



T O M A S   M A K A V E C K A S

---

**PASTATŲ ATITVARŲ SU  
POLIIZOCIANURATO (PIR)  
TERMOIZOLIACINIŲ  
SLUOKSNIU ŠILUMINIŲ  
SAVYBIŲ KAITOS  
TYRIMAI**

---

D A K T A R O   D I S E R T A C I J A

K a u n a s  
2 0 2 1

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

TOMAS MAKAVECKAS

PASTATŲ ATITVARŲ SU  
POLIIZOCIANURATO (PIR)  
TERMOIZOLIACINIŲ SLUOKSNIŲ  
ŠILUMINIŲ SAVYBIŲ KAITOS TYRIMAI

Daktaro disertacija  
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (T 002)

Kaunas, 2021

Disertacija rengta 2017–2021 metais Kauno technologijos universiteto Architektūros ir statybos institute.

**Mokslinis vadovas**

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

Disertaciją redagavo: lietuvių kalbos redaktorė Dalia Tysliavaitė-Blyžė, anglų kalbos redaktorius dr. Armandas Rumšas (leidykla „Technologija“).

**Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

prof. dr. Kęstutis BALTAKYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, T 002) – **pirmininkas**;

m.d., dr. Karolis BANIONIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, T 002);

prof. dr. Targo KALAMEES (Talino technologijos universitetas, Estija, technologijos mokslai, statybos inžinerija, T 002);

doc. dr. Jolanta ŠADAUSKIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, T 002);

Vyriaus. m.d., dr. Saulius VAITKUS (Vilnius Tech, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2022 m. sausio 12 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto Disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt)

Disertacija išsiųsta 2021 m. gruodžio 10 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TOMAS MAKAVECKAS

RESEARCH ON CHANGE OF THERMAL  
PROPERTIES OF BUILDING PARTITIONS  
INSULATED WITH POLYISOCYANURATE  
(PIR) THERMAL INSULATION LAYER

Doctoral Dissertation  
Technological Sciences, Civil Engineering (T 002)

Kaunas, 2021

This doctoral dissertation was prepared at Kaunas University of Technology, Institute of Architecture and Construction, Laboratory of Building Physics during the period of 2017–2021.

**Scientific Supervisor:**

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

The dissertation was edited by: Lithuanian language editor Dalia Tysliavaitė-Blyžė, English language editor dr. Armandas Rumšas (Publishing House *Technologija*)

**Dissertation Defence Board of Civil Engineering Science Field:**

Prof. Dr. Kęstutis BALTAKYS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering, T 002) – **chairperson**;

Dr. Karolis BANIONIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering, T 002);

Prof. Dr. Targo KALAMEES (Tallinn University of Technology, Estonia, Technological Sciences, Civil Engineering, T 002);

Assoc. Prof. Dr. Jolanta ŠADAUSKIENĖ (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering, T 002);

Dr. Saulius VAITKUS (Vilnius Tech, Technological Sciences, Materials Engineering, T 008).

The official defence of the dissertation will be held at 10 a.m. on 12 January, 2022 at the public meeting of Dissertation Defence Board of Civil Engineering Science Field in Dissertation Defense Hall at Kaunas University of Technology.

Address: K. Donelaičio St. 73-403, 44249 Kaunas, Lithuania.

Tel. no. (+370) 37 300 042; fax. (+370) 37 324 144; e-mail [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt)

Doctoral dissertation was sent on 10 December, 2021.

The doctoral dissertation is available on the internet <http://ktu.edu> and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio St. 20, 44239 Kaunas, Lithuania).

## TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS.....	9
ĮVADAS.....	11
1. POLIIZOCIANURATO (PIR) ŠILUMOS IZOLIACIJOS TYRIMAI: SAVYBĖS IR PRAKTINIS TAIKYMAS.....	14
1.1. Izoliacinių medžiagų rinkos apžvalga.....	14
1.2. PU putas.....	19
1.2.1. PIR šiluminės savybės.....	22
1.2.2. PIR gamyboje naudojamos putinimo dujos.....	26
1.2.3. PIR porų struktūra.....	27
1.2.4. PIR dangos.....	30
1.3. PIR senėjimo ypatumai.....	33
1.4. Temperatūros įtaka PUR / PIR putų šiluminės savybėms.....	40
1.5. Pirmojo skyriaus išvados.....	43
2. TYRIMŲ METODIKA.....	44
2.1. Tyrimų koncepcija nustatant aplinkos temperatūros įtaką PIR šiluminiam laidumui.....	44
2.1.1. Tęstinio terminio sendinimo įtaka bandinių šiluminiam laidumui.....	45
2.1.2. Šiluminio laidumo matavimas ir terminio sendinimo metodų aprašymas .....	46
2.1.3. Tyrimams naudojami gaminiai ir bandiniai.....	48
2.2. Įvairių PIR dangų įtakos šilumos perdavimui per pastato atitvaras tyrimas	50
2.2.1. Tiriamų sienos fragmentų konstrukcija ir medžiagos.....	50
2.2.2. Skaitinis šilumos perdavimo per pastato kampų sujungimus, apšiltintus poliuretano gaminiiais, modeliavimas.....	53
2.3. Antrojo skyriaus išvados.....	54
3. REZULTATAI.....	54
3.1. PIR gaminių šiluminis laidumas po sendinimo skirtingose temperatūrose .	54
3.1.1. Sendinimo temperatūros poveikis PIR bandinių vidutinio šiluminio laidumo pokyčiams.....	55
3.1.2. Bandinių storio įtaka PIR bandinių šiluminio laidumo pokyčiui.....	56
3.1.3. Dangų įtakos bandinių šiluminių savybių pokyčiui analizė.....	57
3.1.4. Skirtingai sendintų bandinių šiluminio laidumo verčių palyginimas ...	59
3.2. PIR gaminių šiluminis laidumas esant skirtingai temperatūrai.....	59
3.2.1. Šiluminis laidumas, išmatuotas šilumos srauto matuoklio aparatu.....	59
3.2.2. Šiluminis laidumas matuojamas KD.....	61
3.3. Aplinkos temperatūros įtaka PIR produktų šiluminio laidumo pokyčiams .	62
3.4. Tęstinio terminio sendinimo įtaka bandinių šiluminiam laidumui.....	65
3.5. PIR gaminių šiluminio laidumo pokyčių poveikis šilumos perdavimui per apšiltintas atitvaras.....	66
3.6. Įvairių PIR dangų įtaka šilumos perdavimui per apšiltintų pastatų sienų kampus.....	68
3.6.1. Skaitinio modeliavimo rezultatai.....	68

3.6.2. Šilumos perdavimo per bandinius su intarpais eksperimentinio matavimo rezultatai .....	73
3.7. Trečiojo skyriaus išvados .....	74
4. IŠVADOS.....	74
5. SUMMARY .....	76
5.1. Preface .....	76
5.2. Literature review.....	78
5.3. Research methodology.....	80
5.4. Research results .....	85
5.5. General conclusions.....	95
6. LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	97
7. CURRICULUM VITAE .....	107
8. STRAIPSNIŲ IR MOKSLINIŲ KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS .....	108
9. PADĖKA.....	109

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

**1 lentelė.** PIR putų šiluminio laidumo priklausomybė nuo temperatūros (Wang, Foster, 2017).

**2 lentelė.** Matavimo prietaisų techninės charakteristikos.

**3 lentelė.** Sienos konstrukciją sudarančios medžiagos.

**4 lentelė.** Šiluminio laidumo vertės prieš tam tikrą sendinimą ir po jo, esant skirtingoms temperatūros sąlygoms (pasitikėjimo intervalai apskaičiuojami esant 90% pasikliautinumui).

**5 lentelė.** Šiluminio laidumo matavimų šilumos srauto matuokliuose FOX 314 ir FOX 600 rezultatai esant skirtingoms vidutinėms temperatūroms.

**6 lentelė.** Šiluminio laidumo matavimas skirtingose vidutinėse temperatūrose naudojant KD aparatą.

**7 lentelė.** Vidutinės šiluminio laidumo vertės po tęstinio sendinimo skirtingomis temperatūros sąlygomis.

**8 lentelė.** Sienos šilumos perdavimo pokyčių priklausomybė nuo PIR šiluminio laidumo pokyčių.

**9 lentelė.** Skaičiavimų rezultatai.

**10 lentelė.** Eksperimentinių matavimų rezultatai.



## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1 pav.** Dažniausiai naudojamos izoliacinės medžiagos (Papadopoulos, 2005)
- 2 pav.** Izoliacinių medžiagų poreikis 2012-2020 m. (Europa, NVS ir Rusija, Šiaurės Amerika ir Australija) (Insulation Market Analysis By Product, 2017)
- 3 pav.** Pasaulinis PUR/PIR suvartojimas 2016 m. (Chemical Economics Handbook, 2016)
- 4 pav.** Tipinis standžiųjų PIR putų plokščių gamybos procesas (Biswas ir kt., 2018)
- 5 pav.** Dvi poros: kairėje visiškai uždara pora, dešinėje – su skylė vienoje iš poros sienų (Brandreth, 1989)
- 6 pav.** PUR putų SEM nuotraukos (wall – poros sienelė; strut – erdvė tarp porų) (Baillis, Coquard, 2008)
- 7 pav.** Dujų, išeinančių iš uždarytų porų, įtaka šiluminiam laidumui po bandinių išlaikymo aukštoje temperatūroje (Zhang ir kt., 2017)
- 8 pav.** PIR dangos: (a) – aliuminio folija; (b) – daugiasluoksnė popierinė danga; (c) – daugiasluoksnė aliuminizuota danga; (d) – bitumo danga (www.poliuretanos.com)
- 9 pav.** Šilumos izoliacinių medžiagų šiluminio laidumo priklausomybė nuo temperatūros (Berardi, Naldi, 2017)
- 10 pav.** Ekspertimentinių tyrimų schema
- 11 pav.** Tęstinio terminio sendinimo bandymų algoritmas
- 12 pav.** Šilumos srauto jutiklio ir termoporų išdėstymas bandinyje matavimui KD
- 13 pav.** Bandinių pavyzdžiai: a) bandinys su gamykline aliuminizuota daugiasluoksne difuzine danga; b) bandinys, apklijuotas iš visų pusių; c) bandinys be dangų
- 14 pav.** Sudėtinis PIR bandinys šiluminiam laidumui matuoti KD
- 15 pav.** Sudėtinio PIR bandinio įrengimo KD schema
- 16 pav.** Sienos kampo fragmentas: 1 – tinkas, 2 – akytojo betono blokelių mūras, 3 – PU klizai, 4 – PIR šilumos izoliacija, 5 – PIR danga (žr. 2 lent.) (visi matmenys pateikti milimetrais)
- 17 pav.** Bandiniai su pažymėta matavimo zona: a) vientisas bandinys, b) bandinys su pasukta įdėtine detale (visi matmenys išreikšti milimetrais)
- 18 pav.** Procentinis vidutinio šiluminio laidumo pokytis po bandinių laikymo įvairiose temperatūrinėse aplinkose
- 19 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo +70 °C temperatūroje
- 20 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo +50 °C temperatūroje
- 21 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo +23 °C temperatūroje

**22 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje

**23 pav.** Šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinio temperatūros (šilumos srauto matuoklis)

**24 pav.** Šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinio temperatūros KD

**25 pav.** PIR šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinių temperatūros

**26 pav.** 30 mm storio bandinių vidutinio šilumos laidumo koeficiento kitimas tęstinio sendinimo metu

**27 pav.** 50 mm storio bandinių vidutinio šilumos laidumo koeficiento kitimas tęstinio sendinimo metu

**28 pav.** Mažai energijos vartojančio pastato sienos fragmentas

**29 pav.** Siena apšiltinta PIR su skirtingomis dangomis: a) aliuminio folija, b) daugiasluoksnė aliuminuota danga, c) kompozitinė popierinė danga, d) plastikinė danga

**30 pav.** Šilumos srautas per sienos, apšiltintos PIR, kampus su skirtingomis dangomis: a) aliuminio folija, b) daugiasluoksnė aliuminuota danga, c) kompozitinė popierinė danga, d) plastikinė danga

**31 pav.** Siena apšiltinta PIR be dangų, bet su PU klizais sujungime

**32 pav.** Šilumos srautas per sienos kampą, apšiltintą PIR be dangų

**33 pav.** Siena, apšiltinta PIR su nuimta aliuminio folijos danga sujungime tarp plokščių ir naudojant PU klizus sujungime

**34 pav.** Šilumos srautas per sienos kampą, apšiltintą aliuminio folija dengta PIR šilumos izoliacija, be aliuminio folijos dangos ir su PU klizais plokščių sujungime

**35 pav.** Siena apšiltinta PIR: a) su aliuminio folija, be PU klizų sujungime; b) be dangų ir be PU klizų sujungime

**36 pav.** Šilumos srautas per sienos kampą, apšiltintą: a) aliuminio folija padengtu PIR, be PU klizų sujungime; b) PIR be dangų ir be PU klizų sujungime

**37 pav.** Siena, apšiltinta PIR su aliuminio folijos danga, su pašalinta aliuminio folijos danga ir be PU klizų sujungime

**38 pav.** Šilumos srautas per sienos kampą, apšiltintą aliuminio folija dengtu PIR, su pašalinta aliuminio folijos danga ir be PU klizų sujungime

## SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS

**Atitvaros šilumos perdavimo koeficientas** – per atitvarą pereinančio šilumos srauto tankis, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

**Energijos beveik nevartojantis 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.

**Ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas** - šilumos srauto tankis, tenkantis šiluminio tiltelio ilgio vienetui, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ).

**Ilginis šiluminis tiltelis** – šilumos tiltelis, kurio skerspjūvis yra vienodas išilgai vienos iš trijų ortogonalinių ašių.

**Išorinė pastato atitvara** – pastato elementas, skiriantis patalpas nuo išorės, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse didesnis negu  $4\text{ K}$ .

**Pagreitintas sendinimas** yra procesas, kuris dažniausiai atliekamas, siekiant įvertinti atsparumą bandomos medžiagos parametrų sumažėjimui laikui bėgant. Tai yra natūralaus senėjimo per sutrumpintą laiką modeliavimas.

**Poliizocianuratas (PIR)** – termoreaktyvus polimeras, paprastai gaminamas kaip putos ir naudojamas kaip standi šilumos izoliacija. Žaliavinės medžiagos yra panašios į tas, kurios naudojamos gaminant poliuretaną (PUR), išskyrus tai, kad metileno difenildiizocianato (MDI) proporcinė dalis cheminėje formulėje yra didesnė, o reakcijoje vietoje polieterio poliolio naudojamas poliesterio poliolis.

**Poliuretanai (PUR ir PU)** yra polimeras, sudarytas iš organinių junginių, sujungtų karbamato (uretano) jungtimis.

**Putodaris (putodario dujos)** – PIR/PUR gamyboje putinimui naudojamos dujos (dažniausiai pentanas).

**Senėjimas** – medžiagos savybių pokytis veikiant tam tikroms eksploatacinėms sąlygoms, kuris gali apimti fizinį senėjimą, nevykstant cheminei reakcijai, cheminius medžiagos struktūros pokyčius, temperatūrinį kondicionavimą aukštesnėje temperatūroje ir fotocheminį senėjimą, atmosferos sąlygomis.

**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.

**Šiluminis laidumas** – tai medžiagos savybė praleisti šilumą, t. y. termoizoliacinė medžiagos savybė. Šią savybę apibūdina šilumos laidumo koeficientas  $\lambda$ ,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

## SIMBOLIŲ SĄRAŠAS

$\Psi$  – ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;

$L_{2D}$  – ilginio šiluminio tiltelio savitieji šilumos nuostoliai,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;

$U$  – šilumos perdavimo koeficientas,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;

$\Delta\Phi$  – šilumos srauto padidėjimas per sienos kampo  $1\text{ m}$  dėl dangų įtakos,  $\text{W}/\text{m}$ .

## ĮVADAS

### Darbo aktualumas

Šilumos izoliacinės medžiagos, sumontuotos kiekvieno konkretaus pastato apvaskale, yra veikiamos aplinkos temperatūros ir drėgmės, todėl jų faktinės šiluminės savybės skiriasi nuo prognozuojamų standartinėmis laboratorinėmis sąlygomis. Esant žemai temperatūrai, daugumos statybinių medžiagų šiluminis laidumas mažėja, o kylant temperatūrai – didėja, tačiau į šį aspektą projektuojant pastatus atsižvelgiama retai, nors tai įvertinti būtų naudinga, siekiant tiksliau prognozuoti pastatų šildymo energines sąnaudas. Tai nėra sudėtinga termoizoliacinėms medžiagoms, kurių poros užpildytos oru, kadangi daugelio tyrimų rezultatai rodo artimą tiesinei medžiagų šiluminio laidumo ir eksploatacinės aplinkos temperatūros priklausomybę. Siekiant sumažinti termoizoliacinių medžiagų šiluminį laidumą uždarų porų medžiagose, dažniausiai putintose polimerinėse medžiagose, poros užpildomos įvairių dujų mišiniais. Prognozuoti šių medžiagų šiluminių savybių kaitą įvairios temperatūros ir drėgmės eksploatacinėje aplinkoje tampa sudėtinga, nes nėra tiesinės priklausomybės tarp dujų mišinio šiluminio laidumo ir aplinkos temperatūros, o eksploatacijos eigoje nuolat kinta paties dujų mišinio sudėtis.

Tokių medžiagų grupei priskiriamas poliuretalinis putplastis (PUR / PIR) yra viena efektyviausių šiuo metu pastatų apšiltinimui plačiai naudojamų termoizoliacinių medžiagų. Tai standžiųjų putų medžiaga su uždaromis poromis, užpildytomis mažai šilumai laidžių dujų mišiniu, daugiausiai lemiančiu medžiagos šiluminį laidumą. Šios medžiagos pastatuose naudojamos labai plačiame temperatūrinės aplinkos diapazone: nuo stogų apšiltinimo, kai medžiaga gali įkaisti iki +70 °C temperatūros, iki šaldymo pastatų izoliacijos, kur ši medžiaga eksploatuojama –25 °C temperatūroje. Tokios eksploatacinės sąlygos reikšmingai skiriasi nuo standartinių medžiagų savybių nustatymo sąlygų, todėl ir eksploatacinės medžiagų savybės gali žymiai skirtis nuo nustatytų standartinės aplinkos sąlygomis. PIR plokštės, lyginant su daugeliu tradicinių termoizoliacinių medžiagų, yra nauji gaminiai, todėl jų savybių nustatymo metodai dar nėra pakankamai patikimi, matavimo paklaidos gali atsirasti dėl matavimo prietaisų ir bandinių techninių charakteristikų bei bandinių paruošimo procedūrų. Šios aplinkybės gali lemti pastato atitvarų šiluminių savybių vertinimo tikslumą, glaudžiai susijusį su efektyvesniu energijos ir statybinių medžiagų panaudojimu, todėl termoizoliacinių medžiagų su dujų mišinio užpildu uždaroje porose eksploatacinių savybių tyrimai yra aktualūs statybinės šiluminės fizikos ir medžiagų inžinerijos uždaviniai.

### Problemos formulavimas

Uždarų porų standžiųjų poliizocianurato putų (PIR) termoizoliacinės plokštės yra kompozitinės struktūros gaminiai, kurių šiluminės savybės priklauso nuo polimerinio karkaso ir iš jo sudarytų uždarų porų dujinio užpildo. Pagal numatomo panaudojimo sąlygas tinkamai parinkta karkaso ir dujų mišinio struktūra suteikia naujam gaminiui bene geriausias šilumines savybes, lyginant su kitomis plačiai naudojamomis termoizoliacinėmis medžiagomis. Tačiau nustatant gaminių

šilumines savybes ir eksploatacijos metu, kai šie gaminiai sumontuojami į skirtingų temperatūrų aplinkos sąlygas pastatų atitvarose, jų šiluminės savybės gali reikšmingai pasikeisti, taip pakeisdamos ir viso pastato šilumos sąnaudas.

PIR gaminių šiluminio laidumo pokyčiai ir jų vertinimas bei įtaka pastatų šilumos nuostoliams gali būti suskirstyti į tris grupes. Pirmajai grupei priskiriami medžiagos šiluminio laidumo pokyčiai keičiantis vidutinei gaminių temperatūrai, pokyčiai išbuvus gaminiui tam tikrą laiką aukštos arba žemos temperatūros aplinkoje, taip pat pokyčiai, susiję su PIR gaminių apsauginėmis dangomis. Antrajai grupei priskiriami šilumos perdavimo per PIR gaminius apšiltintas konstrukcijas pokyčiai: montuojant PIR gaminius atitvarose, neišvengiama plokščių jungimo ir pjaustymo, todėl pastatų kampiniuose sujungimuose dėl skirtingo medžiagos šiluminio laidumo ir dangų įtakos gali susiformuoti ilginiai šiluminiai tilteliai, kurie taip pat turi įtakos pastato šilumos nuostoliams. Trečiajai grupei priskiriamos galimos pastato šilumos nuostolių pro atitvaras prognozavimo paklaidos, susijusios su deklaruojamosios PIR gaminių šilumos laidumo koeficiento vertės nustatymu: bandinio geometrinių parametrų parinkimu, siekiant išvengti šoninių šilumos nuostolių, dangų įtakos vertinimu ir bandinio sendinimo technologija.

Visi išvardyti PIR termoizoliacinių gaminių šiluminių savybių pokyčio ir jo vertinimo aspektai nepakankamai ištirti ir išanalizuoti mokslinėje ir techninėje literatūroje. Kai kurių tyrimų rezultatai nepagrįsti pakankamais įrodymais apie teigiamus arba neigiamus PIR gaminių šilumos laidumo nustatymo ir vertinimo pokyčius bei jų įtaką pastatų šilumos nuostoliams. Didėjant PIR gaminių naudojimui energiška efektyviuose pastatuose, išsamus šios medžiagos šiluminių savybių nustatymo ir pokyčių įvertinimas bei pagrindimas prisidės prie tikslesnio pastatų energinių sąnaudų vertinimo ir optimalaus statybinių termoizoliacinių medžiagų naudojimo.

## **Darbo tikslas**

Darbo tikslas – ištirti standžiųjų poliizocianurato (PIR) putų šiluminių savybių nustatymo, vertinimo ir kaitos eksploatacinėse sąlygose dėsningumus.

## **Darbo uždaviniai**

Darbo tikslui pasiekti keliami šie uždaviniai:

1. Atlikti standžiųjų poliizocianurato (PIR) putų šiluminio laidumo priklausomybės nuo eksploatacinių parametrų ir senėjimo procesų tyrimų analizę.
2. Laboratorinėmis sąlygomis ištirti naujų ir sendintų PIR gaminių šiluminio laidumo priklausomybę nuo aplinkos temperatūros ir jos poveikių trukmės.
3. Išanalizuoti apsauginių dangų poveikį šios termoizoliacinės medžiagos savybėms bei senėjimo procesui.
4. Ištirti šilumos perdavimo tendencijas pastatų, apšiltintų PIR gaminių, konstrukcijų kampiniuose sujungimuose.
5. Eksperimentiškai ištirti PIR bandinių geometrinių charakteristikų ir matavimo aplinkos poveikį jų šiluminio laidumo nustatymo patikimumui.

6. Parengti PIR gaminių šiluminio laidumo nustatymo ir šiluminių savybių naudojimo, prognozuojant šiais gaminiiais apšiltintų pastatų atitvarų šilumos nuostolius Šiaurės šalių klimatinėmis sąlygomis, rekomendacijas.

### **Mokslinis darbo naujumas**

1. Eksperimentiškai nustatyta gaminių aplinkos ir jų sendinimo temperatūrų įtaka PIR šiluminiam laidumui esant įvairiems apsauginių dangų techninių charakteristikų deriniams.

