutinė bandinio temperatūra T(vid), °C	9,38

Vidutinis šilumos laidumo koeficientas λ, W/(m.K)	0,2672277	$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta t}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) +/-	0,001352	
	arba %	0,51

Vidutinė grynoji šiluminė varža R, (m ² .K)/W	0,090709	$R = \frac{\Delta t}{q}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) +/-	0,0004	
	arba %	0,42

Vidutinė aplinkos temperatūra, °C	10,11
Aplinkos oro santykinis drėgnumas, %	38,7

Šilumos srauto matuoklio aparato kalibravimo/patikros data	2017.01.13.
Kalibravimo/patikros etalonas	XPS-et
Kalibravimas / patikra galioja iki	2019.01.13.

PASTABOS:

Matavimą atliko:

A. Burlingis

II. 100 mm storio polistireninio putplasčio FF-EPS 100/100 FL šilumos laidumo matavimo duomenys.

KTU ARCHITEKTŪROS IR STATYBOS INSTITUTAS
STATYBINĖS FIZIKOS LABORATORIJA

GAMINIO ŠILUMINIŲ SAVYBIŲ MATAVIMAS

Matavimo prietaisas - šilumos laidumo nustatymo prietaisas

Vieno bandinio simetrinis šilumos srauto matuoklis Nr.1/99 pagal ISO 8301

Matavimo standartas: LST EN 12667

Matavimo lapas Nr. : 09 - 19

Matavimo data: 2018.09.19

Bandinio kodas : Aurelijos

Bandinio medžiaga : EPS100N

Bandinio paruošimas pagal:

Bandinio išlaikymo sąlygos:	T °C	RH%	Trukmė, h	Masės pokytis, %
	23	55	48	-

Šilumos srauto kryptis :	aukštyn
--------------------------	---------

Masė prieš matuojant (kg):	-	Tūris, m ³	-
Tankis prieš matuojant (kg/m ³):	#VALUE!		
Masė po matavimo (kg):	-		
Tankis po matavimo (kg/m ³):	#VALUE!		
Masės pokytis, % :	#VALUE!		

Visa bandymo trukmė, h:	3,0
Nuostovių sąlygų trukmė, h:	2,0
Matavimo trukmė, h:	0,50
Bandinio būklė:	orasausis
Bandinio matmenys plane (mm):	600 x 600
Bandinio storis (mm) :	97,69
Storis matuotas pagal:	

Matavimo duomenys :	
karštosios plokštės temperatūra T(h)	23,10
karštosios plokštės šil.sr.tankis q(h)	8,23
šaltosios plokštės temperatūra T(c)	-3,65
šaltosios plokštės šil.sr.tankis q(c)	8,86

Vidut. šilumos srauto tankis per bandinį q(vid), W/m ²	8,544
Vidut. temperatūros perkrytis per bandinį ΔT, K	26,75
Vidutinė bandinio temperatūra T(vid), °C	9,73

Vidutinis šilumos laidumo koeficientas λ, W/(m.K)	0,0312047	$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta t}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) : +/-	0,000540	
	arba %	1,73

Vidutinė grynoji šiluminė varža R, (m ² .K)/W	3,130701	$R = \frac{\Delta t}{q}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) : +/-	0,0541	
	arba %	1,73

Vidutinė aplinkos temperatūra, °C	10,31
Aplinkos oro santykinis drėgnis, %	35,8

Šilumos srauto matuoklio aparato kalibravimo/patikros data	2017.01.13.
Kalibravimo/patikros etalonas	XPS-et
Kalibravimas / patikra galioja iki	2019.01.13.

PASTABOS:

Matavimą atliko:

A. Burlingis

III. 100 mm storio polistireninio putplasčio FF-EPS 100/100 FL pakartotinio šilumos laidumo matavimo duomenys.

KTU ARCHITEKTŪROS IR STATYBOS INSTITUTAS
STATYBINĖS FIZIKOS LABORATORIJA

GAMINIO ŠILUMINIŲ SAVYBIŲ MATAVIMAS

Matavimo prietaisais - Šilumos laidumo nustatymo prietaisais

Vieno bandinio simetrinis šilumos srauto matuoklis Nr.1/99 pagal ISO 8301

Matavimo standartas: LST EN 12667

Matavimo lapas Nr. : 13-03

Matavimo data: 2019.03.13

Bandinio kodas : Aurelijos polistirenas

Bandinio medžiaga : EPS pilkasis

Bandinio paruošimas pagal:

Bandinio išlaikymo sąlygos:	T °C	RH%	Trukmė, h	Masės pokytis, %
	23	55	48	-

Šilumos srauto kryptis :	aukštyn
--------------------------	---------

Masė prieš matuojant (kg):	-	Tūns, m ³	-
Tankis prieš matuojant (kg/m ³):	#/VALUE!		
Masė po matavimo (kg):	-		
Tankis po matavimo (kg/m ³):	#/VALUE!		
Masės pokytis, % :	#/VALUE!		