2. Ištirta labai plonų dangų įtaka šilumos perdavimui per PIR plokštėmis apšiltintų konstrukcijų kampinius sujungimus.

### **Praktinė darbo vertė**

1. Nustatyta, kad deklaruojamosios standžiųjų poliizocianurato (PIR) putų šilumos laidumo koeficiento vertės nustatymo standartinė metodika, kai bandinys pjaunamas iš centrinės gaminio dalies šerdies, neatitinka gaminių su difuzijai nelaidžiomis dangomis naudojimo sąlygų ir turi būti koreguojama pagal šio darbo eigoje parengtas rekomendacijas.

2. Įrodyta, jog vėlesnis (negamybinis) difuzijai nelaidžios plėvelės užklėjimas ant sendinamų PIR gaminių paviršių neturi įtakos bandinių šiluminio laidumo pokyčiams.

3. Projektuojant šaldymo paskirties pastatų atitvaras, kurių izoliacijai naudojami PIR produktai, turi būti įvertintas iki 20 % šilumos nuostolių padidėjimas, lyginant su standartiniais metodais apskaičiuotais šilumos nuostoliais.

### **Ginamieji disertacijos teiginiai**

1. Standartinėmis sąlygomis matuojamas PIR gaminių šiluminis laidumas išlieka nepakitęs po bandinių sendinimo neigiamos temperatūros ( $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aplinkoje, o žemos vidutinės temperatūros (nuo  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aplinkoje matuojamų bandinių šiluminis laidumas reikšmingai padidėja, lyginant su išmatuotu standartinėmis sąlygomis.

2. PIR gaminių apsauginių dangų techninės charakteristikos ir tvirtinimo būdas turi būti įvertinti matuojant šių gaminių šiluminį laidumą ir skaičiuojant šilumos perdavimą per PIR plokštėmis apšiltintų pastatų konstrukcijų kampinius sujungimus.

# 1. POLIIZOCIANURATO (PIR) ŠILUMOS IZOLIACIJOS TYRIMAI: SAVYBĖS IR PRAKTINIS TAIKYMAS

## 1.1. Izoliacinių medžiagų rinkos apžvalga

Per pastaruosius kelis dešimtmečius padaryta didelė pažanga gerinant pastatų energinį efektyvumą, dėl to sumažėjo įprasto kuro sunaudojimas ir išmetamo CO<sub>2</sub> kiekis, kuris sukelia šiltnamio efektą (Paraschiv, Paraschiv ir Ion, 2017). Statybų sektorius sunaudoja beveik 40 % viso pasaulyje suvartojamo energijos kiekio, todėl yra atsakingas už gana didelę teršalų emisiją (Asdrubali, Baldinelli, 2011; Rasooli, Itard ir Ferreira, 2016). Todėl efektyvių šilumos izoliacinių medžiagų naudojimas dažnai yra pagrindinis elementas, mažinantis šilumos nuostolius per pastato atitvaras (Patnaik ir kt., 2015).

Statybų sektoriuje didžiausias iššūkis – energijos suvartojimo sumažinimas. 2010 metais pastatuose buvo sunaudota iki 32 % visame pasaulyje pagamintos energijos bei iki 51 % elektros energijos. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija statybų sektoriuje nuo 1970 iki 2010 metų padidėjo daugiau nei dvigubai, šiomis dienomis siekdama iki 10 GtCO<sub>2</sub> ekviv. / metus (Berardi, 2017a).

Šiuo metu pagrindinis dokumentas, skatinantis energijos taupymą pastatuose Europos Sąjungoje, yra 2010 m. patvirtinta Europos Parlamento ir Tarybos Direktyva dėl pastatų energinio naudingumo (Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council). Šioje direktyvoje minima, jog Europos Sąjungoje pastatams sunaudojama apie 40 % visos energijos; šis sektorius toliau plečiasi, atitinkamai didindamas ir energijos sąnaudas. Tačiau, Europos Sąjungoje siekiama mažinti energijos vartojimą, didinti energijos gamybos dalį iš atsinaujinančių energijos šaltinių, tokiu būdu mažinant regiono priklausomybę nuo iškastinio kuro tiekėjų bei mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų, išmetamų į atmosferą, kiekį.

Jones ir kt. (2009) pastebėjo, jog atsižvelgiant į Kyoto protokolo reikalavimus ir ilgalaikius Europos Sąjungos tikslus energijos taupymo pastatuose srityje, numatoma iki 2020 metų mažiausiai 20 % sumažinti į atmosferą išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį (atitinkamai mažinant ir iškastinio kuro naudojimą šiluminės energijos gamybai) bei iki 2020 metų mažiausiai 20 % energijos gauti iš atsinaujinančių energijos šaltinių (bendrai, pasauliniu mastu yra keliamos nuostatos, kad anglies junginių išmetimas į atmosferą iki 2050 metų turėtų sumažėti iki 80 %). ES direktyvoje taip pat nurodyta, kad mažinant energijos vartojimą pastatuose turi būti atsižvelgta į klimato vietines sąlygas, vidaus mikroklimato užtikrinimą, ekonominį efektyvumą, taip pat pabrėžiama, kad šių tikslų siekimas neturi neigiamai daryti įtakos kitoms pastato savybėms, tokioms kaip saugumas, pasiekiamumas, tinkamumas naudoti pagal paskirtį.

Per pastaruosius 30 metų susirūpinimas energijos išsaugojimu, pasaulį privedė prie šilumos izoliacinių medžiagų naudojimo. Norint užtikrinti patalpų komfortą pastatuose, reikia skirti didesnę dėmesį termoizoliacinėms ir akustinėms pastato atitvarų savybėms. Energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas pastatuose bei patalpų apsauga nuo triukšmo – esminiai statinio reikalavimai (Gailius, Vėjelis, 2012). Viena iš galimybių pagerinti pastatų energinį efektyvumą yra sumažinti



šilumos nuostolius per pastato atitvaras šiltinant sienas iš išorinės ar iš vidinės patalpų pusės. Šiltinant pastato sienas iš išorės, ne tik pagerinamas šiluminis pastato komfortas, bet ir pagerinama jo estetinė būklė (Paraschiv ir kt., 2017).

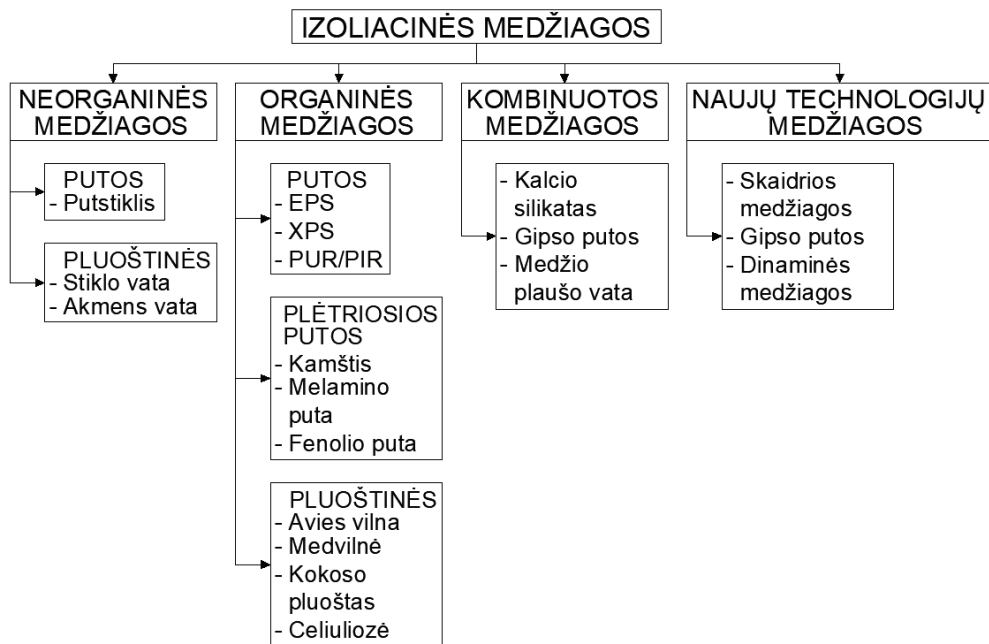
Šiluminė izoliacija yra medžiaga arba pluoštinių ar porėtų medžiagų derinys, kuris gali būti plokščių ar blokų pavidalu, atvirų arba uždarytų porų, ir gali būti chemiškai ar mechaniškai surištas, ir skirtas šilumos srautui sulėtinti, derinant pagrindinius šilumos perdavimo būdus, t. y. šiluminį laidumą, spinduliavimą ir konvekciją (Al-Homoud, 2004; Khoukhi ir kt., 2016). Šilumos izoliacinės medžiagos plačiai naudojamos apšiltinti pastatus, šaldytuvus ir maisto šaldymo kameras, izoliuoti vamzdžius ar skystų gamtinių dujų transportavimo magistralinius vamzdynus ir kt. (Zhang ir kt., 2017). Šilumos izoliacinės medžiagos pasirinkimas gali labai paveikti pastato energinį efektyvumą tiek jį vėsinant, tiek šildant (Alvey, Patel ir Stephenson, 2017).

Tinkamas pastatų šilumos izoliacijos naudojimas ne tik padeda sumažinti reikalingą oro kondicionavimo sistemos galią, bet ir metines energijos sąnaudas. Be to, pastato atitvarų termoizoliacija prailgina patalpų vidaus šiluminį komfortą, ypač keičiantis sezonams, be to, gerai izoliuotuose pastatuose palaikomi mažesni temperatūros svyravimai. Energijos taupymas dėl šilumos izoliacijos skiriasi priklausomai nuo pastato tipo, vyraujančių klimato sąlygų, kur pastatytas pastatas, taip pat nuo naudojamos šilumos izoliacinės medžiagos tipo. Dėl didelės šiluminės varžos šilumos izoliacinė medžiaga sulaiko šilumos srautą į pastatą arba iš jo (Al-Homoud, 2004).

Termoizoliacinės medžiagos užima ypač svarbią vietą statybinių medžiagų asortimente. Šių medžiagų įtaka juntama visiems statybų aspektams – pradedant kokybe, kaina ir baigiant pastatų eksploatacinėmis išlaidomis. Pastato šilumos izoliacija padeda išsaugoti pastato konstrukcijų vientisumą, taip prailgindama jų tarnavimo laikotarpį (Berardi, Naldi, 2017). Šilumos izoliacinės medžiagos ir langų sistemos atlieka svarbų vaidmenį užtikrinant patalpų aplinkos kokybę ir užtikrinant energijos vartojimo efektyvumą pastato gyvavimo ciklo požiūriu, nes per pastato atitvaras patenka maždaug 50–60 % viso į pastatą pritekančio šilumos kiekio, o pastatų atitvarų medžiagos labai prisideda prie pastato gyvavimo ciklo energijos sąnaudų, darant įtaką vėsinimo apkrovai didesniuose pastatuose (Tabrizi, Hill ir Aitchison, 2017). Izoliacinės medžiagos pasirinkimas gali turėti didelį efektą pastato energiniam efektyvumui, todėl renkantis tinkamiausią izoliacinę medžiagą tam tikrai situacijai, labai svarbi aplinkybė yra jos ilgalaikės charakteristikos (Alvey ir kt., 2017). Apibendrinant galima teigti, jog pagrindinės šilumos izoliacijos funkcijos yra energijos taupymas, temperatūros ir šilumos perdavimo kontrolė.

Papadopoulou (2005) savo straipsnyje pateikia šilumos izoliacinių medžiagų klasifikavimo schemą (1 pav.). Medžiagos taip pat gali būti grupuojamos pagal higrotermines savybes į nepralaidžias garui arba laidžias vandens garų difuzijai, kapiliariškai aktyvias ir kapiliariškai neaktyvias medžiagas (Alev, Kalamees, 2016), naftos chemijos ir natūralias (atsinaujinančias) (Abu-Jdayil ir kt. 2019; Durakovic, Yildiz ir Yahia, 2020).



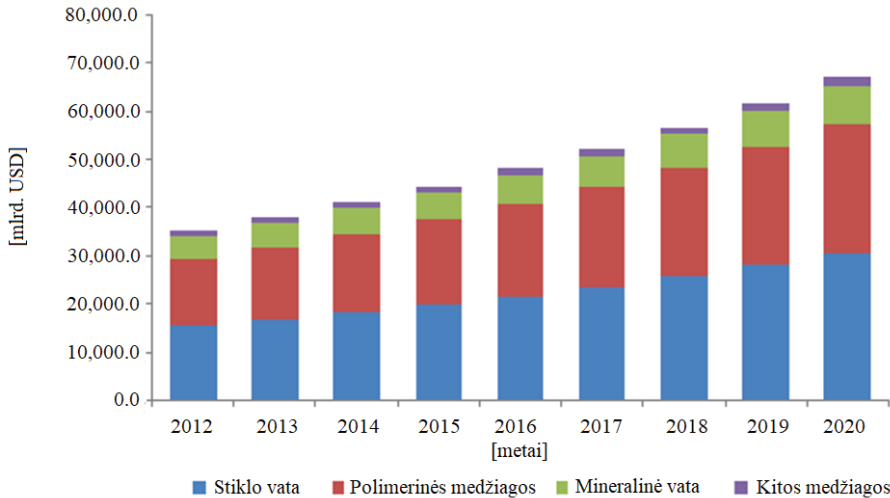


**1 pav.** Dažniausiai naudojamos termoizoliacinės medžiagos (Papadopoulos, 2005)

Statyboje dažniausiai naudojamos termoizoliacinės medžiagos – mineralinė vata (akmens ir stiklo vata), polistireninis putplastis (EPS ir XPS) bei kitos medžiagos. Pastaruoju metu ypač išaugo standžių poliizocianurato-poliuretano putų (PIR/PUR) naudojimas statybose dėl jų puikių mechaninių savybių ir mažo šiluminio laidumo (Jin ir kt., 2014). Pavyzdžiui, 2006 m. Graikijos izoliacinių medžiagų rinkoje ekstruzinis polistireninis putplastis (XPS) užėmė 35 %, putų polistirenas (EPS) – 45 %, o akmens vata – 15 % rinkos. Likusius 5 % rinkos dengė kitos šilumos izoliacinės medžiagos (Theodosiou, Papadopoulos, 2008). Nors mineralinė vata ir polistireninis putplastis sudaro didžiausią šilumos izoliacinių medžiagų dalį Europos / Viduriniųjų Rytų / Afrikos regionuose, poliuretano putplasčio procentas rinkoje sparčiai augo tarp 2000 m. ir 2010 m. nuo 9,1 % iki 13,8 % (Engels ir kt., 2013). 2011 m. mineralinė vata ir polimerinės izoliacinės medžiagos užėmė atitinkamai 52 % ir 41 % (Islam, Bhat, 2019), o 2013 m. atlikta pasaulinė izoliacinių medžiagų rinkos analizė parodė, kad mineralinės vatos ir polimerinių izoliacinių medžiagų poreikis vis didės, kartu tai rodo, kad rinkoje šios dvi medžiagos išlieka populiariausios (2 pav.) (Insulation Market Analysis By Product, 2017). Buvo prognozuojama, jog pasaulinės statybinių šilumos izoliacinių medžiagų rinkos vertė 2021 m. sieks 28,39 milijardus JAV dolerių, o tarp 2016–2021 m. ši rinka didės 3,5 % (Berardi, Naldi, 2017).

Prognozuojama, kad dėl vyriausybinių priemonių – sumažinti išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį, pagerinti sąnaudų efektyvumą ir priimti energiją taupančių pastatų reglamentus, skatinimo – šilumos izoliacinių medžiagų paklausos pastatuose metinis augimo koeficientas (*Compound Annual Growth Rate* – CAGR) 2016–2027 m. padidės iki 4,5 %. ES šilumos izoliacinių medžiagų

poreikis vertinamas 3,48 % (2015–2027 m.). Taigi, mineralinė vata (stiklo ir akmens vata) ir polimerinės medžiagos (EPS, XPS, PUR / PIR) yra labiausiai pageidaujamos medžiagos pastatų šilumos izoliacijai (Pavel, Blagoeva, 2018).



**2 pav.** Izoliacinių medžiagų poreikis 2012–2020 m. (Europa, NVS ir Rusija, Šiaurės Amerika ir Australija) (Insulation Market Analysis By Product, 2017)

Šiandien didžiausią šiltinimo medžiagų potencialą statybų rinkoje turi tos medžiagos, kurios pasižymi geriausiais eksploataciniais parametrais, pavyzdžiui, mineralinė (akmens ir stiklo) vata ir polimerinės putos, tokios kaip polistireninis ir poliuretalinis putplasčiai. Poliuretalinis putplastis (PUR ir PIR) turi daugiau pranašumo esant aukštesniems šilumos izoliacijos reikalavimams: tam pačiam termoizoliacijos efektyvumui pasiekti reikalingas plonesnis šilumos izoliacijos storis lyginant su kitomis izoliacinėmis medžiagomis (Pavel, Blagoeva, 2018).

Polimerinės izoliacinės medžiagos pateko į statybų rinką kaip tiesioginis įprastų šilumos izoliacinių medžiagų, tokių kaip asbestas, stiklo pluoštas, mineralinis pluoštas, celiuliozės pluoštas, perlitas, vermikulitas ir kt., pakaitalas. Polimerinės putos yra vienos efektyviausių šilumos izoliacinių medžiagų, kadangi jų porose uždarytos putodario dujos pasižymi itin mažu šilumos laidumo koeficientu. Poliuretano (PU) putos yra pagaminamos polimerizacijos būdu izocianatui reaguojant su polioliu ir tokių mišinį išpučiant vienu ar keliais putodariais (Sarier, Onder, 2007). Standžiųjų poliuretaninių putų tipinės šilumos laidumo koeficiento vertės siekia 0,02–0,03 (W/m·K) (Feldman, 2010; Zhang ir kt., 2017), tankis svyruoja nuo 30 iki 100 (kg/m<sup>3</sup>), o stipris 10–150 kPa. Šios putos gali būti naudojamos esant temperatūros diapazonui nuo –80 °C iki +120 °C. Labai mažas šiluminis laidumas leidžia naudoti plonesnes plokštes, kai reikia taupyti erdvę.

Poliuretalinės šilumos izoliacinės medžiagos turi platų panaudojimo spektrą, jos gali būti naudojamos pastatų šiltinimui, šaldyto maisto sandėliavimui, šaldytuvuose, kuro vamzdynuose, suskystintų naftos dujų transportavimo vamzdynuose, baldų pramonėje, čiužinių gamyboje ir kt. (Khatoon ir kt., 2021; Kurańska ir kt., 2013; Verdejo ir kt., 2009; Zhang ir kt., 2017). Šiandien daugiau nei

95 % visų pasaulyje gaminamų šaldytuvų yra izoliuoti poliuretano putomis, o pagrindinis inovacijų variklis yra siekis dar labiau optimizuoti energijos suvartojimą (Engels ir kt., 2013). Purškiamos PU putos labai ekonomiškai sujungia šilumos izoliaciją, mechaninį stiprumą ir sukibimą. Putų plokštės, kurių storis siekia iki 25 cm, gaminamos dvigubos juostos laminatoriumi. Priklausomai nuo plokščių dangų tipo (plėvelės, popierius, aliuminio folija, mediena), galima pagaminti lankstaus ar standaus paviršiaus putplasčio plokštes (Feldman, 2010).

Putų pagrindu pagaminti gaminiai taip pat vaidina vis svarbesnį vaidmenį padedant laikytis Europos energijos taupymo taisyklių naujiems pastatams. Polimerinės putos taip pat gali būti montuojamos tarp įvairių dangų, tokių kaip plienas, gaminant statybines plokštes. Tokios plokštės pasižymi nedideliu svoriu, tvirtumu ir geromis šilumos izoliacinėmis savybėmis, jas lengva transportuoti ir nesudėtinga sumontuoti. Pastatų stogams šiltinti naudojamos standžiosios poliuretano putų plokštės. Šias plokštes tradiciniu būdu sumontavus ant stogo galima padengti stogų dangomis, kurios savo ruožtu gali būti užlydomos bitumu (Halliwell, 2003).

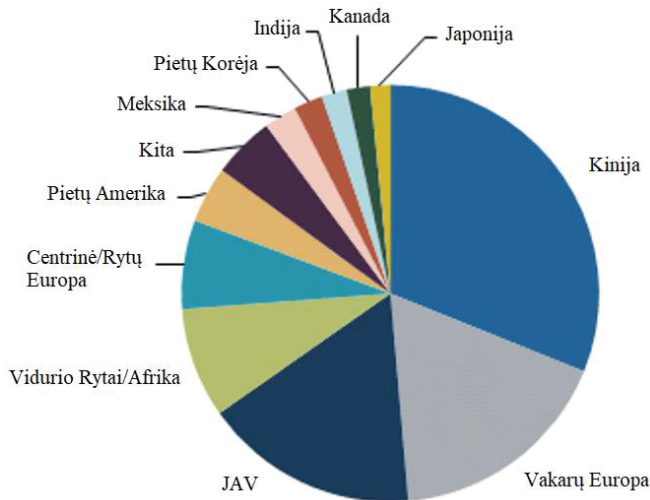
Poliizocianurato (PIR) putos yra naudojamos ten, kur reikalingas atsparumas ugniai, jos pasižymi karščiui atsparia struktūra (Okuzono ir kt., 2001). PIR izoliacija yra plačiausiai naudojama šilumos izoliacinė medžiaga sutapdintuose stoguose JAV, užimanti  $\geq 70$  % rinkos dalies (Berardi, 2017b; Biswas ir kt., 2018). Toks didelis procentas tikriausiai yra dėl to, kad PIR šiluminė varža dažnai yra dvigubai didesnė, palyginti su to paties storio mineralinės vatos šilumos izoliacinėmis medžiagomis. Tačiau daugelyje Europos šalių PIR gaminiai užima didesnę vertikalių statybinių konstrukcijų šiltinimo rinkos dalį (Berardi, 2017b).

Didžiausias standžiųjų PUR / PIR putų kiekis pagaminamas plokščių pavidalu specialiose mašinose, kurios iš esmės yra dvigubi konvejeriai, tarp kurių putos masė pakyla iki kontroliuojamo storio. Dengtos plokštės, pagamintos šiose mašinose, plačiai naudojamos statybose kaip stogo ar sienų šilumos izoliacija (Feldman, 2010).

Pasaulinis polimerinių medžiagų suvartojimas 2011 m. sudarė 280 mln. tonų, iš jų 14 mln. t sudarė poliuretano žaliavos, poliizocianatai ir polioliai (5 %). Daugiau nei 66 % poliuretano žaliavų (poliizocianatų / poliolių) naudojama putų gamyboje, apie 30 % viso pasaulinio poliizocianato ir poliolio poreikio tenka šiam panaudojimui (Engels ir kt., 2013). Azijos Ramiojo vandenyno regione (Kinijoje, Japonijoje, Indijoje, Australijoje, Naujojoje Zelandijoje ir Pietryčių Azijoje) PIR izoliacijos rinkos vertė 2014 m. buvo prilyginama 0,66 mlrd. USD (gamybos apimtis – 457 kt). Tikimasi, kad šių medžiagų rinka 2021 m. sieks 1,06 mlrd. USD (arba 704 kt). 2014 m. apie 70 % PIR izoliacinės medžiagos buvo naudojama negyvenamųjų namų sektoriuje, komercinės paskirties stogų ir sienų konstrukcijose, nes komercinių ir pramoninių pastatų sektoriuose galioja reikalavimai naudoti efektyvesnes medžiagas tiek dėl atsparumo ugniai, tiek dėl geresnės šiluminės varžos (Kanchanapiya, Metchacanon ir Tantisattayakul, 2018).

Kitas grafikas (3 pav.) rodo pasaulinį PUR/PIR izoliacijos naudojimą 2016 m. (Chemical Economics Handbook, 2016). Kaip matyti iš grafiko, daugiausiai poliuretano izoliacijos sunaudojančios šalys yra Kinija, Vakarų Europos šalys ir Jungtinės Amerikos Valstijos. Šiaurės Amerikos stogų šiltinimo rinkoje

poliizocianuratas yra labiausiai paplitusi medžiaga, naudojama 50–70 % visų komercinės paskirties naujų ar renovuojamų stogų konstrukcijose (Berardi, 2017b).



**3 pav.** Pasaulinis PUR / PIR suvartojimas 2016 m. (Chemical Economics Handbook, 2016)

Suskaičiuota, kad 2015 m. polimerinės putų medžiagos (EPS, PUR / PIR ir XPS) užėmė 42 % Europos izoliacinių medžiagų rinkos, o iki 2025 m. jos užims dar didesnę rinkos dalį, iki 46 % (Pavel, Blagoeva, 2018). Europoje, poliuretano (PUR / PIR) izoliacijos pramonė yra tiesiogiai susijusi su daugiau nei 70 000 bendrovių, kurios sukuria daugiau nei 3,8 mln. Darbo vietų, o jų generuojama ekonominė vertė yra didesnė nei 59 mlrd. EUR (PU Europe, 2021). Prognozuojama, kad dėl geresnių šių gaminių izoliacinių savybių ir prieinamumo (ypač EPS), polimerinių putų izoliacijos segmentas iki 2027 m. augs intensyviau (Pavel, Blagoeva, 2018).

## 1.2. PU putos

Statybos pramonė labai atsargiai keičia gerai išbandytus metodus ir pagrįstai reikalauja, kad statybinės medžiagos būtų atitinkamai patikrintos ir išbandytos. Ši sritis yra griežtai reglamentuojama, reguliavimo lygiai kiekvienoje šalyje skiriasi, todėl statybos sektoriaus dalyviams įtikinti pereiti prie naujų medžiagų niekada nebuvo lengva, tačiau kartais polimerinių medžiagų nauda yra per didelė, kad jas būtų galima ignoruoti, polimerinės medžiagos nuolatos populiarėja skirtingose pramonės šakose ir daro labai didelę įtaką ekonomikai (Halliwell, 2003).

Poliuretanoi (PU) buvo sukurti 1930 m. ir iki 1950 m. praktiškai buvo naudojami tik karinėje ir aviacinėje pramonėse (Bozsaky, 2010). Jų naudojimas plataus vartojimo ir pramonės gaminiuose išpopuliarėjo 1950 m. pabaigoje, kai šios medžiagos buvo pradėtos naudoti čiužiniuose (lanksčios putos), įvairiuose padengimuose (alyvos pagrindu modifikuotas poliuretanas) ir kaip šilumos izoliacija (standžiosios putos) (Cornille ir kt., 2016). Nuo 1970 m. išaugo standžiųjų PUR putų šilumos izoliacijos naudojimas šaldytuvuose, daugiasluoksnių plokščių gaminiuose ir kaip purškiamos izoliacinės putos. Sukūrus naujus cheminius receptus ir

katalizatorius Europoje ir Jungtinėse Amerikos Valstijose, atsirado naujos kartos produktas, vadinamas poliizocianurato (PIR) putomis, kurios pirmą kartą pasirodė JAV rinkoje aštuntojo dešimtmečio viduryje (Jamshidi, 2009).

Poliuretano (PU) putų sritis yra viena iš sparčiausiai augančių polimerų technologijų sričių. Atliekami intensyvūs tyrimai, siekiant modifikuoti jų savybes, kad jos atitiktų klientų reikalavimus. Putų medžiagoms, civilinėje inžinerijoje naudojamoms kaip statybinės ar izoliacinės medžiagos, reikalingas pakankamas tvirtumas, atsparumas senėjimui ir oro sąlygoms, matmenų ir šiluminis stabilumas bei atsparumas ugniai (Liszkowska ir kt., 2019).

Putų poliuretanai (PUR) ir poliizocianuratai (PIR) yra dvi giminingų polimerų klasės, gaunamos reaguojant keliems komponentams. PIR yra modifikuotas PUR, dominuojantis izocianatų grupės sistemoje ir turintis kitokį poliolio santykį. MDI dalis PIR yra didesnė, o vietoje eterių, dalyvaujančių poliolių reakcijoje, naudojamas polieterio poliolis. PIR gamybai naudojami katalizatoriai ir priedai taip pat skiriasi nuo tų, kurie naudojami PUR gamyboje. PIR putos gaunamos santykiu 1:2 (poliolis ir izocianatas), PUR putos – 1:1. PIR polimerizacija atliekama aukštesnėje nei PUR temperatūroje, dėl to izocianurato perteklius reaguoja su savimi, formuodamas stipresnius ir stabilesnius ryšius (Gravit ir kt., 2017; Jelle, 2011; Kanchanapiya ir kt., 2018; Schiavoni ir kt., 2016).

Pagrindinis PUR ir PIR putų struktūros skirtumas yra didelis izocianurato žiedinių struktūrų kiekis PIR putose, atsirandantis trimerizuojant tris polimetrinio izocianato molekules. Grynosios PIR putos yra labai trapios, o tai riboja praktinį jų panaudojimą, todėl uretano ir izocianurato jungtys dažnai derinamos putose. Medžiagoje esantis uretano komponentas suteikia pageidaujamas fizines savybes, o izocianurato komponentas – reikiamą atsparumą ugniai (Giunta d'Albani ir kt., 2017; Modesti ir kt., 2018; Vitkauskienė ir kt., 2011). Taigi, PIR šilumos izoliacija pasižymi geresnėmis atsparumo ugniai savybėmis nei PUR (Xu ir kt., 2017). PIR eksploatacinė temperatūra siekia +140 °C, o PUR galima naudoti ne aukštesnėje nei +100 °C temperatūroje. Tiek PUR, tiek PIR putos pasižymi dideliu atsparumu drėgmei, jos praktiškai nepraleidžia garų. Svarbus veiksnys yra ir tai, kad putų poliuretano (PUR / PIR) tankis yra dešimt kartų mažesnis nei medienos. Pastarųjų dešimties metų statybų patirtis rodo, kad daugiasluoksnių plokščių ir putų poliuretano šilumos izoliacinių plokščių (PUR ir PIR) naudojimas yra pats efektyviausias ir perspektyviausias tiek dėl paprasto montavimo ir montavimo išlaidų sumažinimo, tiek dėl energijos taupymo (Vatin, Sultanov ir Krupina, 2019).

Be atsparumo ugniai, PUR / PIR taip pat pasižymi dideliu cheminiu ir biologiniu stabilumu. Šios šilumos izoliacinės medžiagos yra atsparios įprastoms cheminėms medžiagoms, naudojamoms pastatų statyboje: tirpikliams, naudojamiems klijuose ir dažuose, medienos apsaugos produktams, taip pat jos yra atsparios pelėsiui ir puvimui. Dėl ultravioletinių spindulių poveikio PUR / PIR izoliacinės plokštės pakeičia spalvą, tačiau tai nėra techninis trūkumas (Kanchanapiya ir kt., 2018).

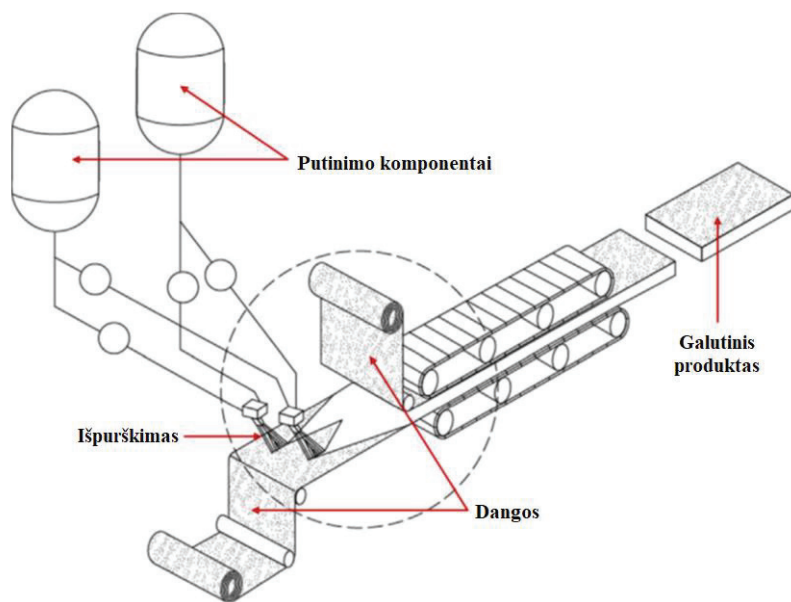
Dažniausiai naudojamos standžiųjų PU putų gamybos technologijos:

- putinimas vietoje (*foam-in-place*);
- purškiamos putos;

- gamybos linijoje gaminamos plokštės ir daugiasluoksniai paneliai.

Putinimas vietoje yra netaisyklingų tuštumų ar ertmių užpildymo metodas – šia technologija išgaunamas vienodas tankis ir putų struktūra. Purškimo technika leidžia didelius paviršius padengti putų poliuretano sluoksniu ir, beveik iš karto, ant jau suformuoto sluoksnio galima purkšti naują sluoksnį, taip formuojant reikiamą storį.

Gamybos linijoje gaminamas plokštės galima formuoti pagal reikiamą formą ir dydį (Halliwell, 2003). 4 pav. pavaizduota tipinių poliizocianurato plokščių gamyba.



4 pav. Tipinis standžiųjų PIR putų plokščių gamybos procesas (Biswas ir kt., 2018)

Putos šerdį sudaro uždarytų porų standžiosios poliizocianurato putos, gautos cheminės reakcijos metu reaguojant „A“ pusei (MDI) ir „B“ pusei (poliesterio poliolis su įvairiais priedais, tokiais kaip katalizatoriai, paviršiaus aktyviosios medžiagos ir antipirenas), kartu su putodariu (pentanu ar kt.). Šios cheminės medžiagos susijungia ant formavimo stalo ir greitai reaguoja, kad susidarytų uždarytų porų putų plokštė, kuri yra suformuojama tarp viršutinio ir apatinio dangų sluoksnio (sienų šiltinimui dažniausia naudojamas PIR su kraftinio popieriaus, padengto aliuminio folija, danga), po to sukietėja laminatoriuje (neparodytas 4 pav.), kuriame palaikoma aukštesnė temperatūra, kuri padeda formotis poroms ir sukietina plokštę. Vėliau plokštė tiekama per pjūklus, kurie apipjausto plokštę iki norimo pločio, o tada per skersinį pjūklą, kuris plokštės supjausto norimu ilgiu. Paruoštos standžios plokštės sukraunamos viena ant kitos, supakuojamos plastikinėje plėvelėje, paženklintos etiketėmis ir krautuvu perkeliamos į sandėlio zoną, kur yra sandėliuojamos ir galiausiai pakraunamos į sunkvežimius išgabimui (Biswas ir kt., 2018; Kapps, Buschkamp, 2004; Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Association, 2015).



## 1.2.1. PIR šiluminės savybės

Viena svarbiausių statybinių medžiagų savybių yra jų šiluminis laidumas. Jis turi didžiausią įtaką PIR gaminiams apšiltintos atitvaros šilumos perdavimui ir šiluminei varžai (atitinkamai  $U$  ir  $R$  vertėms), kuriomis remiantis nustatoma atitvaros atitiktis statybos reglamentų keliamiems atitvarų projektavimo reikalavimams. Statybinių medžiagų šiluminis laidumas skiriasi priklausomai nuo temperatūros ir drėgmės kiekio (Pérez-Bella ir kt., 2015; Shi ir kt., 2019).

Pirmasis šiluminio laidumo sąvoką pristatė Furjė. Furjė dėsnis teigia, kad šilumos perdavimo greitis per medžiagą yra proporcingas neigiamam temperatūros gradientui ir plotui, per kurį teka šiluma. Jei šilumos perdavimas vyksta viena kryptimi, per vientisą medžiagos sluoksnį stacionariomis sąlygomis, galime parašyti (Berardi ir kt., 2018; Leach, 1993):

$$q = -\frac{\lambda}{s} \cdot (\theta_e - \theta_i) \cdot A; \quad (1)$$

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot (\theta_e - \theta_i) \cdot A \cdot \Delta t; \quad (2)$$

čia:  $q$  – šilumos srauto tankis,  $W/m^2$ ;  $Q$  – šiluminiai nuostoliai,  $W$ ;  $\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas,  $(W/m \cdot K)$ ;  $s$  – medžiagos sluoksnio storis,  $m$ ;  $A$  – plotas,  $m^2$ ;  $\Delta t$  – laiko intervalas;  $\theta_i$  – vidinio paviršiaus temperatūra,  $^{\circ}C$ ;  $\theta_e$  – išorinio paviršiaus temperatūra,  $^{\circ}C$ .

Kadangi šiluminis laidumas yra šilumos judėjimas tiesioginio molekulinio kontakto būdu, tai jis yra svarbiausias kietųjų medžiagų šilumos perdavimo būdas, kartais svarbus skysčiams ir tik kartais – dujoms. Konvekcija yra šilumos perdavimas judant molekulėms (skysčiams ar dujoms), pasikeitus jų šilumos kiekiui. Šis šilumos perdavimo būdas svarbus tarp skysčių ir kietųjų medžiagų arba skysčių viduje. Galiausiai spinduliavimas yra šilumos perdavimas elektromagnetinėmis bangomis per dujas arba vakuumą. Trijų šilumos perdavimo būdų sąveika lemia bendrą šilumos perdavimo per porėtą medžiagą efektyvumą ir yra „tariamasis šiluminis laidumas“. Šis terminas vartojamas norint parodyti „grynojo laidumo“ šilumos perdavimo poringose medžiagose trūkumą. Kartu su šilumos perdavimo būdais, atliekant šilumos perdavimo analizę, reikėtų atsižvelgti ir į garų drėgmės fazinius pokyčius, nors tai nėra griežtai energijos perdavimo mechanizmas, nes būsenos pokyčiai sugeria ir išskiria didelius šilumos kiekius. Tai reiškia, kad svarbu ir garų srautas, ir drėgmės absorbcija, ir jie paprastai yra kritiškesni izoliacinėms medžiagoms su atvirų porų struktūromis nei uždaru (Berardi, Naldi, 2017).

Polimerinės putos yra viena iš efektyviausių šilumos izoliacinių medžiagų, nes putinimo dujos, pasižyminčios ypač mažu šiluminiu laidumu, yra „užrakintos“ uždaroje porėtoje putos konstrukcijoje. Idealioms putinimo dujoms turi pasižymėti mažu dujų šiluminiu laidumu ir geru cheminiu stabilumu, neturi būti degios ir sprogios, nekelti pavojaus aplinkai ir žmonėms (Zhang ir kt., 2017).

Anot Ferkl ir kt. (2017), poliuretano putplasčio izoliacinės savybės nustatomos pagal jų morfologiją, t. y. porėtumą, porų dydį, statramsčių kiekį ir kt., ir pagal poliuretano bei poras užpildančių dujų medžiagų savybes, t. y. jų šiluminį laidumą ir kompleksinio polimero lūžio rodiklį. Poliuretano šiluminės savybės

priklauso nuo jų mechaninių savybių. Uždarų porų putos pasižymi didesniu terminiu stabilumu, nei atvirų porų putos (Liszowska, Czupryński ir Paciorek-Sadowska, 2016). Uždarų porų medžiagoje izoliacijos efektą garantuoja tai, kad porose esantis oras ar kitos dujos negali judėti, todėl konvekcinis šilumos perdavimas yra žymiai lėtesnis. Pavyzdžiui, polimerinių izoliacinių medžiagų (tokių kaip putų polistirenas ir poliuretanas) poras užpildo ne oras, o fluoro angliavandeniliai, todėl šių medžiagų šiluminis laidumas yra mažesnis nei oro. Kitokia elgsena pastebima putintose izoliacinėse medžiagoje, tokiose kaip poliizocianuratas. Šios rūšies šilumos izoliacija paprastai pasižymi mažomis šiluminio laidumo vertėmis (dėl putinimo dujų esančių porose), todėl ši sąlyga sulėtina šilumos perdavimą konvekcijos būdu ir šiluminiu laidumu oro atžvilgiu. Temperatūrai nukritus žemiau putinimo dujų kondensacijos taško, porose susidaro kondensatas ir šilumos laidumo koeficiento vertė padidėja dėl didesnio skystos fazės laidumo, lyginant su putinimo dujų dujine faze (Berardi ir kt., 2018; Cai, Cremashi ir Ghajar, 2014). Putinimo dujų perėjimas iš susikondensavusio skysčio į dujinę būseną priklauso nuo jos veikiančios temperatūros. Kad dujos veiktų kaip izoliacinės dujos PUR / PIR putų porose, jos turi būti dujinėje fazėje (Bogdan, Hoerter ir Moore, 2005).

Daugelis tyrėjų (Barrios, 2011; Feldman, 2010; Kirpluks ir kt., 2014; Tseng, Yamaguchi ir Ohmori, 1997) siūlo, kad bendras efektyvus (arba tariamasis) porėtų putų šiluminis laidumas  $\lambda^*$  turėtų šiuos keturis indėlius:

- šiluminis laidumas per kietąją medžiagą,  $\lambda_p$ , (W/m·K);
- šiluminis laidumas dujomis,  $\lambda_g$ , (W/m·K);
- šilumos konvekcija porose,  $\lambda_c$ , (W/m·K);
- šilumos spinduliavimas per porų sienelės ir per pačias poras, (W/m·K).

$$\lambda^* = \lambda_p + \lambda_g + \lambda_c + \lambda_r. \quad (3)$$

Porėtose putose, tokiose kaip PIR, šiluma perduodama per kietą medžiagą laidumu, o per poras – spinduliavimu, laidumu ir konvekcija. Kai porų dydis yra mažas, šilumos perdavimas konvekcijos būdu per poras yra nereikšmingas, t. y.  $\lambda_c = 0$ , (W/m·K) (Jarfelt, Ramnäs, 2006; Lorenzetti ir kt., 2015; Wang, Foster, 2017; Wu, Sung ir Chu, 1999).

Biedermann ir kt. (2001) savo tyrimuose pateikia (4) formulę, kuri galioja tik optiškai storoms putoms, turinčioms pakankamai galimybių blokuoti šiluminę spinduliuotę. Kietosios medžiagos šiluminis laidumas  $\lambda_p$  priklauso nuo neporėto kieto polimero šiluminio laidumo  $\lambda_s$  ir porų sijų frakcijos  $f_s$ . Atsižvelgiant į poros pailgėjimo mastą, gaunamas matricos šiluminis laidumas  $\lambda_m$ :

$$\lambda_m = \lambda_s \cdot \frac{(1-n)}{3} \cdot [f_s] \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{1/2} + 2 \cdot (1 - f_s) \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{4}}; \quad (4)$$

čia:  $a$  ir  $b$  – statmenai ir lygiagretūs temperatūros gradientui porų skersmenys,  $\mu\text{m}$ ;  $II$  – porėtumas.

Nuo temperatūros priklausomam neporėto kieto polimero šiluminiui laidumui apskaičiuoti gali būti taikoma tokia empirinė formulė:

$$\lambda_s(T) = 197 \cdot (1 + 0.0017 \cdot T) \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$



Šis ryšys buvo nustatytas matuojant neporėtų dervų šiluminį laidumą apsaugotos karštosios plokštės metodu bei karštosios vielos matavimo metodu matuojant susmulkintų ir suspaustų putų šiluminį laidumą. Porų sijų frakcija  $f_s$  buvo apskaičiuota pagal Glicksmo formulę:

$$f_s = 1 - \left[ \frac{t \cdot 3.46 \cdot \rho_s}{d \cdot \rho_f} \right]; \quad (6)$$

čia:  $t$  – poros sienelės storis,  $\mu\text{m}$ ;  $d$  – sienelės skersmuo,  $\mu\text{m}$ ;  $\rho_s$  – polimero tankis ( $\rho_s = 1250 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ );  $\rho_f$  – putos tankis,  $\text{kg/m}^3$  (Biedermann ir kt., 2001).

Tseng ir Kuo (2002) atkreipia dėmesį, jog dėl sudėtingos įvairių mechanizmų sąveikos, šilumos izoliacijos šiluminiam efektyvumui apibūdinti yra naudinga ir patogų apibrėžti „efektyvųjį“ (arba „tariamąjį“) šiluminį laidumą  $\lambda_{eff}$ . Jeigu šilumos perdavimas vyksta viena kryptimi,  $\lambda_{eff}$  apibrėžiamas kaip:

$$q = \frac{\lambda_{eff} \cdot (\theta_e - \theta_i)}{s}. \quad (7)$$

Optiškai storoms putoms spindulinį šilumos srautą galima išreikšti taip:

$$q_r(x) = -\frac{4}{3 \cdot \sigma_{e,R}} \cdot \frac{\partial e_b}{\partial x} = -\frac{16}{3 \cdot \sigma_{e,R}} \cdot \sigma T^3 \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_r \cdot \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (8)$$

čia:  $T$  – vidutinė temperatūra,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $e_b$  – juodojo kūno spinduliuojama energija,  $\text{W/m}^2$ ;  $\sigma$  – Stefano-Bolcmano konstanta,  $(\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $\lambda_r$  – spindulinis šiluminis laidumas,  $(\text{W/m} \cdot \text{K})$ ;  $\sigma_{e,R}$  – Rosselando koeficientas,  $\text{m}^{-1}$ . Dėl difuzijos aproksimacijos, spinduliavimas ir šiluminis laidumas yra atsieti, todėl „efektyvusis“ šiluminis laidumas gali būti užrašytas taip:

$$\lambda_{eff} = \lambda_r + \lambda_p + \lambda_g; \quad (9)$$

čia:  $\lambda_p$  – šiluminis laidumas per kietąją medžiagą,  $(\text{W/m} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_g$  – šiluminis laidumas dujomis,  $(\text{W/m} \cdot \text{K})$ . Rosselando koeficientas užrašomas pagal (10) formulę:

$$\frac{1}{\sigma_{e,R}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_{e\lambda}} \cdot \frac{\partial e_{b\lambda}}{\partial T} \cdot d\lambda / \int_0^{\infty} \frac{\partial e_{b\lambda}}{\partial T} \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_{e\lambda}} \cdot \frac{\partial e_{b\lambda}}{\partial e_{b\lambda}} \cdot d\lambda; \quad (10)$$

čia:  $e_{b\lambda}$  – spektrinė juodojo kūno energija,  $\text{W/m}^2$ ;  $\sigma_{e\lambda}$  – spektrinis nykimo koeficientas,  $\text{cm}^{-1}$ . Rosselando koeficientas yra vidutinė  $\sigma_{e\lambda}$  reikšmė, vertinama pagal vietinį spektrinį energijos srautą. Jei galime išmatuoti  $\sigma_{e\lambda}$ , iš aukščiau pateiktos lygties galime gauti  $\sigma_{e,R}$  ir apskaičiuoti spindulinį šilumos srautą iš (8) formulės. Praktikoje dėl spektrometų apribojimų  $\sigma_{e\lambda}$  gaunamas tik artimiausioje infraraudonųjų spindulių srityje, kurioje išspinduliuojama daugiausia šilumos energijos (Tseng, Kuo, 2002).