Visa bandymo trukmė, h:	3,0
Nuostovių sąlygų trukmė, h:	2,0
Matavimo trukmė, h:	0,50
Bandinio būklė:	orasausis
Bandinio matmenys plane (mm):	600 x 600
Bandinio storis (mm) :	98,00
Storis matuotas pagal:	

Matavimo duomenys :	
karštosios plokštės temperatūra T(h)	21,79
karštosios plokštės šil.sr.tankis q(h)	7,49
šaltosios plokštės temperatūra T(c)	-1,82
šaltosios plokštės šil.sr.tankis q(c)	7,58

Vidut. šilumos srauto tankis per bandinį q(vid), W/m ²	7,537
Vidut. temperatūros perkrytis per bandinį ΔT, K	23,62
Vidutinė bandinio temperatūra T(vid), °C	9,98

Vidutinis šilumos laidumo koeficientas λ, W/(m.K)	0,0312742	$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta t}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) :+/-	0,000392	
arba %	1,25	

Vidutinė grynoji šiluminė varža R, (m ² .K)/W	3,133573	$R = \frac{\Delta t}{q}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) :+/-	0,0392	
arba %	1,25	

Vidutinė aplinkos temperatūra, °C	10,10
Aplinkos oro santykinis drėgnis, %	34,4

Šilumos srauto matuoklio aparato kalibravimo/patikros data	2018.10.18.
Kalibravimo/patikros etalonas	IRMM 440C
Kalibravimas / patikra galioja iki	2020.10.18.

PASTABOS: šilumos srautas horizontalus

Matavimą atliko:

A. Burlingis

IV. 100 mm storio mineralinės vatos ISOVER OL-E-100 šilumos laidumo matavimo duomenys.

KTU ARCHITEKTŪROS IR STATYBOS INSTITUTAS
STATYBINĖS FIZIKOS LABORATORIJA

GAMINIO ŠILUMINIŲ SAVYBIŲ MATAVIMAS

Matavimo prietaisas - Šilumos laidumo nustatymo prietaisas

Vieno bandinio simetrinis šilumos srauto matuoklis Nr.1/99 pagal ISO 8301

Matavimo standartas: **LST EN 12667**

Matavimo lapas Nr. : _____

Matavimo data: **2019.10.03**

Bandinio kodas: **Stiklo vatos plokštė ISOVER OL-E-100**

Bandinio medžiaga: **Aurelijos**

Bandinio paruošimas pagal: _____

Bandinio išlaikymo sąlygos:	T °C	RH%	Trukmė, h	Masės pokytis, %
	23	55	48	-

Šilumos srauto kryptis :	aukštyn
--------------------------	---------

Masė prieš matuojant (kg):		Tūris, m ³	
----------------------------	--	-----------------------	--

Tankis prieš matuojant (kg/m ³):	#DIV/0!
--	---------

Masė po matavimo (kg):	
------------------------	--

Tankis po matavimo (kg/m ³):	#DIV/0!
--	---------

Masės pokytis, % :	#DIV/0!
--------------------	---------

Visa bandymo trukmė, h:	3,0
-------------------------	-----

Nuostovių sąlygų trukmė, h:	2,0
-----------------------------	-----

Matavimo trukmė, h:	0,50
---------------------	------

Bandinio būklė:	orasausis
-----------------	-----------

Bandinio matmenys plane (mm):	600 x 600
-------------------------------	-----------

Bandinio storis (mm) :	99,85
------------------------	-------

Storis matuotas pagal:	
------------------------	--

Matavimo duomenys :

karštosios plokštės temperatūra T(h)	21,80
--------------------------------------	-------

karštosios plokštės šil.sr.tankis q(h)	7,83
--	------

šaltosios plokštės temperatūra T(c)	-1,74
-------------------------------------	-------

šaltosios plokštės šil.sr.tankis q(c)	8,15
---------------------------------------	------