Pagal Berardi (2019), „tariamasis šiluminis laidumas“ priklauso nuo šilumos mainų, taigi ir nuo šilumos perdavimo spinduliuote, kuris keičiasi atsižvelgiant į temperatūrą. Kadangi spinduliuotė paprastai yra ribota, daugumai medžiagų būdingas linijinis šiluminio laidumo ir temperatūros ryšys. Porėtos medžiagos šiluminio laidumo priklausomybę nuo temperatūros galima paaiškinti taikant

pagrindinius šilumos perdavimo dėsnius, nes padidėjus temperatūrai dujų molekulės vibruoja greičiau, sukeliančios didesnę šilumos perdavimą spinduliavimu ir konvekcija.

Šiluminis laidumas spinduliavimo būdu  $\lambda_r$  matematiškai gali būti aprašytas pagal (11) ir (12) formules (Biedermann ir kt., 2001; Hejna ir kt., 2018; Tao ir kt., 2001):

$$\lambda_r = \frac{16 \cdot \sigma T^3}{3 \cdot K}, \quad (11)$$

kur:

$$K = 4.1 \cdot \frac{\sqrt{f_s \cdot \frac{\rho_f}{\rho_p}}}{d}; \quad (12)$$

čia:  $\sigma$  – Stefano-Bolcmano konstanta, lygi  $5,67 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>);  $T$  – temperatūra, °C;  $K$  – Rosselando koeficientas, m<sup>-1</sup>;  $f_s$  – porų sijų frakcija;  $\rho_f$  – putos tankis, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – polimero tankis, kg/m<sup>3</sup>;  $d$  – poros skersmuo,  $\mu$ m.

Remiantis pateiktomis lygtimis akivaizdu, kad porų dydžio padidėjimas sukelia ir šilumos perdavimo spinduliavimo būdu  $\lambda_r$  padidėjimą, taigi ir putų bendrosios  $\lambda$  vertės padidėjimą.

Apibendrinus galima teigti, jog standžiųjų poliuretano (PUR / PIR) putų šiluminis laidumas priklauso nuo:

- naudotų putinimo dujų;
- tankio;
- temperatūros;
- drėgmės.

Taigi galima konstatuoti, jog šilumos laidumo koeficientas yra priklausomas nuo tariamojo putplasčio tankio, nes jis siejamas su dujų ir kietojo polimero dalimi bendrame medžiagos tūryje. Akivaizdu, kad mažesnis tankis padidina  $\lambda_g$  įtaką bendrai  $\lambda$  vertei, o putų porose esančių dujų šilumos laidumo koeficientas yra mažesnis nei kietojo polimero. Dažniausiai kaip šilumos izoliacinės medžiagos naudojamos gana mažo tariamo tankio putos. Didelis uždarytų porų kiekis taip pat yra naudingas šilumos izoliacinėms savybėms, nes cheminio putojimo metu išsiskyrusios putinimo dujos ar anglies dioksidas yra „užrakinami“ uždaroje porose. Tuo tarpu atvirų porų struktūros atveju šių dujų mainai su oru vyksta daug greičiau (Hejna ir kt., 2018).

Deklaruojama vertė, nurodoma esant tam tikram patikimumo lygiui, yra tikėtina statybinės medžiagos ar gaminio šiluminių charakteristikų vertė, įvertinta remiantis duomenimis, išmatuotais esant etaloninei temperatūrai ir storiui (Bomberg, Kumaran, 1995). Medžiagos šiluminis laidumas pastato apvalkalo eksploatavimo sąlygomis apibūdinamas kaip projektinis šilumos laidumo koeficientas,  $\lambda_{ds}$  (W/m·K). Šios projektinės vertės turėtų būti naudojamos pastato šiluminiams skaičiavimui, tokiu būdu realiai apibūdinant jo higroterminį elgesį kiekvienoje situacijoje. Išorės ir vidaus aplinkos sąlygos laikui bėgant skiriasi, atsižvelgiant į vietos klimatologiją ir aktyvumą pastate. Panašiai kiekvienos medžiagos temperatūra

ir drėgmės būklė skiriasi, priklausomai nuo atitvaros konfigūracijos, atsižvelgiant į medžiagos storį ir jos padėtį atitvaroje. Savo ruožtu medžiagų drėgnumas nėra proporcingas santykinei drėgmei: drėgmės pernešimo mechanizmai (t. y. daugiausia garų difuzija, kapiliarinė kondensacija ir paviršiaus difuzija) kiekvienoje porėtoje struktūroje yra derinami skirtingai, dėl ko atsiranda kiekvienai medžiagai specifinė sorbcijos funkcija. Kiti papildomi aspektai, tokie kaip saulės spinduliuotė, vėjo apkrova ir lietus, taip pat gali paveikti medžiagų  $\lambda_{ds}$  vertę (Pérez-Bella ir kt., 2015).

### 1.2.2. PIR gamyboje naudojamos putinimo dujos

PUR ir PIR putų izoliacijos gamyboje naudojamos medžiagos yra: metileno difenil-di-izocianatas, polioliiai, putinimo dujos, ugnį slopinantys priedai, paviršinio aktyvumo medžiagos, dervos ir katalizatoriai. Atvirų porų putos šiuo metu pučiamos anglies dioksidu, susidariusiu vandeniui reaguojant su izocianatu. Anglies dioksido dujos palieka putas po jų pūtimo. Šiais laikais standžiose PIR plokštėse paprastai naudojamos angliavandenilių putinimo dujos, pavyzdžiui, n-pentanas arba ciklopentanas (Berardi, Madzarevic, 2020).

PUR ir PIR putos gaminamos cheminės reakcijos tarp polialkoholių ir izocianatų būdu. Poliuretanai gaminami reaguojant diizocianatams (MDI ir / arba TDI) su įvairiais polioliais. Į šių gaminių cheminę sudėtį, priklausomai nuo galutinio produkto, įeina katalizatoriai, paviršiaus aktyviosios medžiagos, putinimo dujos ir, jei reikia, ugnies slopinimo priedai. Šiomis priemonėmis galima pagaminti įvairius gaminius – standžias ir lanksčias putas, elastomerus, klijus, dangas ir sandariklius. Savybes galima kontroliuoti keičiant putinimo dujų kiekį ir komponentų, tokių kaip polioliiai, molekulinę masę, kuri padeda kontroliuoti galutinės medžiagos lankstumą / standumą (Jamshidi, 2009).

Putinimo dujos naudojamos polimerinėse izoliacinėse medžiagose, norint sukurti uždaras poras šiltinimo medžiagos viduje ir pagerinti šilumos izoliacijos efektyvumą. Laikui bėgant polimerinių šilumos izoliacinių medžiagų šiluminės savybės blogėja, nes ore esantis azotas ir deguonis dideliu greičiu prasiskverbia į poras ir išstumia iš jų putinimo dujas (Choi, Kang ir Huh, 2017).

Anksčiau poliizocianurato putos buvo gaminamos naudojant fluorintų angliavandenilių technologiją, tačiau nustatyta, kad kai kurie fluorinti angliavandeniliai, ypač chlorfluorangliavandeniliai (CFC), prisideda prie Žemės ozono sluoksnio nykimo, dėl to 1990 m. pradžioje Monrealio protokolas JAV laipsniškai nutraukė jų naudojimą. Pirminės CFC, pavyzdžiui, CFC-11, konversijos į HCFC, pavyzdžiui, HCFC-141b, labai sumažino ozono sluoksnio ardymo potencialą (*Ozone Depletion Potential* – ODP), tačiau neatitiko galutinio Monrealio protokolo ODP tikslo, todėl jų buvo atsisakyta visiškai (Bogdan ir kt., 2005; Park ir kt., 2013). Šiuo metu dažniausiai naudojamos putinimo dujos yra angliavandenilis pentanas, kaip grynas izomeras arba kaip normaliųjų izomerų, izo arba ciklopentano mišiniai, kurių šiluminis laidumas yra nuo 0,012 iki 0,013 (W/m·K). Specialiems tikslams naudojami fluorinti angliavandeniliai, tokie kaip HFC-365mfc arba HFC-245fa (Engels ir kt., 2013; Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations, 2006). Kadangi pentano šiluminis laidumas (tarp 0,010 ir 0,014 (W/m·K)) yra daug

mažesnis nei oro, šilumos izoliacinių PU plokščių šiluminis laidumas siekia net 0,022–0,024 (W/m·K) (Engels ir kt., 2013).

Galima teigti, jog putinimo dujos parenkamos atsižvelgiant į jų mažo šiluminio laidumo ir lėtos difuzijos per putų polimerus ypatybes. O, atmosferos dujos turi didesnę šiluminę laidumą ir paprastai yra daug mažesnių molekulių, o difuzijos greitis per putų polimerus yra didesnis (Stovall, 2012).

Prociak, Pielichowski ir Sterzynski (2000) nustatinėjo standžiųjų poliuretano putų, išputintų skirtingais angliavandeniliais, dujų difuziją ir įrodė dujų difuzijos priklausomybę nuo pūtimo agento tipo ir porų dydžio, prisidėdami prie geresnio šilumos perdavimo per putų poliuretano proceso supratimo. Jie nustatė, kad nauji, draugiški aplinkai pūtimo agentai (šiuo atveju n-pentanas ir kiti dujų mišiniai), naudojami putinant poliuretano, atlieka dvejopą vaidmenį. Pirmiausia, jie stipriai veikia ne tik putos porose esančių dujų sudėtį, bet ir putos morfologiją, o antra, standžiųjų poliuretano putų dujų difuzija priklauso nuo poros struktūros ir dujų įtaka tampa reikšminga tada, kai poros dydis yra didesnis nei 2 mm.

Berardi ir Madzarevic (2020) tyrė pentano putinimo dujų koncentracijos pokyčius PIR putose. Atlikti eksperimentai aiškiai parodė pentano dujų koncentracijos pokyčius visuose tirtuose bandiniuose. Nors eksperimentų metu absoliuti išmatuota koncentracija buvo mažesnė, bet palygus su panašiais tyrimais nagrinėtoje literatūroje, buvo pastebėtas reikšmingas pentano koncentracijos sumažėjimas krosnyje sendintuose bandiniuose. Be to pastebėtas reikšmingas pentano koncentracijos padidėjimas tarp bandinių, išpjautų iš gaminio šerdies ir iš krašto, o tai patvirtina, kad difuzija (arba putinimo dujų ištekėjimas) per dangomis dengtas putas vyksta tik atviruose putų kraštuose. Tarp dviejų tirtų PIR putų, mažesnė pentano koncentracija buvo išmatuota aliuminio folija dengtuose bandiniuose, nei dengtuose kartonu. Apskritai šiame darbe naudotos metodikos dėka buvo išmatuotas reikšmingas pentano koncentracijos sumažėjimas tarp nesendintų ir pagreintai sendintų PIR bandinių. Nustatyta, kad PIR yra jautresnis eksploatacinėms sąlygoms ir turėtų būti naudojamas storesniuose ir didesnių matmenų sluoksniuose. Pageidautina, kad PIR būtų apsaugotas mažo oro pralaidumo dangos sluoksniu, siekiant efektyvaus eksploatacinio šiluminio laidumo, artimesnio deklaruojamai vertei.

### 1.2.3. PIR porų struktūra

Engels ir kt. (2013) poliuretano putas apibūdino kaip stipriai sujungtas, uždarytų porų medžiagas. Kaip jau išsiaiškinome, PUR ir PIR putos gaminamos šiek tiek skirtingose kompleksinėse reakcijose, kuriose dalyvauja izocianatų, hidroksilų, vandens, putinimo priemonių, katalizatorių, paviršinio aktyvumo medžiagų ir kartais kitų priedų, pavyzdžiui, ugnį slopinančių priemonių, mišinys. Putų gamyboje naudojamas putinimo dujų mišinys, kokia dujų sudėtis lieka porose po gamybos, o paviršinio aktyvumo medžiagos nustato putų struktūrinę matricos sudėtį. PUR / PIR putų, naudojamų kaip šilumos izoliacija, tankis svyruoja nuo 16 iki 48 (kg/m<sup>3</sup>). PUR / PIR putos susideda iš įvairaus dydžio porų, priklausomai nuo specifinės putų sudėties ir gamybos proceso. Formuojantis putplasčiui, sferiniai burbuliukai auga ir susijungia, kad susidarytų didesnės poros. Poros paprastai sudaro

tetraedrinę statramsčių grupę, jungiančią plonesnius plėvelės sluoksnius, kurie atskiria poras tarpusavyje (Barrios, 2011).

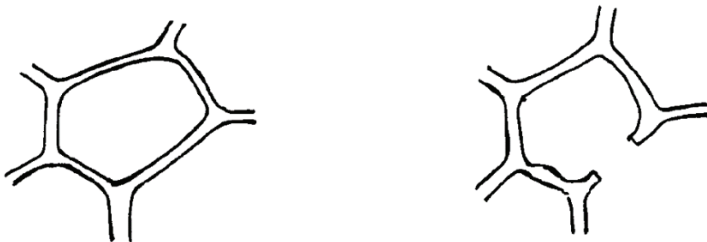
PUR gaminiai paprastai turi segmentuotą kietų ir minkštų segmentų struktūrą. Minkšti PUR segmentai iš esmės yra alifatiniai poliesteriai arba alifatiniai polieteriai. Kietus PUR segmentus sudaro struktūriniai vienetai, sudaryti iš kintamo diizocianato kiekio ir grandinės ilgintuvo (Yarahmadi, Vega ir Jakubowicz, 2017).

Norint pasiekti mažą šiluminį laidumą, porėtose medžiagose turėtų būti didelė porų tūrio dalis. Dujų porų pridėjimas į pagrindinę matricą yra efektyvus būdas sumažinti šilumos izoliacinių medžiagų šiluminį laidumą (Wang ir kt., 2017).

Gaminant PIR, susidaro daugybė mažų, uždarų porų, tai reiškia, kad putojimo reakcijos metu išgarintas putinimo agentas užpildo šias mažas poras kaip dujos (Bogdan ir kt., 2005). Porų dydis yra svarbus PUR / PIR mechaninėms savybėms ir šiluminiam laidumui (Kim ir kt., 2011; Seo ir kt., 2002). Sumažėjęs putų porų dydis turi įtakos PUR / PIR šiluminio laidumo sumažėjimui, nepaisant putinimo dujų tipo. Ankstesniuose tyrimuose buvo analizuojamas paviršinio aktyvumo medžiagų ir įvairių tipų priedų poveikis porų dydžiui ir putų šiluminiam laidumui, kadangi mažos ir vienodo dydžio poros efektyviai sumažina PUR / PIR šiluminį laidumą (Park ir kt., 2013). Labai svarbu, kad poliuretatinio putplasčio porų skersmuo būtų mažesnis nei 230  $\mu\text{m}$ , kad būtų užtikrinta geresnė šilumos izoliacinio gaminio elgsena senėjimo proceso metu (Choe, Choi ir Kim, 2019).

Wang ir kt. (2017) atlikę porėtų medžiagų šiluminių savybių optimizavimo analizę nustatė, jog geriausia porų forma turėtų pasižymėti dideliais atstumais šilumos atsparumui ir dideliais kontaktiniais plotais, kad sumažėtų šiluminis laidumas. Taip pat buvo nustatyta, kad geriausios yra elipsės formos poros, šiek tiek prastesnės – trikampės poros, o sferinės poros yra blogiausios. Didesnių, netaisyklingų porų susidarymas yra priežastis, dėl kurios sumažėja porų junginio šiluminis laidumas. Nustatyta, kad elipsės formos porų kiekio ir junginių didinimas yra efektyviausias būdas pagaminti medžiagas, kurių šiluminis laidumas mažas, o atsitiktinai ir reguliariai išdėstytos poros mažai veikia porėtų medžiagų su įvairios formos poromis, šiluminį laidumą.

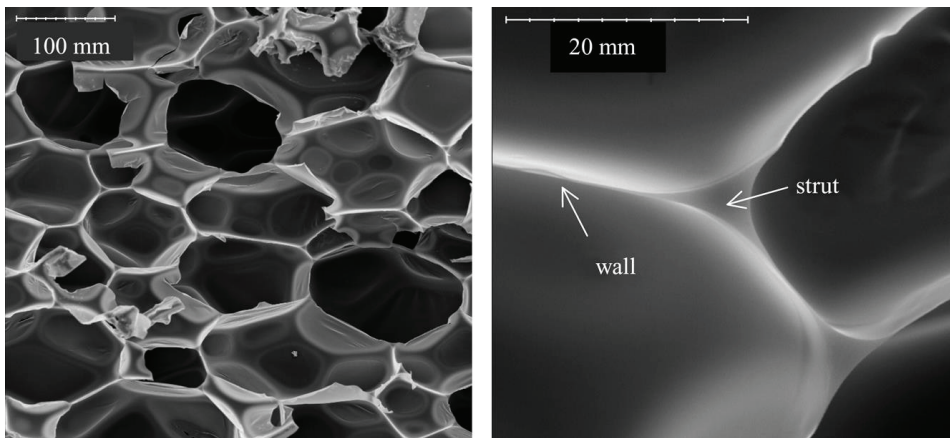
5 pav. pavaizduoti dviejų porų skerspjūviai; kairėje pusėje vaizduojama ideali pora, kurios polimero paviršiuje nėra skylių, dešinėje esanti pora yra tokia pati, išskyrus tai, kad vienoje poros sienoje yra skylė, kaip ir daugelyje porų realiuose putplasčiuose (Brandreth, 1989).



**5 pav.** Dvi poros: kairėje visiškai uždara pora, dešinėje – su skylė vienoje iš poros sienų (Brandreth, 1989)

Ekstrudinio polistireninio putplasčio (XPS) ir poliuretano (PUR / PIR) putas turi sudėtingiausią porų struktūrą, o porų sandūroje susidaro ne tik sienos (*wall*), bet ir statramsčiai (*strut*). Kaip pavyzdys, 6 pav. pateiktas PUR putų SEM vaizdas. Sienos paprastai yra plonesnės už statramsčius, o porų skersmuo yra daug didesnis nei statramsčių storis (Baillis, Coquard, 2008).

Porėtų medžiagų porų morfologija vaidina lemiamą vaidmenį visame šilumos perdavimo procese, nes šilumos perdavimas laidumu intensyviausias per dujas porose ir kietąją terpę. Be to spindulinė šilumos sklaida per porų sienas ir statramsčius daro didelę įtaką visam šilumos perdavimui poliuretano putose. Tarp šių šilumos perdavimo mechanizmų, vykstant šiluminiam laidumui dujose ir polimerų terpėje, ir spinduliuotei, spindulinis šilumos perdavimas laikomas svarbiausiu putplasčio medžiagose (Choe ir kt., 2019).

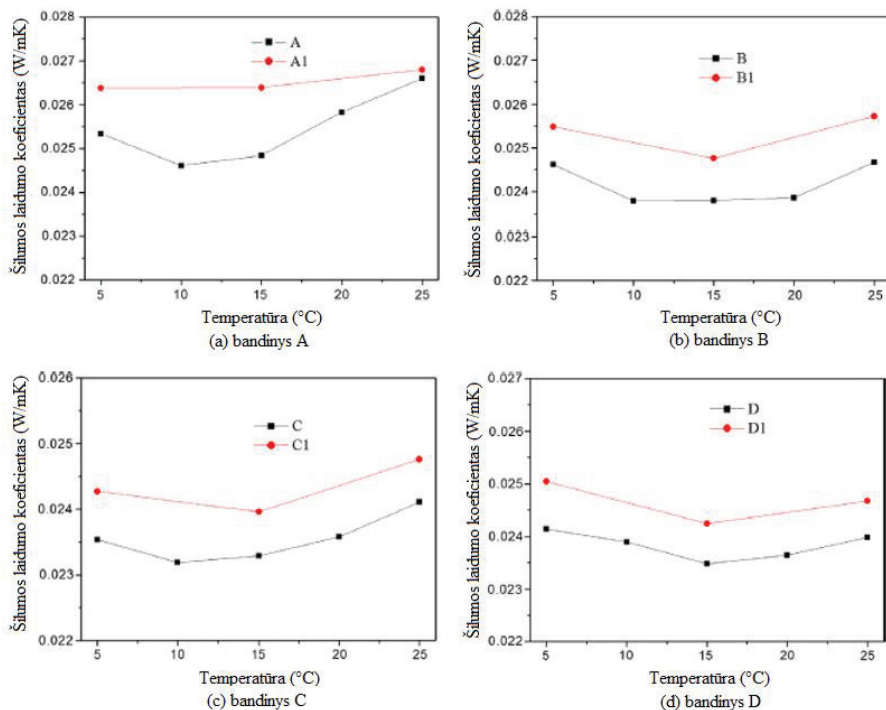


6 pav. PUR putų SEM nuotraukos (*wall* – poros sienelė; *strut* – erdvė tarp porų) (Baillis, Coquard, 2008)

Norėdami įvertinti dujų pasišalinimą iš uždarytų poliuretano putų porų, atlaikius aukštą temperatūrą, Zhang ir kt. (2017) matavo kelių bandinių šiluminio laidumo priklausomybę nuo skirtingų temperatūrų (nuo kambario temperatūros iki +70 °C temperatūros) pakartotinai atlikdami kontrolinį matavimą kambario temperatūroje. Bandinių A, B, C ir D šilumos laidumo koeficientai po bandinių išlaikymo aukštoje temperatūroje yra palyginami su bandinių šilumos laidumo koeficientais, matuotais išlaikius juos kambario temperatūroje (7 pav.).

A, B, C ir D vaizduoja pirminio matavimo rezultatus, o A1, B1, C1 ir D1 – matavimo rezultatus po išlaikymo aukštoje temperatūroje. Grafikai rodo, jog PU putų šiluminis laidumas skirtingose vidutinėse temperatūrose po bandinių išbuvimo aukštoje temperatūroje yra didesnis nei pirminis išmatuotas šiluminis laidumas. Tai įrodo, kad dalis dujų pasišalina iš uždarytų PU putų porų po bandinių palaikymo aukštoje temperatūroje, o bandymais nustatyta įtaka šiluminio laidumo padidėjimui siekia iki 3-6 %. Šių keturių bandinių šiluminis laidumas +70 °C temperatūroje yra 18 % (A bandinys), 33 % (B bandinys), 27 % (C bandinys), 26 % (D bandinys) didesnis, lyginant su šiluminiu laidumu esant +20 °C temperatūrai.





7 pav. Dujų, išeinančių iš uždarytų porų, įtaka šiluminiam laidumui po bandinių išlaikymo aukštoje temperatūroje (Zhang ir kt., 2017)

#### 1.2.4. PIR dangos

Pagrindinė nepralaidžių dangų iš abiejų PIR izoliacinių plokščių pusių paskirtis yra garantuoti maždaug pastovią deklaruojamąją šiluminę varžą ilguoju periodu (Mukhopadhyaya ir kt., 2002). Tačiau dažnu atveju nepralaidžios dangos, tokios kaip aliuminio folija, yra mažiau veiksmingos, nei tikimasi. Šių dangų sukibimas su puta dažnai būna su trūkumais, atveriant kelių poras užpildančių dujų mainams su atmosferoje esančiomis dujomis (Stovall, 2012). Lankščios dangos paprastai yra pagamintos iš mineralinio ar stiklo pluošto, aliuminio folijos arba kompozitinės plėvelės. Atsižvelgiant į PIR plokštės dangos tipą, PIR gaminius galima skirstyti į lankstaus paviršiaus arba standaus paviršiaus plokštes (Feldman, 2010).

Dažniausiai PIR dangos pasirinkimas priklauso nuo sienos konstrukcijos, kurioje bus sumontuota PIR šilumos izoliacija. Pavyzdžiui, plona aliuminio folija padengtas PIR paprastai naudojamas kaip ištisinė mūro ar betoninių sienų išorinė arba vidinė šilumos izoliacija bei gyvenamųjų ir komercinių medinių karkasinių sienų statyboje. PIR su plastikine danga paprastai naudojamas gaminant surenkamas gelžbetonines daugiasluoksnes plokštes bei vietoje surenkamas betonines sienas; tose pačiose konstrukcijose gali būti naudojamas ir PIR padengtas daugiasluoksne popierine danga. Skirtingi dangų tipai pavaizduoti 8 pav. (Makaveckas, Bliūdžius ir Burlingis, 2020).