Vidut. šilumos srauto tankis per bandinį q(vid), W/m ²	7,991
---	-------

Vidut. temperatūros perkrytis per bandinį ΔT, K	23,55
---	-------

Vidutinė bandinio temperatūra T(vid), °C	10,03
--	-------

Vidutinis šilumos laidumo koeficientas λ, W/(m.K)	0,0338869
---	-----------

matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) :+/-	0,000401
---	----------

arba %	1,18
--------	------

$$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta t}$$

Vidutinė grynoji šiluminė varža R, (m ² .K)/W	2,946637
--	----------

matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) :+/-	0,0348
---	--------

arba %	1,18
--------	------

$$R = \frac{\Delta t}{q}$$

Vidutinė aplinkos temperatūra, °C	10,32
-----------------------------------	-------

Aplinkos oro santykinis drėgnis, %	38,3
------------------------------------	------

Šilumos srauto matuoklio aparato kalibravimo/patikros data	2018.10.18.
--	-------------

Kalibravimo/patikros etalonas	IRMM 440C
-------------------------------	-----------

Kalibravimas / patikra galioja iki	2020.10.18.
------------------------------------	-------------

PASTABOS:

Matavimą atliko:

A. Burlingis

V. 50 mm storio polistireninio putplasčio EPS 100 šilumos laidumo matavimo duomenys.

KTU ARCHITEKTŪROS IR STATYBOS INSTITUTAS
STATYBINĖS FIZIKOS LABORATORIJA

GAMINIO ŠILUMINIŲ SAVYBIŲ MATAVIMAS

Matavimo prietaisai - Šilumos laidumo nustatymo prietaisai

Vieno bandinio simetrinis šilumos srauto matuoklis Nr.1/99 pagal ISO 8301

Matavimo standartas: LST EN 12667

Matavimo lapas Nr. : 09 - 6

Matavimo data: 2018.09.07

Bandinio kodas : Aurelijos

Bandinio medžiaga : EPS100

Bandinio paruošimas pagal:

Bandinio išlaikymo sąlygos:	T °C	RH%	Trukmė, h	Masės pokytis, %
	23	55	48	-

Šilumos srauto kryptis : aukštyn

Masė prieš matuojant (kg):	-	Tūnis, m ³	-
Tankis prieš matuojant (kg/m ³):	#VALUE!		
Masė po matavimo (kg):	-		
Tankis po matavimo (kg/m ³):	#VALUE!		
Masės pokytis, % :	#VALUE!		

Visa bandymo trukmė, h:	3,0
Nuostovių sąlygų trukmė, h:	2,0
Matavimo trukmė, h:	0,50

Bandinio būklė:	orasausis
Bandinio matmenys plane (mm):	600 x 600
Bandinio storis (mm) :	48,38
Storis matuotas pagal:	

Matavimo duomenys :	
karštosios plokštės temperatūra T(h)	22,48
karštosios plokštės šil.sr.tankis q(h)	17,79
šaltosios plokštės temperatūra T(c)	-3,05
šaltosios plokštės šil.sr.tankis q(c)	18,02

Vidut. šilumos srauto tankis per bandinį q(vid), W/m ²	17,905
Vidut. temperatūros perkrytis per bandinį ΔT, K	25,53
Vidutinė bandinio temperatūra T(vid), °C	9,72

Vidutinis šilumos laidumo koeficientas λ, W/(m.K)	0,0339341	$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta t}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) : +/-	0,000283	
arba %	0,83	

Vidutinė grynoji šiluminė varža R, (m ² .K)/W	1,425631	$R = \frac{\Delta t}{q}$
matavimo išplėstinė neapibrėžtis (95% pasikliautinis lygmuo) : +/-	0,0117	
arba %	0,82	

Vidutinė aplinkos temperatūra, °C	10,20
Aplinkos oro santykinis drėgnis, %	38,8

Šilumos srauto matuoklio aparato kalibravimo/patikros data	2017.01.13.
Kalibravimo/patikros etalonas	XPS-et
Kalibravimas / patikra galioja iki	2019.01.13.

PASTABOS:

Matavimą atliko:

A. Burlingis

2 priedas

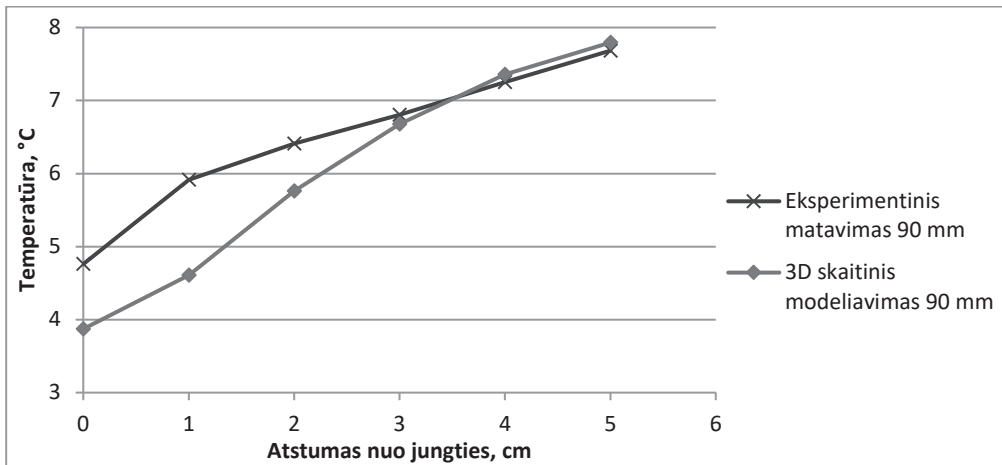
1.6. skyriuje 1.1 lentelėje pateikiamų vėdinamų fasadų konstrukcijų aprašymai

Vėdinama fasado konstrukcija	Tvirtinimo elementų šilumos laidumas λ , W/(m·K)	Termoizoliacinis sluoksnis		Laikantysis sluoksnis	
		storis, m	šilumos laidumas, W/(m·K)	storis, m	šilumos laidumas, W/(m·K)
1.1.	1				
1.2.	17				
1.3.	50	0,20	0,040	0,15	0,100
1.4.	160				
1.5.	230				
2.1.	1				
2.2.	17				
2.3.	50	0,20	0,040	0,15	2,500
2.4.	160				
2.5.	230				
3.1.	1				
3.2.	17				
3.3.	50	0,20	0,040	0,15	0,600
3.4.	160				
3.5.	230				
4.1.	1				
4.2.	17				
4.3.	50	0,20	0,040	0,25	0,600
4.4.	160				
4.5.	230				
5.1.	1				
5.2.	17				
5.3.	50	0,40	0,040	0,25	0,600
5.4.	160				
5.5.	230				
6.1.	1				
6.2.	17				
6.3.	50	0,40	0,020	0,25	0,600
6.4.	160				
6.5.	230				

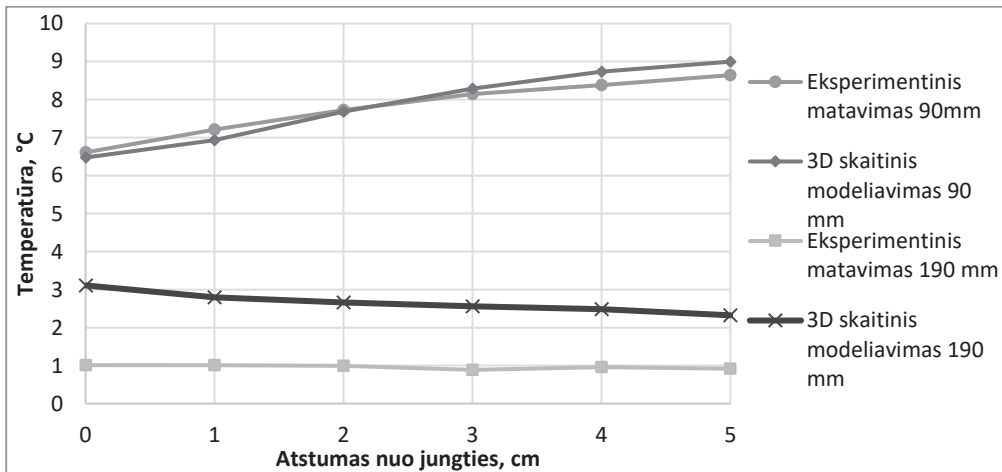
Visos konstrukcijos skaičiuojamos su „L“ formos tvirtinimo elementų kiekiu 2,715 vnt./m². Tvirtinimo elementų matmenys: storis – 3 mm, aukštis – 100 mm, ilgis – kinta, priklausomai nuo termoizoliacinio sluoksnio storio.