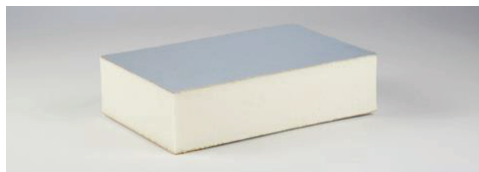
Zhang ir kt. (2017) atliktame tyrime išmatavo dviejų PU putų šiluminį laidumą +20 °C temperatūroje nuplėšus sandarią aliuminio foliją, vėliau šie bandiniai buvo sudėti į higrotermostatą ir savaitę laikomi +40 °C temperatūroje. Po to, PU putų šiluminis laidumas buvo vėl matuojamas esant +20 °C temperatūrai. Buvo nustatyta, jog pirmo bandinio šiluminis laidumas padidėjo 1,7 % nuo 0,0231 (W/m·K) iki 0,0235 (W/m·K), savaitę laikant +40 °C temperatūroje, o antro bandinio šiluminis laidumas padidėjo 3,6 % nuo 0,0224 (W/m·K) iki 0,0232 (W/m·K). Šiluminio laidumo padidėjimas nuėmus dangas nustatytas ne toks didelis, kaip matuojant PU putų šiluminį laidumą esant +20 °C temperatūrai, bandinius savaitę išlaikius kintančiose aplinkos sąlygose veikiant temperatūrai nuo -40 °C iki +70 °C (užfiksuotas šiluminio laidumo padidėjimas 8–12 %).



(a)



(b)



(c)



(d)

**8 pav.** PIR dangos: (a) – aliuminio folija; (b) – daugiasluoksnė popierinė danga; (c) – daugiasluoksnė aliuminuota danga; (d) – bitumo danga (www.poliuretanos.com)

Skirtingos dangos pasirenkamos, kad atitiktų numatomą PIR šilumos izoliacinių plokščių panaudojimo sritį. Dangos apsaugo putas šerđį nuo ultravioletinės spinduliuotės (Bynum, 2000). Taip pat dangos atlieka įvairias funkcijas, pradedant nuo PIR plokščių gamybos, kur dangos yra naudojamos PIR šerđims laikyti gamybos proceso metu. Jau pagaminus plokštes dangos joms prideda tvirtumo ir padeda užtikrinti matmenų stabilumą. Gaminio eksploataavimo metu dangos taip pat gali atlikti daugybę funkcijų: nuo dangos tipo priklauso PIR suderinamumas su kitomis statybinėmis medžiagomis, dangos sumažina vandens įgėrį ir vandens garų skvarbą, ribojamas oro judėjimas, padidinama šiluminė varža bei sukuriama tam tikros atspindėjimo savybės sienų ir stogo konstrukcijose (Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Association, 2017). Folijos ir plastikinės dangos ant standžiųjų PIR putų plokščių naudojamos stabilizuoti gaminio šiluminę varžą, sulėtinti šiluminio laidumo dreifą ir išlaikyti numatytą šiluminę varžą (Macchi-Tejeda, Opatovà ir Leducq, 2007; Mukhopadhyaya ir kt., 2002). Siekiant išlaikyti pradines PIR putos šilumines savybes, privaloma nepažeisti šių



dangų šilumos izoliacijos montavimo metu. Tačiau pastato kampuose, kur šie gaminiai turi susijungti, dangos gali išsidėstyti šilumos srauto judėjimo kryptimi, todėl kartu gali padidėti ir šilumos perdavimas ilginiais šiluminiais tilteliais, susiformavusiais pastato sienos kampe.

Siekiant pastatyti energijos beveik nevarojančią pastatą, ilginių šiluminių tiltelių įtaka pastato energijos poreikiui tampa vis svarbesnė, o ankstesni tyrimai parodė, jog šiluminių tiltelių įtaka pastato šilumos energijos poreikiui gali siekti net iki 30 % (Černeckienė ir kt., 2020; Kuusk, Kurnitski ir Kalamees, 2017).

Šiluminiai tilteliai yra pastato apvalkalo dalys, kuriose šiaip tolygus šilumos perdavimas yra žymiai pasikeitęs, lyginant su visu apvalkalu, o tai lemia daugialypį šilumos srautą (Ben Larbi, 2005). Visame pasaulyje atliekama daugybė tyrimų, siekiant nustatyti ilgalaikį naujai suprojektuotų pastato atitvarų, taip pat esamų konstrukcijų, šilumos ir drėgmės efektyvumą bei tarnavimo laiką, remiantis skaitiniu modeliavimu ir sąlygų imitavimu bei eksperimentine pastatų ar jų dalių analize ir matavimu (Kus ir kt., 2013). Atlikta daugybė tyrimų siekiant ištirti sienos konstrukcijos šilumos pralaidumo sumažėjimą dėl ilginių ir taškinių šiluminių tiltelių įtakos. Atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad ilginiai šiluminiai tilteliai per konstrukcijos karkasą ir atitvarų kampuose bei jungtyse gali žymiai sumažinti sienų ir stogų atitvarų šiluminę varžą (Kośny, Kossecka, 2002). Theodosiou, Tsikaloudaki ir Bikas (2017) ištyrė ilginių šiluminių tiltelių poveikio pobūdį vėdinamuose fasaduose, įrodydami, kad tinkamas projektavimas gali reikšmingai prisidėti prie optimalaus rezultato. Theodosiou ir Papadopulos (2008) pristatė tyrimo rezultatus apie tipines sienų šilumos izoliacijos konfigūracijas, naudojamas pastatuose Graikijoje, siekiant ištirti šilumos tiltelių poveikį energijos suvartojimui. Zalewski ir kt. (2010) atliko šilumos nuostolių per pramoninių pastatų lengvųjų sienos konstrukcijų su metaliniu karkasu kiekybinį įvertinimą, kur tarp metalinių santvarų buvo sumontuota izoliacinė medžiaga su vandens garų barjeru ir vidinėmis bei išorinėmis dangomis. Šis tyrimas parodė, kad šilumos nuostoliai plieninio metalinio karkaso vietose buvo daugiau nei dvigubai didesni nei kitur. Įvertinant ilginių šiluminių tiltelių įtaką šilumos perdavimui naudojami skirtingi metodai: skaitinis modeliavimas, empirinės formulės ir matavimai. Ben Larbi (2005) pateikė trijų ilginių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo regresijos modelius: plokštuminio pamato grindų ir sienos sandūros, grindų-sienos sandūros ir stogo-sienos sandūros. Visų modelių santykinės paklaidos buvo mažesnės nei 5 %, o kartu su paklaidomis, gautomis atliekant skaitinį modeliavimą apie 10 %, tai yra mažiau nei paklaidos paprastai gaunamos naudojant empirines formules.

Būtina kuo labiau sumažinti energiją taupančių pastatų šilumos nuostolius projektavimo ir statybos etapuose, ypač regionuose, kuriuose vyrauja šaltesnis klimatas, kai didelę patalpų šildymo poreikio dalį lemia šilumos nuostoliai per pastato atitvarą (Berggren, Wall, 2013).

Šiluminiai tilteliai vaidina svarbų vaidmenį pastato atitvarų šiluminiuose nuostoliuose, todėl juos reikėtų kuo labiau sumažinti, ypač ten, kur vyrauja žemos temperatūros ir labai aukštos temperatūros Europoje ir visame pasaulyje (Černeckienė ir kt., 2020). Naujų pastatų atveju šiluminių tiltelių skaičiavimas ir

vertinimas taikomas 35 % Šiaurės Europos šalių, 100 % Centrinės Europos ir 50 % Pietų Europos šalių (Erhorn-Kluttig, Erhorn, 2009).

Paprastai, skaičiuojant atitvarų šilumos perdavimo koeficientus ir modeliuojant ilginius (ir taškinius) šiluminius tiltelius, įvertinamos šilumos izoliaciją kertančios jungtys (Levinskytė ir kt., 2019; Zalewski ir kt., 2010) ir karkaso elementai (Straube, 2007), tačiau dangų įtaka nėra vertinama. Kai kuriais atvejais rekomenduojama pašalinti dangas nuo gaminių jų sujungimo vietoje, sujungti gaminius juos klijuojant kampuose, tačiau praktikoje standžiųjų poliizocianurato putų (PIR) gaminiai dažnai klijuojami nepašalinus dangų, todėl dangos gali veikti kaip nedideli ilginiai šiluminiai tilteliai, kuriuos reikia plačiau iširti.

Tyrimų, kuriais būtų siekiama išsiaiškinti PIR šilumos izoliacijos dangų poveikį šilumos nuostoliams, nebuvo rasta, tačiau labai panašūs tyrimai buvo atlikti su vakuuminės izoliacijos plokštėmis (VIP). Taip pat, šiuose tyrimuose buvo analizuojama labai plonų didelio šiluminio laidumo dangų (paprastai aliuminio folijos) įtaka šilumos nuostoliams ir tiriamas ilginių šiluminių tiltelių susidarymas aplink jungtis tarp dviejų sujungtų plokščių (Schwab ir kt., 2005; Tenpierik ir Cauberg, 2007; Tenpierik, Van der Spoel ir Cauberg, 2008).

### 1.3. PIR senėjimo ypatumai

Ilgalaikės eksploatacinės savybės yra svarbus rodiklis renkantis geriausią šilumos izoliacinę medžiagą kiekvienai panaudojimo paskirčiai (Alvey ir kt., 2017). Kritiškiausios klimato sąlygos, kurios veikia kaip statybinių medžiagų senėjimo veiksniai, anot Berardi ir Nosrati (2018) yra:

- saulės spinduliuotė, t. y. ultravioletinė (UV), matoma (VIS) ir artima infraraudonajai (NIR) spinduliuotė;
- aplinkos infraraudonųjų spindulių (IR) šilumos spinduliuotė;
- aukšta temperatūra;
- temperatūros pokyčiai / ciklai;
- vanduo, pavyzdžiui, drėgmė, santykinė oro drėgmė, lietus (krituliai) ir įstrižas lietus;
- fiziniai krūviai, pavyzdžiui, naudojimo, sniego apkrovos;
- vėjas;
- tarša, pavyzdžiui, dujos, purvas ir dulkės;
- mikroorganizmai, pavyzdžiui, pelėsis ir paukščių išmatos.

Yra žinoma, kad šiluma, ultravioletinė (UV) spinduliuotė ir didelė drėgmė sukelia greitesnį PU medžiagų senėjimą. Fiziškai patikrinus bandinius, išimtus iš higrotermostatinės kameros, paaiškėjo, kad per vieną savaitę, kol bandiniai buvo laikyti kameroje, juose nepastebėta jokių matomų pokyčių. Tačiau UV spinduliais sendinti bandiniai vos per mėnesį nežymiai pakeitė spalvą bei padidėjo jų standumas. Spalva ir standumas toliau didėjo visu UV spindulių veikimo laiku (nuo 3 iki 5 mėnesių). Kai kuriuos 2 ir 3 mėnesius sendintus bandinius išėmus iš UV spindulių kameros, atsirado paviršiaus įtrūkimų požymių (Escobar, Meeker, 2006; Ludwick ir kt., 2008).

Natūralūs klimatiniai senėjimo procesai dažnai užtrunka ilgai, o priėmus sprendimą statyti pastatą, paprastai nėra pakankamai laiko sulaukti natūralaus klimatinio senėjimo rezultato. Norint gauti rezultatus pakankamai greitai ir ekonomiškai, reikia atlikti pagreitintus klimatinius senėjimo bandymus, kurie apima įvairias klimato sąlygas ir pagreitinimo faktorius. Tokiu būdu galima išvengti didelių pastato pažeidimų dėl trūkstamo arba per mažo atsparumo klimato poveikiui. Pagreitintas klimatinis senėjimas atsiperka tiek laiko, tiek sąnaudų požiūriu (Jelle, 2012).

Santykinė kiekvieno iš aukščiau išvardintų veiksnių svarba priklauso nuo naudojimo klimato sąlygų, taip pat nuo statybinės medžiagos ir jos atsparumo klimato sąlygoms. Paprastai laboratorijoje neįmanoma imituoti visų galimų oro sąlygų ir dažnai to gali net neprireikti. Iš tiesų, norint įvertinti ilgalaikius statybinių medžiagų eksploatacinius parametrus, dažnai atliekami laboratoriniai tyrimai, atsižvelgiant tik į temperatūros, šviesos ir drėgmės poveikį (Berardi, Nosrati, 2018).

Kalbant apie putas, joms senėjant prarandama didelė šiluminio efektyvumo dalis: dėl atmosferos dujų difuzijos į putas ir poras užpildančių dujų difuzijos iš putų, dujų sudėtis uždaroje porose laikui bėgant keičiasi (Marrucho ir kt., 2005; McElroy ir kt., 1991). Galų gale (senėjant) putinimo dujas dažniausiai pakeičia oras, o putos šiluminis efektyvumas pasiekia galutinį nusistovėjusį lygį (Feldman, 2010), todėl turėtų būti naudojamos tik sendintų putų šiluminio laidumo vertės (Clarke, Yaneske, 2009).

Kadangi atmosferos dujų difuzija į poras paprastai yra daug greitesnė nei dujų difuzija iš porų, senėjimo procesas vyksta dviem etapais. Pirmojo etapo metu porų dujų sudėtis keičiasi reikšmingu greičiu dėl greitos atmosferos dujų difuzijos į poras ir greitos putinimo dujų difuzijos iš porų. Šie dujų sudėties porose pokyčiai lemia medžiagos šiluminio laidumo pokyčius. Šis senėjimo etapas apibrėžiamas kaip pagrindinis etapas. Anglies dioksidas yra greitai difunduojančių putinimo dujų, kurios kartais susidaro gaminant PUR / PIR putas, pavyzdys. CO<sub>2</sub> difuzijos į išorę greitis paprastai viršija atmosferos dujų patekimo greitį pirminio etapo metu. Kai atmosferos dujų difuzija baigiasi, medžiagos šiluminis laidumas kinta lėčiau. Visgi šiluminis laidumas ir toliau kinta dėl nuolatinės putinimo dujų difuzijos iš putos porų į išorę. Šis etapas apibrėžiamas kaip antrinis etapas (Christian ir kt., 1995).

Dujų difuzijos procesą taip pat galima suskirstyti į kelis etapus. Pirmiausia, poroje esančios dujos ištirpsta poros sienelėje arba statramsčio medžiagoje. Tada dujos gabenamos per visą poros sienelės ar statramsčio storį. Galiausiai, dujos išleidžiamos į ribojančią erdvę – gretimą porą arba atvirą supančią aplinką. Storesnės porų sienelės ir statramsčiai stabdo difuzijos procesą, tačiau padidina šiluminį laidumą pro medžiagos karkasą; taigi, putos struktūra yra pagrįsta optimalia šių faktorių derme. Bet kurių putų atsparumas difuzijai yra unikali medžiagos ir temperatūros funkcija. Vadinasi, nors padidėjusi temperatūra sumažins visų dujų pasipriešinimą difuzijai, tačiau pasipriešinimas kiekvienoms dujoms bus skirtingas (Stovall, 2012). Dujų difuzija per putos statramsčius ilgainiui blogins šilumos izoliacijos savybes, o senėjimą paveiks veikimo aplinka, lemiamą temperatūros ir drėgmės. (Zhang ir kt., 2017).

Putų senėjimas vyksta ilgą laiką. Didelių storių putų su didelių molekulių putinimo priemonėmis senėjimas gali užtrukti daugiau nei 50 metų, todėl pageidautina paspartinti senėjimo procesą dėl kelių priežasčių. Pirma, nominalios vertės naudojamos palyginant produktus; tai naudinga, jei nominali vertė atspindi ilgalaikį kiekvieno produkto efektyvumą. Antra, projektuotojai turi turėti ilgalaikę informaciją apie eksploatacines savybes, kai reikia suderinti numatomą pastatų ar prietaisų šilumos perdavimą su įrangos dydžiu, reikalingu toms patalpoms šildyti ar vėsinti per visą jų tarnavimo laiką. Trečia, vertinant galimus produkto patobulinimus, pavyzdžiui, perėjimą prie gamyboje naudojamų mažiau kenksmingų putinimo dujų, reikia atlikti atsižvelgiant į ilgalaikį produkto efektyvumą. Apskritai pagreitinami senėjimo tyrimai buvo sutelkti į aukštesnę temperatūrą, kad padidėtų difuzijos greitis, plonų juostelių pjaustymą, siekiant sumažinti difuzijos kelią, ir difuzijos parametru vertinimą, siekiant palengvinti modeliavimą (Stovall, 2012). Praktiniu požiūriu, senėjimo procesas dažnai pagreitinamas atliekant laboratorinius tyrimus, siekiant įvertinti ilgalaikį šilumos izoliacinių medžiagų šiluminį atsparumą naudojant aukštesnę temperatūrą arba naudojant ploną gaminio juostelę (Berardi, Naldi, 2017).

Pagreitintas sendinimas yra procesas, kuris dažniausiai atliekamas siekiant įvertinti atsparumą bandomos medžiagos parametru sumažėjimui laikui bėgant. Tai yra natūralaus senėjimo per sutrumpintą laiką modeliavimas. Mažiausias putų matmenų ar tūrio pokytis yra nepaprastai svarbus jas naudojant kaip šilumos izoliaciją (Li ir kt., 2016; Liszkowska ir kt., 2019).

Padidėjusi temperatūra padidina kinetinės reakcijos greitį medžiagų molekulėse ir pagreitina cheminio skaidymo procesus. Todėl laikas, reikalingas ilgalaikiam senėjimui dėl oro sąlygų, gali būti sutrumpintas didinant medžiagos veikimo temperatūrą. Reikėtų vengti, kad medžiagos būtų veikiamos ypač aukštoje temperatūroje, kurios niekada nepatirtų esant įprastoms klimatinėms sąlygoms, nes tai gali sukurti nerealius senėjimo rezultatus. Dėl šios priežasties pagreitinto senėjimo temperatūra, ne aukštesnė nei +70 °C, paprastai pasirenkama pagreitintiems statybinių medžiagų senėjimo tyrimams (Berardi, Nosrati, 2018).

Alvey ir kt. (2017), siekdami prognozuoti ilgalaikį efektyvumą, atliko pagreintą pasirinktų šilumos izoliacinių medžiagų sendinimą veikiant aukštai temperatūrai ir drėgmei. XPS, PUR ir aerogelio bandiniai buvo sendinti esant aukštai temperatūrai ir drėgmei, atliekant papildomus matavimus, siekiant nustatyti drėgmės lygį bandiniuose. Bet koks putos paviršiuje arba viduje esantis kondensatas pašalintas veikiant aukštai temperatūrai. Džiovyklės sąlygos suteikia daugiau galimybių išgarinti skystį ir paaikšina, kodėl pastebimas reikšmingesnis šiluminio laidumo sumažėjimas veikiant mažesnės drėgmės sąlygoms. Kadangi PUR bandiniai nebuvo tiriami esant žemesnėms temperatūros sąlygoms, temperatūros poveikis nėra taip lengvai matomas. Tačiau galima daryti išvadą, kad aukštesnė temperatūra paprastai padidina putinimo priemonės išgaravimo greitį, o kaitinant putas, porų struktūra ir uždaroje porose „užrakintos“ dujos patiria šiluminį plėtimąsi, o tai lemia putų poliuretano struktūros deformaciją.

Kaip pastebi Stovall (2012), Europoje sendinimo pagreitinimas aukštoje temperatūroje yra laikomas tinkamu apibūdinti ilgalaikius šiluminius rodiklius,

remiantis pastebėjimu, kad didžioji dalis putinimo agento visą gaminio tarnavimo laiką liks įstrigusi putplasčio porose. Šiaurės Amerikoje sendinimo pagreitinimas aukšta temperatūra laikomas nepakankamu, nes naudojant šį metodą nepavyko nustatyti putinimo agento kiekio, kuris per gaminio tarnavimo laiką išsisklaidys iš putplasčio. Dėl tokios dviprasmės situacijos putų įvertinimo procedūrose Europoje buvo įtraukta aukšta temperatūra, o pjaustymo plonais sluoksniais bandymų metodai buvo sukurti Kanadoje ir JAV. Skirtumai tarp padidintos temperatūros ir plonų sluoksnių pjaustymo pagreitinimo metodų yra didesni naudojant modernius putinimo agentus nei naudojant CFC dujas, nes oro ir putinimo dujų difuzijos greičiai nėra tokie tolimi, kokie buvo naudojant ankstesnės kartos dujas. Korekcijos koeficientai Europos standartuose apima keletą kvalifikavimo variantų, pagrįstų pastebėtu senėjimo tempu.

Minėti du klasikiniai pagreitinimo difuzijos būdai, t. y. senėjimas aukštesnėje temperatūroje ir plonų sluoksnių sendinimas, turi apribojimų, kai jie naudojami šilumos izoliacinėms medžiagoms, tokioms kaip poliizocianurato (PIR) plokštės. Šiaurės Amerikoje naudojamas CAN/ULC-S770 standartas skirtas nustatyti medžiagų sendintas šilumos laidumo koeficiento vertes, t.y. pagreitinant senėjimo procesą, gaminį supjausčius plonais griežinėliais ir šiuos plonus bandinius sendinant aukštoje temperatūroje ir vėliau matuojant sendintą šiluminį laidumą (Christian ir kt., 1995; Stovall, Vanderlan ir Atchley, 2013). Didinant temperatūrą, visų skirtingų senėjimo procese dalyvaujančių dujų difuzijos koeficientai nepakinta tuo pačiu greičiu (pentanu putintų PIR plokščių atveju šios dujos yra CO<sub>2</sub>, oras ir putinimui naudojami skirtingi pentano izomerai). Putos šerdies pjaustymas plonais sluoksniais neatsižvelgia į tai, kad PIR plokštės yra tankesnės paviršiniuose sluoksniuose nei putos šerdyje (Singh, Nturu ir Dedecker, 2003).

Lietuvos standarte LST EN 13165:2012+A2 yra nurodyti du PUR / PIR putos sendinimo metodai prieš nustatant gaminio šilumos laidumo koeficientą: fiksuoto prieaugio ir pagreitinto sendinimo metodas. Fiksuoto prieaugio procedūros metu 20 mm storio bandinys kondicionuojamas +70 °C temperatūroje 21 dieną ir, atsižvelgiant į gautus rezultatus, atliekami tolesni žingsniai, skirti nustatyti šilumos laidumo koeficientą po senėjimo proceso. Atliekant pagreitinto sendinimo procedūrą, PUR / PIR putos 175 dienas kondicionuojamos +70 °C temperatūroje.

Naudoti pagreitinto sendinimo metodą yra labai naudinga, nes sutrumpėja laikas, reikalingas pakankamai pakeisti dalinį dujų slėgį poliuretano porose, taigi sutrumpėja ir laikas, reikalingas PUR / PIR putų senėjimui tirti, ir tam tereikia tik kelių savačių (Modesti, Lorenzetti ir Besco, 2007).

Winkler-Skalna ir Łoboda (2020) tyrinėjo cilindrinės PUR vamzdžių izoliacijos sendintų šilumos izoliacinių savybių parametrus. Jos pasirinko šešis standžiųjų uždarytų PUR putų, išputintų n-pentanu, bandinius. Bandinių tipai skyrėsi tankiu, vidiniu skersmeniu ir storium. Buvo atlikti bandymai naudojant pagreitinto sendinimo procedūrą, be to, buvo stebimi šilumos laidumo koeficiento pokyčiai po trumpesnių kondicionavimo laikotarpių. Sendinimas buvo atliekamas ir pagal fiksuoto prieaugio procedūrą. Pirmajame tyrimų etape, siekiant nustatyti pradinę šilumos laidumo koeficiento vertę atskiriems bandinių tipams, matavimai buvo atlikti iškart po bandinių pristatymo į laboratoriją (1–8 d. nuo pagaminimo).