3 priedas

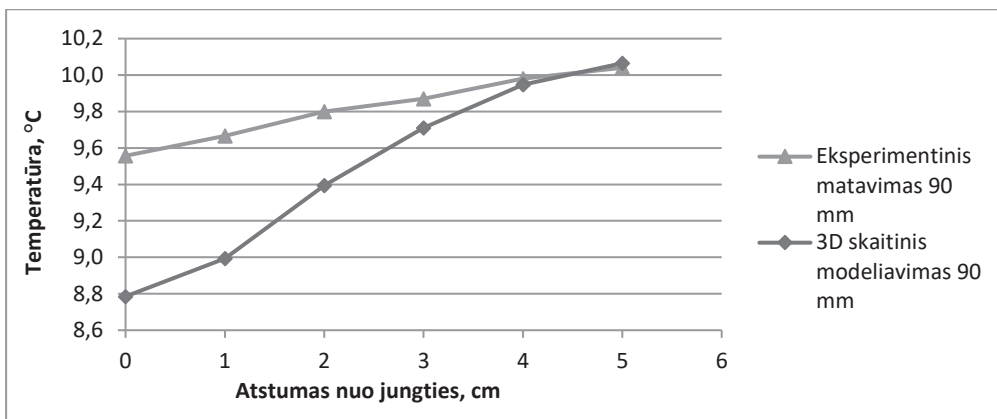
Ekspirimentiškai ir 3D skaitinio modeliavimo metodu užfiksuotų temperatūrų apie jungtis palyginimas



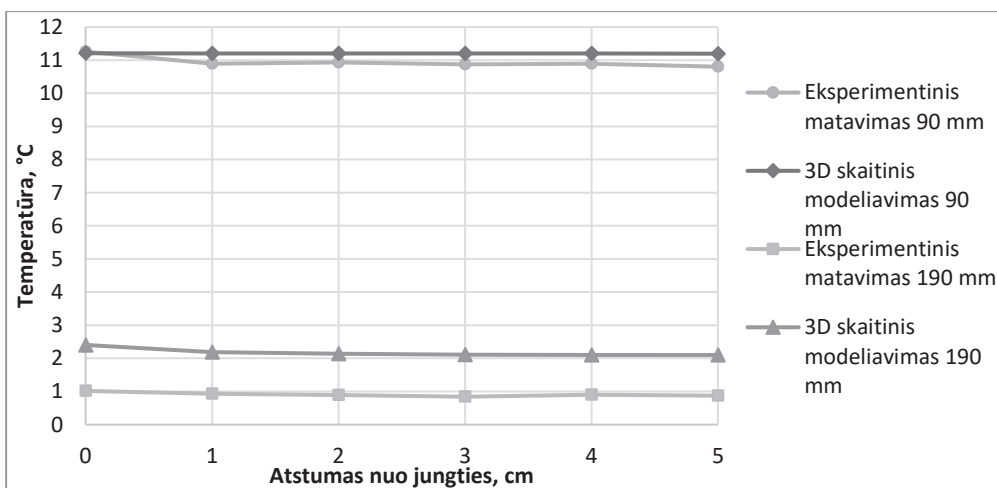
1 pav. Ekspirimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 200 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis aliuminio lydinio jungtimis



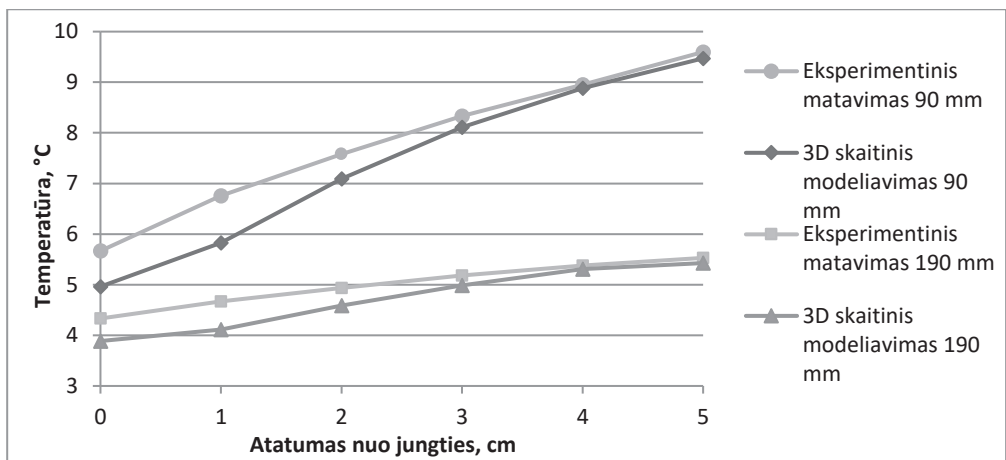
2 pav. Ekspirimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 200 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis



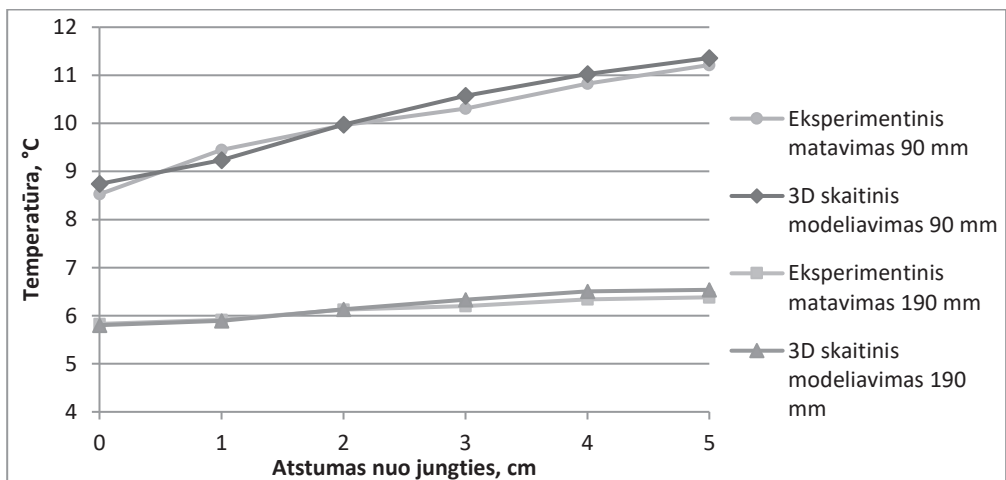
3 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 200 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis nerūdijančio plieno jungtimis



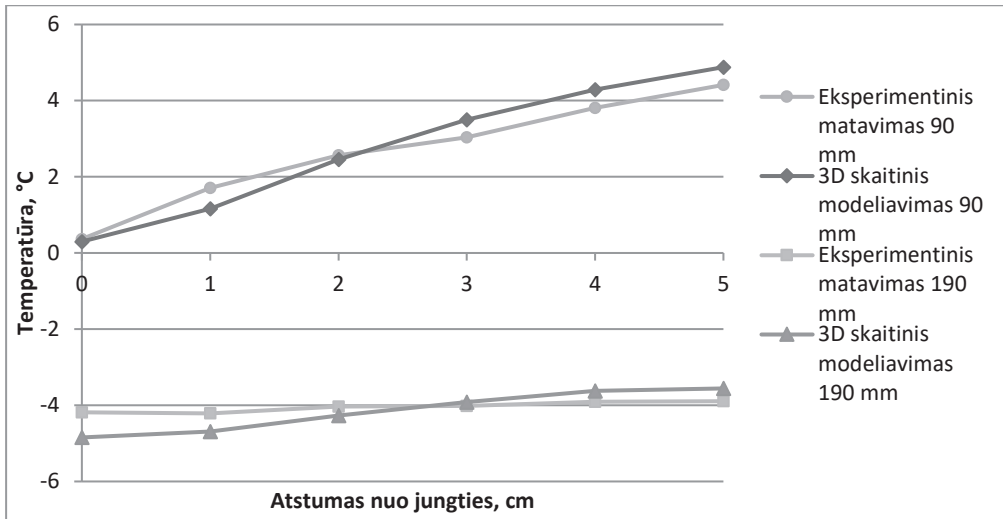
4 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 200 mm storio EPS sluoksniu ir jį kertančiomis stiklo tekstolito jungtimis



5 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio MV sluoksniu ir jį kertančiomis aliuminio lydinio jungtimis



6 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio MV sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis



7 pav. Eksperimentiškai ir 3D skaitiniu modeliavimo metodu atitinkamuose taškuose užfiksuotų temperatūrų palyginimas sienos atitvaros fragmente su 300 mm storio MV sluoksniu ir jį kertančiomis plieninėmis jungtimis, kai temperatūros režimas -15 °C / 20 °C