Vėlesnių matavimo etapų bandinių rinkiniai buvo laikomi +70 °C temperatūroje 7 dienas, 21 dieną, 90 dienų ir 175 dienas. Kiekviename rinkinyje buvo nuo 1 iki 5 bandinių. PUR A tipo putoms didžiausias šilumos laidumo koeficiento padidėjimas buvo pastebėtas per pirmąsias 7 kondicionavimo dienas. Tai taip pat yra trumpiausias bandinių laikymo laikas esant aukštai temperatūrai, o tai reiškia intensyvių dujų mainus per trumpą laiką nuo putų pagaminimo. PUR B tipo putų atveju didžiausias šilumos laidumo koeficiento padidėjimas buvo pastebėtas per pirmąsias 21 kondicionavimo dienas. PUR C tipo putų atveju šilumos laidumo koeficiento padidėjimas yra panašus per pirmuosius du kondicionavimo etapus. PUR D tipo putų atveju didžiausias šilumos laidumo koeficiento vertės padidėjimas buvo nustatytas per pirmąsias 21 kondicionavimo dienas vidutinei bandymo temperatūrai esant 0 °C ir +10 °C. PUR E tipo putų atveju šilumos laidumo koeficiento padidėjimas buvo panašus pirmajame ir trečiajame kondicionavimo etape. PUR F tipo putų atveju didžiausias šilumos laidumo koeficiento padidėjimas buvo registruotas per pirmąsias 7 kondicionavimo dienas. Po pirmųjų 21 kondicionavimo dienų pastebėtas ryškus šilumos laidumo koeficiento padidėjimo kritimas didėjant putų tankiui. Tai aiškinama tuo, kad mažesnio tankio medžiagoje dujų difuzija vyksta greičiau, nes kuo mažesnis yra tariamasis medžiagos tankis, tuo didesnė dujų dalis užpildo poras, taigi didesnis yra senėjimo poveikis susijęs su difuzija. Be to, kaip ir tikėtasi, mažesnio storio bandiniuose (PUR A, B, D tipo) dujų mainai yra greitesni. Kitame kondicionavimo etape, tarp 21 ir 90 dienų, esant mažiausiam tankiui, šilumos laidumo koeficiento padidėjimas buvo minimalus ir jis didėjo didėjant tankiui daugumai išbandytų PUR putų tipų. Dujų mainai šiuo laikotarpiu buvo žymiai lėtesni. Taigi, maksimalus 175 dienų kondicionavimo laikas yra pakankamas, kad būtų galima įvertinti galutinį senėjimo aukštesnėje temperatūroje poveikį uždarytų PUR putų, išpūstų n-pentanu, šiluminiam laidumui. Didžiausias skirtumas (8,9 %) tarp šilumos laidumo koeficiento verčių, gautų naudojant dvi senėjimo procedūras, buvo gautas PUR D tipo putose, kai vidutinė matavimo temperatūra buvo +100 °C. Šilumos laidumo koeficiento reikšmių, apskaičiuotų remiantis skirtingomis senėjimo procedūromis, skirtumai rodo, kad pasirinkus fiksuoto prieaugio procedūrą galima nustatyti šilumos laidumo koeficientą po sendinimo per trumpesnę laiką (21 dieną), tačiau jo vertė bus didesnė (blogesnė) nei naudojant ilgą pagreintą senėjimo procedūrą (Winkler-Skalna, Łoboda, 2020).

Berardi (2019) tyrė poliuretano (PUR ir PIR) putų šilumines savybes po bandinių sendinimo, 4,5 mėn. laikant pastovioje aukštoje temperatūroje (+70 °C). Buvo nustatyta, kad PUR šiluminio laidumo priklausomybė nuo temperatūros yra tiesinė, o tai reiškia, jog šiuolaikinių poliuretanų (PUR) šiluminis laidumas šaltyje nepakinta. Atvirkštinis rezultatas buvo gautas su poliizocianurato (PIR) bandiniais, kai jų šiluminis laidumas žemesnėje nei -5 °C temperatūroje padidėjo. Kelis mėnesius sendinus bandinius +70 °C temperatūroje buvo pastebėta, kad PUR bandiniuose šiluminių savybių pokyčiai buvo minimalūs, o santykinai reikšmingi pokyčiai įvyko PIR bandiniuose. Buvo nustatyta, jog tam tikri uždarytų PUR gaminiai anksčiau praranda šiluminį laidumą, kuris vėliau stabilizuojasi, kiti poliuretanoi po sendinimo neparodė reikšmingo šiluminio laidumo pablogėjimo. Nesendintuose PIR bandiniuose buvo pastebėtas akivaizdus šiluminio laidumo



padidėjimas žemoje temperatūroje, tačiau įdomiausia tai, kad šis poveikis išliko ir po to, kai bandiniai buvo paveikti aukštos temperatūros.

Pagal Graham efuzijos dėsnį, dujų perdavimas per akytą medžiagą yra tiesiogiai susijęs su jų molekuline mase pagal (13) formulę (Hejna ir kt., 2018):

$$\frac{greitis_1}{greitis_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (13)$$

čia:  $greitis_n$  – dujų išsiskyrimo greitis, mol/s;  $M$  – molekulinė masė, g/mol, o skaičiai 1 ir 2 apibūdina dvi dujas, kurios lyginamos lygtimi.

Šios prielaidos, pagrįstos Graham dėsniu, galioja tik porėtoms medžiagoms ir svarbu nepamiršti, kad standžiose PIR putose gali būti daug uždarytų porų (daugiau nei 90 %). Todėl Fiko dėsnis turėtų būti tinkamesnis apibūdinant dujų difuziją putplasčio terminio senėjimo metu, remiantis šia formule:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (14)$$

čia:  $\varphi$  – koncentracija, %;  $t$  – laikas, s;  $D$  – difuzijos koeficientas.

Šiluminio laidumo matavimų rezultatai analizuojami atsižvelgiant į du skirtingus parametrus: pradinę šiluminio laidumo vertę ir senėjimo greitį, t. y. šiluminio laidumo padidėjimo greitį laike. Pradinę šiluminio laidumo vertę lemia keli parametrai: daug svarbesni yra poros viduje esančių dujų šiluminis laidumas ir vidutinis poros skersmuo. Atsižvelgiant į tai, kad putplastis sensta dėl dujų difuzijos iš porų į išorę ir dėl priešingos oro difuzijos (kurios šiluminis laidumas yra gana didelis, palyginti su putinimo dujomis), senėjimą aiškiai veikia dujų pralaidumas porų viduje per polimerinę membraną. Dujų difuziją lemia polimero matrica, naudojamas putinimo agentas ir atvirų porų kiekis: net, jei PUR / PIR putas yra uždarytų porų, visada bus tam tikras atvirų porų kiekis. Akivaizdu, kad kuo didesnis atvirų porų kiekis, tuo didesnis bus putinimo priemonės difuziškumas ir tuo greitesni senėjimo reiškiniai, t. y. tuo labiau pablogėja putos šilumos izoliacinės savybės per tam tikrą laiką (Modesti ir kt., 2007).

PUR / PIR putų senėjimui įtakos turi ir drėgmė. Esant drėgmei, reikia atsižvelgti į kitas medžiagos savybes, tokias kaip porų struktūra ar drėgminės savybės (Ochs, Heidemann ir Müller-Steinhagen, 2008). Kalbant apie polimerines izoliacines medžiagas, PIR ir EPS elgiasi praktiškai taip pat, kaip ir mineralinės vatos izoliacija: absorbuoja drėgmę kiek lėčiau, tačiau maždaug atitinkamus kiekius (akmens vata, mažo tankio stiklo vata, PIR ir EPS <0,3 (kg/m<sup>2</sup>), didelio tankio stiklo vata <1 (kg/m<sup>2</sup>)). Fenolio putos ir celiuliozės izoliacinės medžiagos kaupia žymiai daugiau drėgmės nei kitos izoliacinės medžiagos (fenolio putos iki 3 (kg/m<sup>2</sup>), o celiuliozės izoliacija iki 15 (kg/m<sup>2</sup>)). Atliekant panardinimo testą, storio susitraukimą parodė tik celiuliozės izoliacija (–1,6 %) ir PIR (–0,7 %). Remiantis rezultatais, EPS, didelio tankio akmens vata ir PIR pagal šį kriterijų yra tinkamiausi tiems atvejams, kai gali atsirasti kapiliarinio vandens absorbcija. Mažiausias vandens garų kiekis difuzijos būdu perduodamas į PIR izoliaciją, turinčią uždarytų porų struktūrą (Mattila, 2017).

Drėgmė statybinės medžiagos viduje (skystoje, kietoje ar dujų fazėje) gali veikti kaip tiesioginis agresyvus veiksnys arba kaip veiksnys, pagreitinantis konstrukcijų degradacinius mechanizmus (Kontoleon, Giarma, 2016). Murphy (2010) tyrė standžiųjų PIR putų temperatūrinį senėjimą, atsižvelgiant į laikymo sąlygas. PIR bandiniai buvo laikomas +25 °C temperatūroje eksikatoriuje, +25 °C temperatūroje ir 50 % santykiname drėgnume, +70 °C temperatūroje ir 95 % santykiname drėgnume. Šilumos laidumo koeficientas padidėjo atitinkamai maždaug 6 %, 8 % ir 15 % po 7 dienų, ir 6 %, 11 % ir 22 % po 14 dienų laikymo nurodytomis sąlygomis. Šie rezultatai patvirtino, kad aplinkoje esanti drėgmė turi įtakos putos temperatūriniam senėjimui. Toliau PIR bandiniai buvo supjaustyti į 4 dalis, pašalinus paviršinius sluoksnius, siekiant nustatyti šiluminį laidumą įvairiomis aplinkos sąlygomis:

- pirmas sendintas +25 °C / 50 % RH – pažymėtas RT;
- antras sendintas +25 °C eksikatoriuje – pažymėtas DRY;
- trečias sendintas +25 °C temperatūroje po vandeniu – pažymėtas WET;
- ketvirtas sendintas +70 °C / 95 % RH – pažymėtas HA.

Praėjus vos vienai savaitei, DRY bandinys jau nustojo senėti, senėjimo kreivė pradėjo plokštėti, o RT bandinio kreivė toliau kilo. Tai rodo, kad aplinkos ore esantis vanduo daro didelę įtaką temperatūriniam senėjimui. HA bandinio kreivė pakilo dar stačiau, tačiau po dviejų savaičių šio bandinio senėjimo greitis taip pat pradėjo lėtėti, jo tankis taip pat pradėjo kilti – nuo 28 iki 36 (kg/m<sup>3</sup>) (po vienos savaitės). WET bandinio, kuris buvo sendinamas kambario temperatūroje po vandeniu, tankis pirmos savaitės pabaigoje pakilo iki 202 (kg/m<sup>3</sup>); dar po savaitės iki 288 (kg/m<sup>3</sup>), o trečią savaitę – iki 302 (kg/m<sup>3</sup>). PIR putos, panardinus jas po vandeniu, niekaip neišsikraipė. Anot tyrimo autoriaus, šis spartus šiluminio laidumo pokytis tvirtai rodo, kad kuo daugiau vandens bus putoje, tuo blogesnio šiluminio laidumo galima tikėtis, o atlikto tyrimo duomenys rodo, kad jei putų plokštė laikoma sausai, šiluminio laidumo padidėjimas yra nereikšmingas. Taigi, jei putos yra veikiamos drėgmės (net ir 50 % RH), jų šiluminis laidumas smarkiai padidės (Murphy, 2010).

Zhang ir kt. (2017) tyrė penkių PU putų šiluminį laidumą ir vandens įgeriamumą. Bandiniai buvo laikyti keturiuose temperatūrinuose lygiuose: +10 °C, +20 °C, +30 °C ir +40 °C su skirtinga santykinė drėgme: 30 %, 60 % ir 90 %, kiekviename lygyje. Visų penkių bandinių šiluminis laidumas ir vandens pasisavinimas esant skirtingai temperatūrai ir drėgmei turi panašias kitimo tendencijas. Šiluminis laidumas ir vandens pasisavinimas didėja priklausomai nuo drėgmės skirtingose temperatūrose. Šių bandinių vandens pasisavinimas esant skirtingai temperatūrai ir drėgmei yra mažesnis nei 2 %, o šiluminis laidumas padidėja net 10–18%. Rezultatai įrodo, kad drėgnas oras daro akivaizdžią įtaką PU putų šiluminėms savybėms.

Walker ir Pavia (2015) atliko tam tikrų šilumos izoliacinių medžiagų parinkimo istorinių pastatų šiltinimui studiją, kurios metu matavo skirtingų izoliacinių medžiagų šilumos laidumo koeficientus vietoje (*in-situ*) prieš ir po atitvaros apšiltinimo. Nustatyta, jog kintantis drėgmės kiekis sienoje tarp *U* verčių matavimų gali turėti įtakos šilumos izoliacijos šilumos laidumo koeficiento vertei:



jei sumontavus šilumos izoliaciją siena bus drėgnesnė, jos šiluminis laidumas padidės ir šilumos izoliacinės medžiagos šiluminis laidumas bus didesnis. Norint įvertinti šiluminio laidumo svyravimų, susijusių su drėgmės kiekiu, įtaką pastato šilumos ir energiniam naudingumui, reikia nustatyti šilumos izoliacinės medžiagos šiluminio laidumo ir drėgmės kiekio bei drėgmės sąlygų santykį sienos ir stogo konstrukcijose (Budaiwi, Abdou, 2013). Dėl sienos ar stogo konstrukcijoje esančios drėgmės gali sumažėti atitvaros šiluminė varža ir padidėti energijos poreikis pastatą šildyti ir vėsinti. Drėgmė taip pat gali sukelti pelėsio atsiradimą ir metalinių konstrukcijų koroziją (Björk, Enochsson, 2009).

#### **1.4. Temperatūros įtaka PUR / PIR putų šiluminės savybėms**

Kaip jau yra žinoma, šilumos izoliacinės medžiagos efektyvumą labiausiai nulemia jos šilumos laidumo koeficientas ( $\lambda$ ), kuris priklauso nuo tankio, porėtumo, drėgmės ir vidutinės temperatūros. Praktiškai  $\lambda$  vertė paprastai vertinama esant kambario temperatūrai, t. y. +23 °C. Tačiau, šilumos izoliacinę medžiagą sumontavus į pastato atitvarą, ji gali būti veikiamą didelių aplinkos temperatūros ir drėgmės pokyčių, atsižvelgiant į vyraujančias klimato sąlygas (Abdou, Budaiwi, 2005).

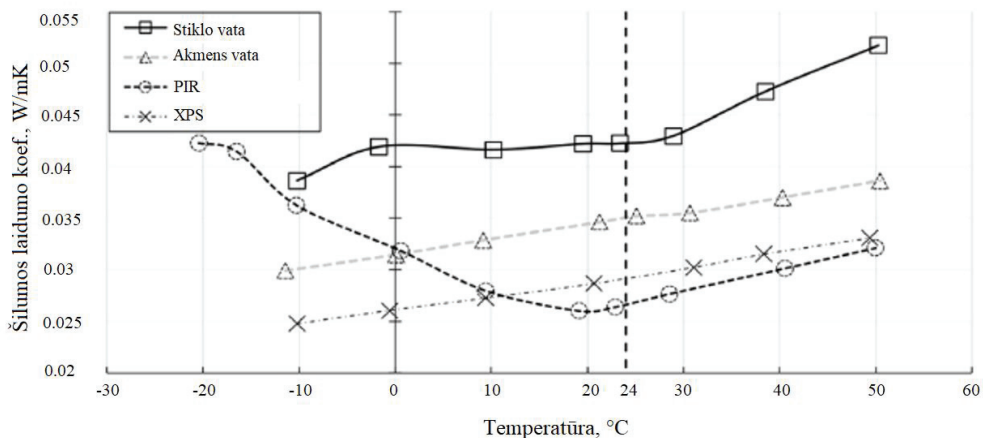
Pastatų projektavimo ir energinio naudingumo vertinimo metu paprastai naudojamos pastoviosios šilumos izoliacinių medžiagų šilumos laidumo koeficiento vertės. Kartais neorganinėms pluoštinėms medžiagoms, tokioms kaip stiklo ar akmens vata, siūloma linijinė nuo temperatūros priklausanti šilumos laidumo koeficientų priklausomybė, kai žemoje temperatūroje šiluminis laidumas yra mažesnis (geresnis) (Berardi, Naldi, 2017; Berardi ir kt., 2018; Khoukhi, Hassan ir Abdelbaqi, 2019). Šilumos izoliacinės medžiagos, kaip ir kitos natūralios ar dirbtinės medžiagos, pasižymi nuo temperatūros priklausomomis savybėmis, kurios skiriasi priklausomai nuo jų charakteristikų ir jas lemiančio temperatūros diapazono. Daugumos medžiagų šiluminis laidumas didėja didėjant temperatūrai, todėl nuo temperatūros priklausantis šiluminis laidumas yra laikomas empiriniu ryšiu, nustatytu eksperimentiniais matavimais. Tam tikro sendinto medžiagos bandinio vidutinis šiluminis laidumas daugiausia priklauso nuo tankio ( $\rho$ ), temperatūros ( $T$ ) ir vandens kiekio ( $w$ ) (Khoukhi ir kt., 2016). Anot Khoukhi (2018) temperatūra, kuria yra veikiamos izoliacinės medžiagos, priklauso nuo kelių parametru, t. y. medžiagos šiluminės varžos, šilumos izoliacinio sluoksnio vietos sienos ar stogo konstrukcijoje ir efektyviosios arba darbinės temperatūros.

Putų poliuretano gaminiai naudojami įvairių temperatūrų aplinkose, todėl labai svarbi gaminio ypatybė – šiluminio laidumo didėjimas, didėjant eksploatacinei temperatūrai (Gailius ir Vėjelis, 2012). Iš naftos žaliavų pagamintos putų izoliacinės medžiagos, tokios kaip poliizocianuratas, skirtingose temperatūrose elgiasi ne taip reguliariai, jų šiluminio laidumo priklausomybė nuo temperatūros nėra tiesinė. Tai reiškia, kad naudojant pastovaus šilumos laidumo koeficiento vertes, faktinis pastato atitvarų efektyvumas skiriasi nuo suprojektuoto, todėl padidėja pastato energijos sąnaudos, didėja kondensacijos problemos ir mažėja gyventojų komfortas (Berardi, Naldi, 2017).

Kaip buvo minėta anksčiau, uždarų porų putų izoliacinėse medžiagose, tokiose kaip poliizocianuratas, visas šilumos perdavimas per putą vyksta kaip šilumos, perduodamos kietojo kūno laidumu, dujų laidumu ir spiduliavimu, superpozicija. Kietojo kūno laidumas maždaug tiesiškai priklausomas nuo tankio, kuris svyruoja nuo 10 iki 80 (kg/m<sup>3</sup>). Dujų laidumas priklauso nuo porose esančio dujų mišinio (Berardi, Naldi, 2017).

9 pav. pavaizduota, kaip skirtingų šilumos izoliacinių medžiagų šilumos laidumo koeficientai kinta priklausomai nuo temperatūros. Atkreiptinas dėmesys į PIR šiluminio laidumo pokytį žemesnėje nei +10 °C temperatūroje, kai PIR pūtimo agentas pradeda kondensuotis ir šiluminis laidumas padidėja. Šis rezultatas rodo, kad tokio tipo šilumos izoliacija turėtų būti kruopščiai apgalvota, kai išorinėje pastato pusėje pasitaiko labai žema temperatūra (Berardi, Naldi, 2017).

Taigi, deklaruojama šilumos laidumo koeficiento vertė skiriasi nuo eksploatacinės vertės daugumai šilumos izoliacinių medžiagų. Sumontavus šilumos izoliacinę medžiagą į konkrečią pastato konstrukciją, ją veikia skirtingi temperatūros ir drėgmės lygiai, ir jų faktinės šiluminės savybės skiriasi nuo numatytų standartinėmis laboratorinėmis sąlygomis. Dauguma deklaruojamų šilumos laidumo koeficientų ir šiluminių varžų yra pagrįstos bandymais, neatsižvelgiant į realias temperatūrines sąlygas ir realų jų sumontavimą konstrukcijoje. Statybinės šilumos izoliacinių medžiagų šiluminės savybės paprastai nurodomos esant vidutinei +23 °C ir 50 ± 10 % drėgmei (Berardi, Naldi, 2017; Berardi ir kt., 2018; Budaiwi, Abdou ir Al-Homoud, 2002).



**9 pav.** Šilumos izoliacinių medžiagų šiluminio laidumo priklausomybė nuo temperatūros (Berardi, Naldi, 2017)

Šilumos izoliacijos savybės labai skiriasi priklausomai nuo žemos ir aukštos temperatūros, o tai reiškia, kad šilumos nuostoliai ar šilumos pritekėjimai pastate ne visada yra tokie, kokie yra numatomi naudojant standartinius skaičiavimo metodus. Tai galioja visų tipų šilumos izoliacijoms, ypač toms, kurios naudojamos stogo ar vertikaliose pastato konstrukcijose, kai jos yra veikiamos ekstremalių šaltų ar karštų temperatūrų (Schumacher ir kt., 2016). Kadangi padidėjęs šilumos izoliacinės medžiagos laidumas dėl ją veikiančios temperatūros gali žymiai paveikti šilumos

pritekėjimą arba šilumos nuostolius pastate, tai automatiškai padidina ir vėsinimo bei šildymo apkrovą (Abdou, Budaiwi, 2005). Taigi, teisingas šilumos izoliacinių medžiagų naudojimas ne tik sumažina poreikį pastatus vėsinti ir šildyti, bet ir gali žymiai sumažinti metines energijos sąnaudas bei prailginti šiluminį komfortą tarpsezoniais (Al-Homoud, 2004).

Bennett ir Lawlor (2014) atlikto plataus masto tyrimą, apimantį laboratorinių matavimų, lauko stebėjimų ir energijos modeliavimo derinį, siekiant nustatyti stogo dangų spalvos ir šilumos izoliacijos poveikį bei naudą ilgalaikiam įprastų stogų šiluminiam ir higroterminiam efektyvumui. Tyrimo išvados rodo, kad akmens vata apšiltinti ir hibridiniai stogai išlaikys tariamas šiluminės varžos vertes, artimas nominalioms vertėms, o tariamoji poliizocianurato šiluminės varžos vertė stogo konstrukcijoje žymiai sumažės veikiant šalčiui arba aukštai lauko (ir saulės spinduliuotės sukeltai) temperatūrai. Į tai reikėtų atkreipti ypatingą dėmesį projektuojant stogų konstrukcijas. Buvo nustatyta, jog stogo konstrukcija su poliuretano izoliacija ir baltos spalvos viršutine danga pasižymėjo geresnėmis savybėmis ir sutaupė 53,8 % vėsinimui reikalingos energijos, palyginti su tamsiai dažytu stogu, apšiltintu stiklo vatos izoliacija. Tai gali būti siejama su mažu poliuretano šiluminiu laidumu ir šilumine difuzija bei didesniu šviesios spalvos stogo dangos atspindžiu (Finch, Ricketts ir Dell, 2014; Sadineni, Madala ir Boehm, 2011).

Khoukhi ir kt. (2016) tyrė eksploatacinės temperatūros įtaką polistireninio putplasčio (EPS) šiluminiui laidumui ir nustatė, kad EPS šiluminis laidumas dienos metu kinta priklausomai nuo temperatūros  $T_x$ . Procentiniai pokyčiai ypač reikšmingi apie vidurdienį, kai buvo fiksuojamas atitinkamai iki 9,4% ir 20% padidėjęs sienos ir stogo šiluminis laidumas. Sienos ir stogo konstrukcijoje esančio šilumos izoliacijos sluoksnio sukaupta šiluma, dėl kurios padidėja atitvaros temperatūra, rodo šilumos izoliacijos šiluminio laidumo pokytį. Iš tiesų, sienos ir stogo konstrukcijoje sukauptos šilumos pokytis yra ypač ryškus apie vidurdienį ir gali siekti atitinkamai 4% ir 14%, palyginus su šiluma, apskaičiuota pagal šilumos laidumo koeficientą  $\lambda_{dec}$ . Taigi, tai turi įtakos ir vėsinimo poreikio skaičiavimui esant aukštesnei nei +24 °C eksploatacinei temperatūrai.

Tseng, Yamaguchi ir Ohmori (1997) matavo PU putų šiluminį laidumą nuo kambario temperatūros iki -253 °C ir nustatė, kad dujų laidumas uždaroje porose sudaro maždaug 60–80 % viso šilumos perdavimo, o šilumos perdavimas spinduliavimu nėra svarbus žemų temperatūrų ribose, tačiau kambario temperatūroje jis sudaro 10–20 %. PU putų porose esančių dujų: n-pentano, izopentano ir azoto šiluminis laidumas buvo matuojamas tarp +36 °C ir +141 °C temperatūrų ir esant dujų slėgiui nuo pastovaus slėgio iki 1,0 MPa, tokiu atveju, dujų laidumas sudaro 60–65 % viso šilumos perdavimo (Dohrn ir kt., 2007). Dujų šiluminis laidumas laikui bėgant kinta, nes pūtimo agentas ir kitos uždaru porų putose esančios dujos laikui bėgant išsisklaidys, o į uždarus poras pateks oras (Zhang ir kt., 2017). Norint įvertinti tam tikros temperatūros aplinkos įtaką PU putų šilumos izoliacinėms savybėms skirtingomis sąlygomis, dviejų PU putų šiluminis laidumas buvo išmatuotas +20 °C temperatūroje, po to, bandiniai savaitę laikyti aukštos ir žemos temperatūrų bandymo kameroje, aplinkos sąlygoms kintant tarp -40 °C ir +70 °C

pakaitomis ir kiekvienai temperatūrai skiriant po 12 val. Pirmojo bandinio šiluminis laidumas padidėjo 11,8 % nuo 0,0204 (W/m·K) iki 0,0228 (W/m·K), o antrojo bandinio šiluminis laidumas padidėjo 8,4 % nuo 0,0215 (W/m·K) iki 0,0233 (W/m·K) po to, kai buvo kaitaliojama aukštos ir žemos temperatūros aplinka. Nustatyta, kad PU putų šiluminis laidumas mažėja kintant aukštai ir žemai temperatūrai (Zhang ir kt., 2017).

Daugiasluoksnių plokščių gamintojai šiluminio laidumo vertes paprastai pateikia tik esant aplinkos temperatūrai. Todėl, norint patvirtinti nuo temperatūros priklausantį PIR šerdies šiluminio laidumo modelį Wang ir Foster (2017) atliko du nedidelio masto gaisrinius bandymus su daugiasluoksniomis plokštėmis su PIR šerdimi. Matavimo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

Galima pastebėti, kad PIR šiluminis laidumas eksponentiškai didėjakylant temperatūrai. Esant +1000 °C temperatūrai, šiluminis laidumas padidėja daugiau nei 25 kartus lyginant su šiluminio laidumo verte išmatuota aplinkos temperatūroje, o tai rodo, kaip svarbu temperatūros poveikį įtraukti į porėtų medžiagų šiluminio laidumo nustatymo modelį.

**1 lentelė.** PIR putų šiluminio laidumo priklausomybė nuo temperatūros (Wang, Foster, 2017)

Temperatūra, $T$ (°C)	Efektyvusis šilumos laidumo koeficientas, $\lambda^*$ (W/m·K)
1	0,029
20	0,031
50	0,034
100	0,039
200	0,051
300	0,065
400	0,083
500	0,104
600	0,130
700	0,162
800	0,199
900	0,242
1000	0,293

### 1.5. Pirmojo skyriaus išvados

Atlikus naujausių tyrimų apie PIR šilumos izoliacijos senėjimo procesus, temperatūros įtaką šilumos laidumo koeficiento pokyčiui ir temperatūros įtaką PIR šiluminėms savybėms apžvalgą ir išanalizavus sendintų bandinių šiluminio laidumo nustatymo metodus prieita šių išvadų:

1. nustatyta, kad aplinkos temperatūros poveikis PIR šiluminiam laidumui nėra pakankamai ištirtas. Nėra aiškių įrodymų, kad PIR šiluminis laidumas padidėja esant žemai aplinkos temperatūrai, o tai turėtų reikšmingą neigiamą poveikį šios medžiagos naudojimui, nes šaltuoju metų laiku šilumos srautas per izoliuotas konstrukcijas padidėtų, kai tuo metu šilumos perdavimas turi būti ribojamas;

2. naip pat kyla klausimų dėl PIR šiluminių savybių pokyčio veikiant aukštesnei ir žemesnei temperatūrai. Nors mokslinėje literatūroje buvo paskelbta

nemažai teorinių prielaidų apie putinimo dujų difuzijos intensyvumą per medžiagos mikrostruktūrą ir mainus su aplinkos oru, praktiniu požiūriu jas sunku įvertinti, nes dauguma statybinių PIR gaminių prieš naudojimą turi būti pjaustomi, iš dalies pašalinant dangas;

3. nėra visuotinai bendro sutarimo dėl PIR gaminių šiluminių savybių matavimo technologijos, nes dėl mažo šios medžiagos šiluminio laidumo, matavimo prietaisuose atsiranda labai maži šilumos srautai, o šie šoniniai nuostoliai gali sumažinti matavimo tikslumą;

4. lieka atsakyti į praktinio taikymo klausimą dėl standartinės metodikos taikymo nustatant deklaruojamą PIR produktų šilumos laidumo koeficiento vertę, siekiant imituoti tikrąsias naudojimo sąlygas pastato atitvarose. Sendinto bandinio, išpjauto iš gaminio šerdies, šiluminis laidumas gali būti žymiai didesnis nei viso produkto, todėl tokiu būdu būtų nepagrįstai padidintas šių šilumos izoliacinių medžiagų naudojimas norint pasiekti reikiamą pastatų energinį naudingumą;

5. bandymais ir tyrimais nustatyta, jog tam tikros PIR dangos gali veikti kaip ilginiai šiluminiai tilteliai, todėl analizuojant pastato atitvaras šiluminiu požiūriu, svarbu įvertinti ir galimų ilginių šiluminių tiltelių įtaką.

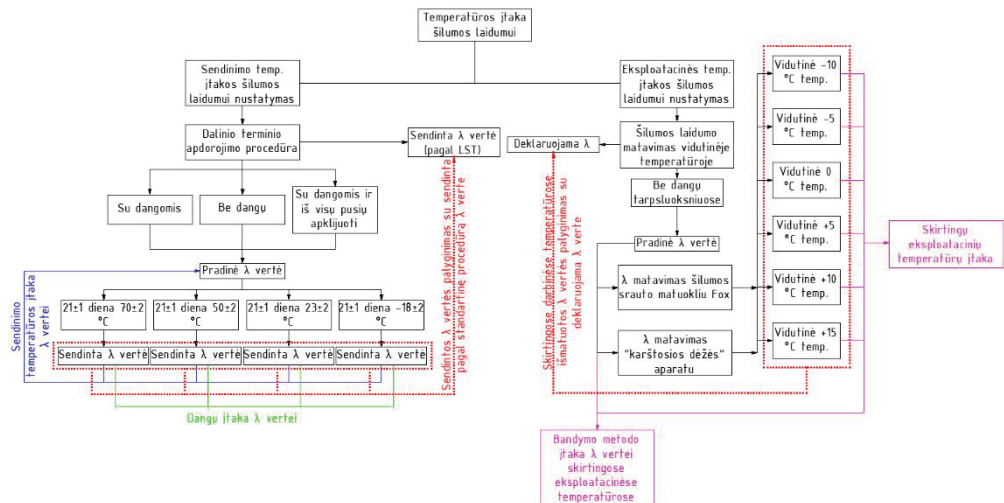
## **2. TYRIMŲ METODIKA**

Šiame skyriuje yra išskiriamos trys tyrimų kryptys. Pirmiausia buvo atliekami matavimai nustatyti aplinkos temperatūros įtakai PIR šiluminiam laidumui. Šiuo atveju buvo atliekamas bandinių sendinimas skirtingose temperatūrose ir vertinama šių temperatūrų įtaką PIR šiluminių savybių pokyčiui bei šiluminio laidumo matavimai vidutinėse bandinio temperatūrose, siekiant nustatyti eksploatacinių temperatūrų įtaką PIR šiluminių savybių pokyčiui. Antroji tyrimų kryptis buvo pavadinta tęstiniu terminiu sendinimu. Šių tyrimų esmė buvo nustatyti to paties bandinio šiluminių savybių pokytį, jį veikiant skirtingoms temperatūroms, ir įvertinti PIR šiluminių savybių kitimo dinamiką. Kadangi visi bandymai buvo atliekami su trimis skirtingais bandiniais: su dangomis, be dangų ir apklijuoti difuzijai nelaidžiomis dangomis iš visų pusių, tai labai svarbu įvertinti ir dangų įtaką PIR šiluminių savybių pokyčiui. Kadangi analizuojamoje mokslinėje literatūroje rasta svarių įrodymų, jog tam tikros PIR dangos gali veikti kaip ilginiai šiluminiai tilteliai, todėl trečioji tyrimų kryptis buvo susijusi su šių ilginių šiluminių tiltelių nustatymu ir įvertinimu.

### **2.1. Tyrimų koncepcija nustatant aplinkos temperatūros įtaką PIR šiluminiam laidumui**

Aplinkos temperatūros įtakos pentano dujomis putintų PIR produktų šiluminiam laidumui tyrimai buvo atlikti dviem kryptimis pagal 10 pav. pateiktą schemą. Pirmoji kryptis – PIR produktų šiluminio laidumo (dalinio terminio apdoravimo procedūra), išmatuoto standartinėmis (vidutinė bandinio temperatūra +10 °C) sąlygomis, priklausomybė nuo bandinių dangų (ne)buvimo ir bandinių kondicionavimo skirtingose temperatūrose. Šiluminis laidumas buvo matuojamas trijų tipų PIR bandiniams – gamykliškai padengtiems, pašalinus gamyklines dangas

ir naujai apklijuotiems difuzijai nepralaidžiomis dangomis – prieš ir po 21 dienos išlaikymo keturių skirtingų temperatūrų aplinkoje (nuo  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Matavimai buvo atlikti standartinėmis sąlygomis, t. y. šiluminio laidumo matavimo aparato apatinė plokštė buvo nustatyta  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o viršutinė  $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , taip sukuriant  $20\text{ K}$  temperatūros skirtumą per bandinį, o šiluminis laidumas buvo nustatytas vidutinėje  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bandinio temperatūroje. Šiame eksperimente bandiniai buvo sendinami kaip ir standartinėje fiksuoto prieaugio procedūroje, tačiau bandiniai buvo bandomi visu storiu, kaip pagaminti, t. y. nepjaunant  $20\text{ mm}$  storio bandinio iš gaminio šerdies. Tai daroma siekiant išsiaiškinti, kaip visas produktas sensta esant skirtingoms temperatūroms ir kaip dangų (ne)buvimas daro įtaką šiluminio laidumo pokyčiams. Gautos vertės buvo palygintos su pagal standartinę procedūrą sendintų gaminių šiluminiu laidumu.



10 pav. Eksperimentinių tyrimų schema

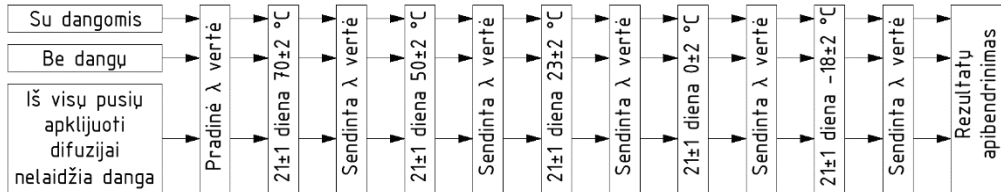
Antroji kryptis – PIR produktų šilumos laidumo koeficiento priklausomybės nuo vidutinės bandinio temperatūros matavimo metu tyrimai. Matavimo prietaisuose buvo nustatytos skirtingos oro ar šilumos srauto matuoklio plokščių, besiliečiančių su bandinių paviršiais, temperatūros, pagal kurias buvo apskaičiuota vidutinė bandinių temperatūra – nuo  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Matavimai buvo atliekami naudojant tris pagal bandinių dydį, matavimo plotą ir šoninę izoliaciją skirtingus prietaisus, sukuriant skirtingas galimybes susidaryti šoniniams šilumos nuostoliams, galbūt lemiantiems matavimo rezultatų tikslumą matavimo metu. Išmatuoti šilumos laidumo koeficientai buvo lyginami su deklaruota PIR gaminių šilumos laidumo koeficiento verte (visi lygiagrečiai tirti produktai buvo kontroliuojami gamykloje). Apibendrinus abiejų krypčių matavimų rezultatus, nustatyta aplinkos temperatūros sąlygų įtaka PIR produktų šiluminėms savybėms.

### 2.1.1. Tęstinio terminio sendinimo įtaka bandinių šiluminiam laidumui

Tęstinio terminio sendinimo procedūra yra trečioji bandymų kryptis, kurios algoritmas pavaizduotas 11 pav. Šios procedūros metu bandiniai yra laikomi ( $+70$



$\pm 2$ ) °C temperatūroje (21  $\pm$  1) dieną. Praėjus šiam laikotarpiui, bandiniai kondicionuojami 16 valandų (+23  $\pm$  3) °C temperatūroje, esant (50  $\pm$  10)% santykinei drėgmei, tada sendintos šiluminio laidumo vertės nustatomos naudojant FOX 314 šilumos srauto matuoklį. Išmatuota vertė lyginama su verte, gauta atlikus standartizuotą matavimą (fiksuito praeaugio procedūra). Vėliau, naudojant tas pačias procedūras, bandiniai (21  $\pm$  1) parą apdorojami (+50  $\pm$  2), (+23  $\pm$  2), (0  $\pm$  2) ir (-18  $\pm$  2) °C temperatūroje, ir po kiekvieno etapo matuojamas jų šiluminis laidumas.



11 pav. Tęstinio terminio sendinimo bandymų algoritmas

### 2.1.2. Šiluminio laidumo matavimas ir terminio sendinimo metodų aprašymas

Tiriamų produktų šiluminiam laidumui matuoti buvo naudojami trys skirtingi matavimo prietaisai.

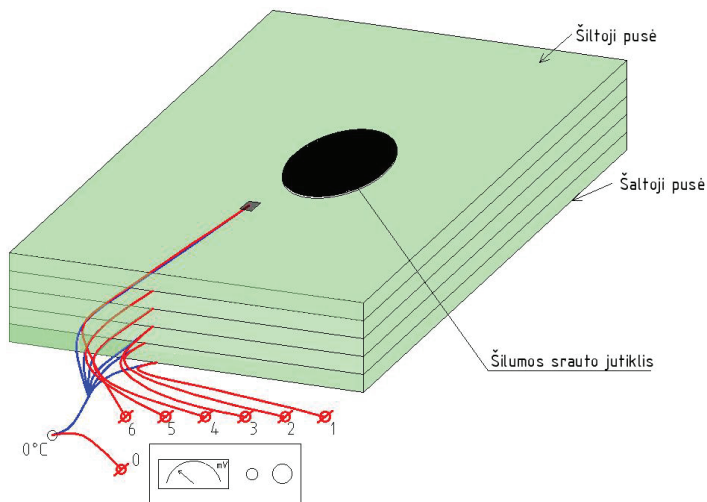
Šilumos srauto matuoklis FOX 314 (sukurtas „TA Instruments“, JAV) yra pagamintas iš dviejų plokščių, kuriose yra sumontuoti šilumos srauto matuokliai ir temperatūros jutikliai, kurie dedami virš ir po bandiniu. Matavimo FOX šilumos srauto matuokliais principas yra sukurti pastovų temperatūros skirtumą tarp apatinės ir viršutinės plokščių ir išmatuoti specifinį šilumos srautą bei paviršiaus temperatūrą pastovios temperatūros sąlygomis. FOX 314 šilumos srauto matuoklio plokščių matmenys yra 305 × 305 mm, o šilumos srauto matuoklio matavimo plotas yra 100 × 100 mm. FOX 314 matavimo plokštės ir bandinys yra izoliuoti iš visų pusių 30 mm storio apsauga, kurios apskaičiuota šiluminė varža yra apie 0,96 (m<sup>2</sup>·K)/W. Šio matuoklio temperatūros reguliavimo tikslumas nustatytas iki  $\pm 0,01$  °C, o absoliutus šiluminio laidumo tikslumas – iki  $\pm 2$  %. Šis matavimo prietaisas buvo pasirinktas dėl mažo imties dydžio ir buvo naudojamas tiriant PIR bandinių šiluminio laidumo pokyčius po poveikio įvairiose temperatūrinėse aplinkose. Atsižvelgta į tai, kad matuojant nedidelio ploto ir mažo šiluminio laidumo bandinius, galimi šoniniai šilumos srautai. Tačiau šiame tyrimo etape buvo svarbiau ne nustatyti absoliutų bandomosios medžiagos šiluminį laidumą, bet jos pokyčius po sendinimo, taip išvengiant sisteminio šoninių šilumos nuostolių poveikio.

Šilumos srauto matuoklis FOX 600 (sukurtas „TA Instruments“, JAV), veikiantis tuo pačiu principu, kaip ir FOX 314, buvo naudojamas matuojant PIR bandinių šiluminį laidumą esant skirtingoms vidutinėms temperatūroms. FOX 600 šilumos srauto matuoklio plokščių matmenys yra 610 × 610 mm, matavimo plotas – 254 × 254 mm. FOX 600 matavimo plokštės ir bandinys yra izoliuoti iš visų pusių 50 mm storio apsauga, kurios numatoma šiluminė varža yra apie 1,6 (m<sup>2</sup>·K)/W. Temperatūros valdymo tikslumas nustatytas iki  $\pm 0,01$  °C. Šio matavimo prietaiso absoliutus šiluminio laidumo matavimo tikslumas nustatytas iki  $\pm 1$  %. Įrenginys, turintis didesnę bandinio plotą ir didesnę šilumos srauto matavimo plotą, buvo naudojamas siekiant sumažinti šoninių šilumos srauto nuostolių galimybę, o antrąją



tyrimo kryptimi buvo svarbu nustatyti konkrečią gaminio šilumos laidumo koeficiento vertę ir palyginti su standartiškai nustatyta deklaruota šiluminio laidumo verte.

„Karštosios dėžės“ aparatas (toliau KD) taip pat buvo naudojamas tiriant PIR gaminių šiluminio laidumo priklausomybę nuo vidutinės bandinio temperatūros. KD aparatai yra plačiai naudojami pastatų komponentų šiluminiams bandymams atlikti, dažniausiai jų matmenys didesni nei šilumos srauto matuoklio (Asdrubali, Baldinelli, 2011). Kiekvieną KD konfigūraciją sudaro dvi uždaros kameros (sutartinai pavadintos šilta ir šalta), kuriose palaikomos pastovios, individualios temperatūros ir oro judėjimo greitis. Dvi kameros yra atskirtos tiriamojo bandinio arba pertvaros, kurioje įstatomas bandinys. Skaičiuojant visuminę bandinio šiluminę varžą, naudojamas stabilizuotas šilumos srautas tarp dviejų patalpų esant stabiliai temperatūrai, apskaičiuojamas kaip tiekama energija į matavimo kamerą. Žinant vienalytės medžiagos bandinio storį ir aplinkos sąlygas, apskaičiuojamas jo šiluminis laidumas. Šiame tyrime matavimo kameros energijos sąnaudos buvo matuojamos tik šilumos srauto stabilumui nustatyti. Buvo išmatuotas vidutinis KD aplinkos temperatūros stabilumas per 4 valandas: šiltoje aplinkoje buvo 0,11 °C; šaltoje aplinkoje –0,15 °C. Šilumos srautui per bandinį matuoti buvo naudojamas šilumos srauto jutiklis PU 4.3 (Taikomosios fizikos institutas TPD TND-TH), pritvirtintas prie šiltosios bandinio pusės, kur oro temperatūra yra apie +20 °C. Šilumos srauto jutiklio skersmuo yra 100 mm, storis – 3 mm; kalibravimo vertė – 6,2 W/(m<sup>2</sup>·mV) (tikslumas 5%); temperatūros korekcija – +0,04 %/K; šiluminis laidumas – 0,25 W/(m·K).



**12 pav.** Šilumos srauto jutiklio ir termoporų išdėstymas bandinyje matavimui KD

Matuojant temperatūrą bandinių paviršiuose ir tarp bandinių sudarančių plokščių (12 pav.), buvo naudojamos vario konstantano (ANSI T tipo, dvipusės izoliuotos TT-T36) termoporos (pagamintos „Omega“) ir multimetras HP34401A. Nulinis taškas buvo nustatytas naudojant ledo taško celę TRC III (pagaminta „Omega“), tikslumas  $\pm 0,1$  °C, stabilumas  $\pm 0,04$  °C. 20 × 20 mm vario folijos

kvadratai buvo prilituoti prie termoporų galų, taip pagerinant temperatūros matavimo tikslumą tam tikroje plokštumoje. Šis KD aparatas ir pritaikytas metodas buvo pasirinkti didelio storio (150 mm) bandinio šiluminiam laidumui matuoti esant skirtingoms vidutinėms temperatūroms, išvengiant šoninių šilumos nuostolių, nes bandinys sumontuotas 9 m<sup>2</sup> ploto pertvaroje (matavimo plotas 2,4 × 2,4 m), storis – 206 mm, o šiluminė varža – 5,86 (m<sup>2</sup>·K)/W. KD matavimo metu sukurtos bandinio aplinkos sąlygos yra artimiausios PIR produktams naudojamiems pastatų konstrukcijose. Matavimo prietaisų techninės charakteristikos pateiktos 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Matavimo prietaisų techninės charakteristikos

Techninės charakteristikos	Matavimo prietaisais		
	FOX 314	FOX 600	KD
Šilumos srauto matuoklio plokščių matmenys	305 × 305 mm	610 × 610 mm	3000 × 3000 mm
Šilumos srauto matuoklio matavimo plotas	100 × 100 mm	254 × 254 mm	2400 × 2400 mm
Apsaugos storis	30 mm	50 mm	206 mm
Apsaugos šiluminė varža	0,96 (m <sup>2</sup> ·K)/W	1,6 (m <sup>2</sup> ·K)/W	5,86 (m <sup>2</sup> ·K)/W
Temperatūros reguliavimo tikslumas	±0,01 °C	±0,01 °C	+0,04 %/K
Absoliutus šiluminio laidumo tikslumas	iki ±2 %	iki ±1 %	5 %

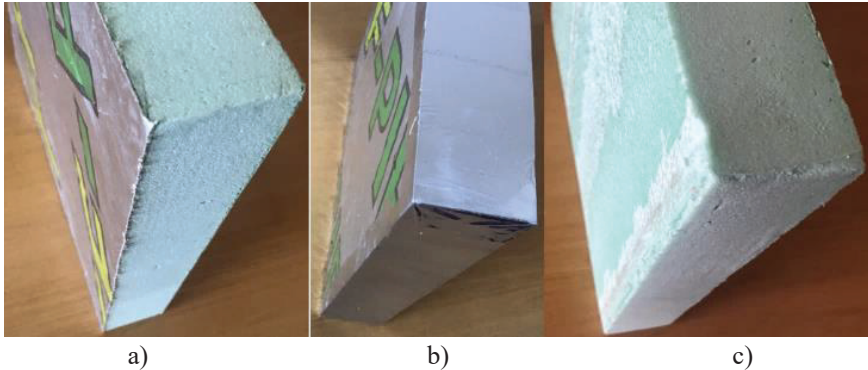
Prieš matuojant šiluminį laidumą, visi bandiniai buvo kondicionuojami kontroliuojamos temperatūros ir santykinio drėgnumo klimato kameroje +23 ±3 °C temperatūroje ir 50 ±10 % santykinio drėgnumo ribose. Bandinių kondicionavimo laikas prieš matavimą standartinėmis sąlygomis buvo 16 valandų. Bandiniai šiluminio laidumo pokyčiams tirti po veikimo skirtingose temperatūrinėse aplinkose (21 ±1) dieną buvo laikomi klimato kameroje, kurioje temperatūra buvo reguliuojama taip: (+70 ±2), (+50 ±2), (+23 ±2) ir (–18 ±2) °C. Nustatant sendintas šiluminio laidumo vertes, šilumos laidumo koeficiento vertė suapvalinama iki 0,0001 W/(m·K), kaip nurodyta PIR gaminio standarte LST EN 13165:2012+A2.

### 2.1.3. Tyrimams naudojami gaminiai ir bandiniai

Šiam eksperimentiniam tyrimui iš gamintojo buvo gautos standžiosios PIR (putintos pentanu) plokštės su aliuminizuota daugiasluoksne danga. Tam tikriems eksperimentiniams tyrimams buvo paruošti skirtingi bandinių rinkiniai.

Tiriant PIR šiluminio laidumo priklausomybes nuo dangų (ne)buvimo ir jų poveikio skirtingose temperatūrinėse aplinkose, buvo paruošti 30 mm ir 50 mm storio ir 305 × 305 mm matmenų bandiniai. Kiekvieno storio bandiniai buvo išpjauti iš trijų skirtingų gamybos datų produktų. Kiekvienai gamybos datai buvo naudojami trijų tipų bandiniai: pirmasis bandinys buvo su gamykline aliuminizuota

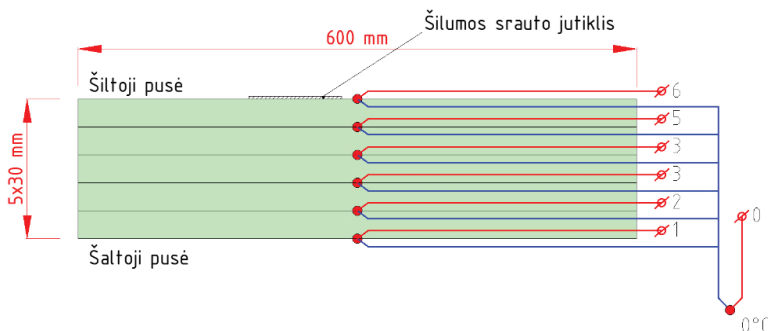
daugiasluoksne difuzine danga; antrasis bandinys buvo apklijuotas difuzijai nepralaidžia plėvele iš visų pusių; trečiojo bandinio dangos buvo pašalintos (13 pav.).



**13 pav.** Bandinių pavyzdžiai: a) bandinys su gamykline aliuminuota daugiasluoksne difuzine danga; b) bandinys, apklijuotas iš visų pusių; c) bandinys be dangų

Šie bandiniai buvo matuojami naudojant šilumos srauto matuoklį FOX 314. Pradiniai PIR gaminių šiluminio laidumo bandymai skirtingose temperatūrose aplinkose buvo atlikti naudojant šilumos srauto matuoklį FOX 314. Matavimams buvo naudojami 30 mm storio 305 × 305 mm bandiniai su gamykline danga, nustatant įvairias apatines ir viršutines šilumos srauto matuoklio plokščių temperatūras, kurių skirtumas yra 10 °C, kad gautume vidutinę bandinių temperatūrą. Tada buvo paruošti 5 bandiniai, kurių storis 30 mm ir matmenys 600 × 600 mm.

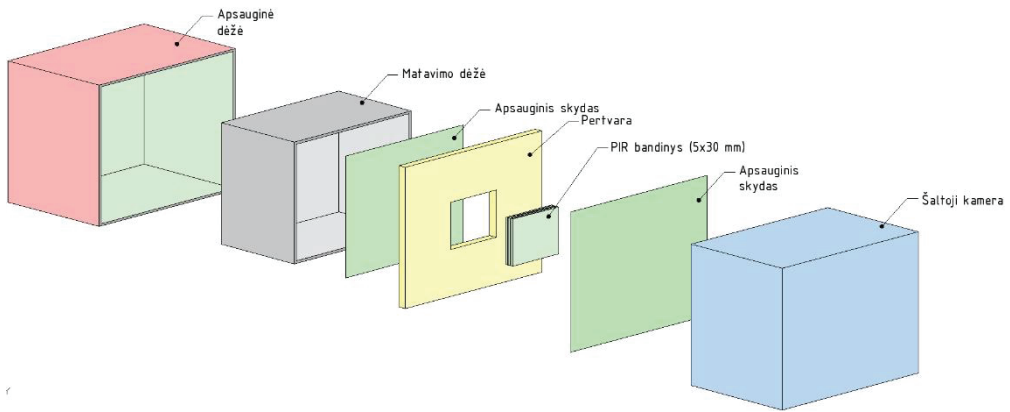
Šių bandinių šiluminis laidumas įvairiose temperatūrinėse aplinkose buvo matuojamas naudojant šilumos srauto matuoklį FOX 600. Kadangi šiuo atveju bandiniai nebuvo sendinami, nebuvo prasmės matuoti bandinių šilumos laidumo koeficientą, apklijuojant bandinį difuzijai nepralaidžia danga. Todėl šilumos srauto matuokliu FOX 600 matavome tik bandinius su gamykline danga, palikta karštoje ir šaltoje pusėje. Tada iš šių bandinių buvo suformuotas vienas 150 mm storio bandinys matavimui KD. Matavimo metu bandiniai buvo uždėti vienas ant kito, o vidinių sluoksnių bandinių dangos buvo pašalintos, kad būtų sukurtas geras kontaktas tarp atskirų plokščių (14 pav.).



**14 pav.** Sudėtinis PIR bandinys šiluminiam laidumui matuoti KD

Tokio sluoksniavimo tikslas – gauti įvairių vidutinių temperatūrų seką; taip sudėjus bandinius vieną ant kito, susidaręs temperatūrų skirtumas abiejose sluoksnelio pusėse yra nedidelis, lyginant su vidutine bandinio temperatūra, todėl išmatuotas vidutinis temperatūrų skirtumas yra tikslesnis nei temperatūrų skirtumas išmatuotas per visą bandinio storį.

Naujai suformuotas bandinys buvo sudėtas į KD pertvarą, kaip parodyta 15 pav. Šiame eksperimente kiekvienos plokštės kraštai buvo apriboti tos pačios temperatūros bandinio rėmeliu, taip pašalinant šoninių šilumos nuostolių galimybę.



15 pav. Sudėtinio PIR bandinio įrengimo KD schema

## 2.2. Įvairių PIR dangų įtakos šilumos perdavimui per pastato atitvaras tyrimas

Kai kuriais atvejais rekomenduojama pašalinti dangas nuo gaminių jų sujungimo vietoje, sujungti gaminius klijuojant kampuose, tačiau praktikoje PIR gaminiai dažnai klijuojami nepašalinus dangų. Todėl šis tyrimas atliekamas siekiant įvertinti, kiek dangos gali įtakoti šilumos perdavimą per atitvaras, ypač, kai danga pagaminta iš aliuminio folijos.

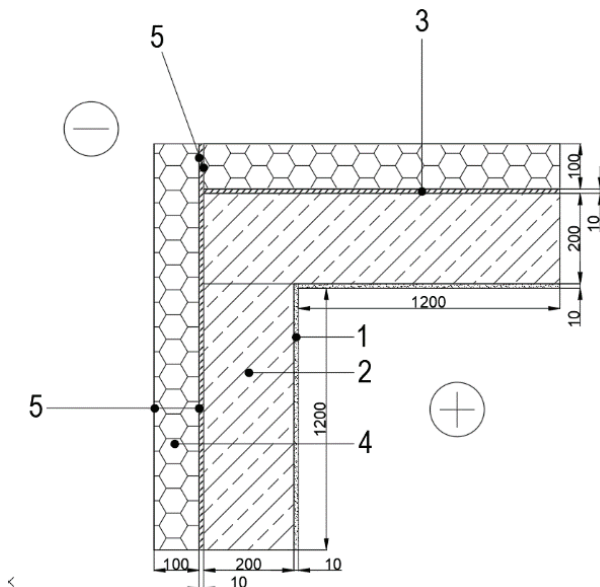
### 2.2.1. Tiriamų sienos fragmentų konstrukcija ir medžiagos

Skaitiniam modeliavimui naudojamos vėdinamos sienos konstrukcija parodyta 16 pav. Šios sienos šilumos perdavimo koeficiento vertė ( $U$ ) buvo parinkta pagal Europos izoliacijos gamintojų asociacijos (European Insulation Manufacturers Association, 2020) rekomendacijas ir šiauriniame klimate pastatytų energijos beveik nevartojančių pastatų (NZEB) reikalavimus.  $U$  vertė  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  patenka į sienų  $U$  verčių intervalą Europos šiaurinio regiono šalyse, kur jos svyruoja nuo  $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  iki  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (Ahmed ir kt., 2017). Sienų  $U$  vertė šiam tyrimui buvo apskaičiuota pagal LST EN ISO 6946:2017.

Konstrukciją sudaro 10 mm vidaus tinko apdaila, 200 mm akytojo betono blokelių mūras, ~10 mm storio PU klijų sluoksnis ir 100 mm PIR šilumos izoliacijos sluoksnis (šiluminės savybės pateiktos 3 lentelėje), taip pat vėdinamas oro tarpas ir išorės apdaila (neparodyta 16 pav.). Pasirinktos skirtingos difuzijai nelaidžios PIR

šilumos izoliacijos dangos, kad būtų galima užtikrinti deklaruojamą šilumos laidumo koeficientą.

Šiuose sienų fragmentuose buvo naudojama PIR šilumos izoliacija su keturiomis skirtingomis dangomis: daugiasluoksne aluminizuota danga, aluminio folija, daugiasluoksne popierine danga ir plastikine danga, taip pat PIR šilumos izoliacija su pašalintomis dangomis ir PU klėjais PIR plokščių jungtyje.



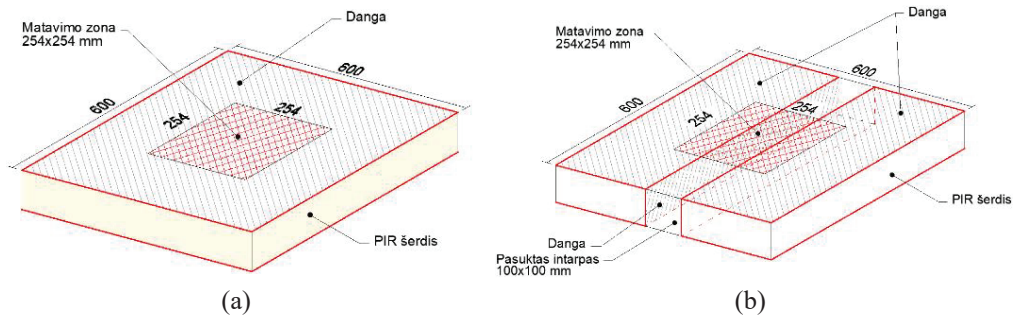
**16 pav.** Sienos kampo fragmentas: 1 – tinkas, 2 – akytojo betono blokelių mūras, 3 – PU klėjai, 4 – PIR šilumos izoliacija, 5 – PIR danga (žr. 2 lent.) (visi matmenys pateikti milimetrais)

### 3 lentelė. Sienos konstrukciją sudarančios medžiagos

Nr.	Medžiaga	Storis, mm	Deklaruojamas šilumos laidumo koef. $\lambda$ , W/(m·K)
1	Tinkas	10	0,9
2	Akytojo betono blokeliai	200	0,13
3	PU klėjai	$\leq 10$	0,04
	PIR plokštė su danga:	100	0,022
	a) aluminio folija	100 $\mu\text{m}$	211
4	b) aluminizuota daugiasluoksne danga	155 $\mu\text{m}$	0,125
	c) daugiasluoksne popierine danga	132 $\mu\text{m}$	0,066
	d) plastikine danga	103 $\mu\text{m}$	0,125

Smeigių ir tvirtinimo elementų įtaka modeliuojamam sienos fragmentui nebuvo įvertinta, nes tai yra lyginamasis tyrimas, todėl rezultatai nepriklauso nuo smeigių ir tvirtinimo detalių įvertinimo, nes šių elementų įtaka visais tiriamais atvejais būtų vienoda. Gautų rezultatų negalima tiesiogiai pritaikyti nustatant ilginių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo koeficientus panašiuose sienų kampuose, nes kiekvienu atveju bus skirtingos tvirtinimo detalės, skirtingi matmenys ir kiekiai.

Bandiniai eksperimentiniam matavimui buvo pagaminti iš dviejų 100 mm storio PIR plokščių su aliuminio folijos danga ir daugiasluoksne aliuminizuota danga. Pradiniam šiluminės varžos ( $R$ ) matavimui buvo naudojamos PIR plokštės (matmenys  $600 \times 600$  mm) su gamyklinėmis dangomis. Po to iš centrinės plokštės dalies išpjauta  $100 \times 100$  mm pločio juosta (lygi bandinio storiui) su dangomis ir pasukta 90 laipsnių kampu, kad šios juostos dangos būtų statmenos viso bandinio paviršinėms dangoms (17 pav.). Taigi, naujajame bandinyje dangos sutapo su šilumos srauto kryptimi, taip suformuodamos ilginį šiluminį tiltelį.



**17 pav.** Bandiniai su pažymėta matavimo zona: a) vientisas bandinys, b) bandinys su pasukta įdėtine detale (visi matmenys išreikšti milimetrais)

Ilginių šiluminių tiltelių įvertinimas gali būti atliekamas eksperimentiškai, naudojant standartizuotus matavimo metodus dviem tos pačios konstrukcijos pastato elementams, pirmajam su ir antrajam be ilginio šiluminio tiltelio (Ben Larbi, 2005). Šilumos perdavimą (šiluminę varžą) per pastato elementą galima išmatuoti naudojant šilumos srauto matuoklio aparatą FOX 600. Visų bandymų metu nustatyta temperatūra buvo pastovi:  $\theta_i = 20$  °C ir  $\theta_e = 0$  °C. Nebuvo atsižvelgta į vidinio ir išorinio paviršiaus šiluminės varžas.

Matavimo principas – sukurti pastovų temperatūros skirtumą tarp apatinės ir viršutinės plokščių ir išmatuoti specifinį šilumos srautą bei paviršiaus temperatūrą, pastovios temperatūros sąlygomis.

Išmatuoto bandinio  $R$  vertė buvo apskaičiuota pagal šią lygtį:

$$R = \frac{\Delta\theta}{q}, (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W} \quad (15)$$

čia:  $\Delta\theta$  – temperatūros skirtumas ant skirtingų matuojamo bandinio paviršių, K;  $q$  – šilumos srauto tankis, kertantis bandinį,  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Šilumos laidumo koeficientas  $\lambda$ ,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\lambda = \frac{d}{R}, \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (16)$$

čia:  $d$  – bandinio storis, m.

Nors šilumos srauto matuoklio aparatas buvo skirtas nustatyti kietosios medžiagos šiluminę varžą ir šiluminį laidumą, anot Lorenzati ir kt. (2014), iš skirtingų šiluminio laidumo medžiagų pagamintų sudėtinių bandinių ekvivalentinę šiluminę varžą  $R_e$  taip pat galima nustatyti. Šiuo atveju  $R_e$  vertei apskaičiuoti buvo



naudojamas vidutinis bandinio paviršiaus temperatūrų skirtumas. Bandinio su šilumos pertraukimu ekvivalentinis šilumos laidumo koeficientas  $\lambda_e$  buvo apskaičiuotas iš  $R_e$  naudojant (16) formulę.

Tiriamame bandinyje susidariusio ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas apibūdinamas šia lygtimi:

$$\varphi = \frac{(U_e - U) \cdot A}{2 \cdot l} = \frac{A \cdot \left(\frac{\lambda_e}{d} - \frac{\lambda}{d}\right)}{2 \cdot l} = \frac{\frac{A}{d} \cdot (\lambda_e - \lambda)}{2 \cdot l} = \frac{A}{d \cdot 2 \cdot l} \cdot (\lambda_e - \lambda), \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (17)$$

čia:  $l$  – ilginio šiluminio tiltelio, suformuoto bandinyje, ilgis, lygus šilumos srauto matuoklio matavimo zonos ilgiui,  $l = 0.254$  m;  $A$  – matavimo plotas,  $\text{m}^2$ ;  $\lambda$  – vientiso bandinio šilumos laidumo koeficientas,  $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ ;  $\lambda_e$  – bandinio su intarpu ekvivalentinis šilumos laidumo koeficientas,  $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ .

Šilumos srauto tankio padidėjimas per 1 m PIR plokščių jungtį su dangomis  $\Delta\Phi$ ,  $\text{W/m}$ , apskaičiuotas pagal formulę:

$$\Delta\Phi = \varphi \cdot \Delta\theta, \text{ W/m} \quad (18)$$

### 2.2.2. Skaitinis šilumos perdavimo per pastato kampų sujungimus, apšiltintus poliuretano gaminiais, modeliavimas

Modeliuojant šilumos perdavimą per pastato kampines jungtis, buvo naudojama Lawrence Berkeley nacionalinėje laboratorijoje (LBNL) sukurta kompiuterinė programinė įranga THERM 7, atitinkanti standartą LST EN ISO 10211:2017. THERM 7 yra dvimatis šilumos perdavimo skaičiavimo įrankis, skirtas pastato sudedamosioms dalims, tokioms kaip langai, sienos, pamatai, stogai ir durys, kur susirūpinimą kelia šiluminio tolygumo pokyčiai, vertinti (Berkeley lab, 2020). Tyrimui pasirinktas 2D modelis, nes sienos kampe buvo suformuotas ilginis šiluminis tiltelis. Programos THERM 7 šilumos perdavimo analizė grindžiama baigtinių elementų metodu, skirtu sudėtingos geometrijos ir skirtingų šiluminio laidumo statybinių medžiagų sudėtinėms struktūroms modeliuoti.  $\Psi$  reikšmė nurodo skirtumą tarp šilumos srauto per 2D elementą, kai skaičiavimuose naudojamas baigtinių elementų metodas, ir suminio šilumos srauto per 1D elementus, sudarančius sudėtinę struktūrą, šiuo atveju – sieną. Ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientą  $\Psi$  galima apibrėžti kaip pridėtinį šilumos srautą per ilginį šiluminį tiltelį to paties sprendimo atžvilgiu be ilginio šiluminio tiltelio (metru ilgio), kai tarp abiejų pusių susidaro  $1$  °C temperatūros skirtumas (Martin ir kt., 2012; Viot ir kt., 2015). Terminiškai nevienalyčio 2D elemento ir vienlyčio 2D elemento šilumos perdavimo koeficientų skirtumas rodo pertraukimų įtaką šilumos srautui, praeinančiam per sienos kampą. Šios įtakos vizualiam pavaizdavimui naudojamos temperatūros pasiskirstymo ir šilumos srauto intensyvumo diagramos.

Pagal standartą LST EN ISO 10211:2017, šilumos perdavimas, laikomas ilginio šiluminio tilteliu, skiriančiu dvi aplinkas,  $\Psi$ , apskaičiuojamas pagal:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j, \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (19)$$

čia:  $L_{2D}$  – ilginio šiluminio tiltelio savitieji šilumos nuostoliai, nustatyti skaičiuojant dvimatį temperatūrinį lauką komponentui, kuris skiria dvi aplinkas (vidų ir išorę),



$W/(m \cdot K)$ ;  $U_j$  – šilumos perdavimo koeficientas, apskaičiuotas vienmačiame temperatūriniame lauke komponentui  $i$ , kuris skiria dvi aplinkas,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $l_j$  – dvimačio geometrinio modulio ilgis, kuriam paskaičiuota šilumos perdavimo koeficiento  $U_j$  vertė, m;  $N_j$  – 1D komponentų skaičius.

Šiam skaitiniam modeliavimui buvo pasirinktos ribinės temperatūros  $\theta_{int} = 20$  °C ir  $\theta_e = 0$  °C bei paviršių šiluminės varžos  $R_{si} = 0,13$  ( $m^2 \cdot K$ )/W ir  $R_{se} = 0,04$  ( $m^2 \cdot K$ )/W.

Modeliuojamų pastato sienos kampų, apšiltintų PIR plokštėmis, ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientas buvo lyginamas su to paties sienos kampo, apšiltinto PIR be dangų ir PU klijų plokščių sujungime, ilginio šiluminio tiltelio šilumos perdavimo koeficientu. Gautų rezultatų verčių skirtumas buvo vienintelis skirtingų dangų ir PU klijų poveikio šilumos perdavimui per apšiltintą pastato sienos kampą poveikio rodiklis. Šilumos srauto padidėjimas per sienos kampo 1 m dėl dangų įtakos ( $\Delta\Phi$ ), buvo apskaičiuotas naudojant lygtį:

$$\Delta\Phi = (L_{2D}^F - L_{2D}^R) \cdot \Delta\theta, W/m \quad (20)$$

čia:  $L_{2D}^F$  – ilginio šiluminio tiltelio savitieji šilumos nuostoliai, nustatyti skaičiuojant sienos kampą, apšiltintą PIR šilumos izoliacija su dangomis,  $W/(m \cdot K)$ ;  $L_{2D}^R$  – ilginio šiluminio tiltelio savitieji šilumos nuostoliai, nustatyti skaičiuojant sienos kampą, apšiltintą PIR šilumos izoliacija be dangų,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\Delta\theta$  – vidinės ir išorinės temperatūrų skirtumas, naudojamas skaičiuojant šilumos nuostolius, K.

### 2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Siekiant išsiaiškinti, kaip visas produktas sensta esant skirtingoms temperatūroms ir kaip dangų (ne)buvimas daro įtaką šiluminio laidumo pokyčiams, šiluminis laidumas buvo matuojamas trijų tipų viso storio PIR bandiniams – su gamyklinėmis dangomis, pašalinus gamyklines dangas ir apklijuotiems difuzijai nepralaidžiomis dangomis.

2. Matavimai buvo atlikti trimis skirtingais šiluminio laidumo matavimo prietaisais, siekiant išsiaiškinti šoninių šilumos nuostolių matavimo metu įtaką matavimo rezultatų tikslumui.

3. Sudėtinio bandinio suformavimas iš atskirų PIR sluoksnių, tarp jų įrengus termoporas, suteikė galimybę išmatuoti medžiagos šiluminį laidumą plačiame temperatūros diapozone.

4. Bandinio su išilgai šilumos srautui esančia plona, šilumai laidžia danga šilumos laidumo matavimas suteikia galimybę eksperimentiškai ištirti medžiagų su dangomis jungtyse susidarancius ilginius šiluminius tiltelius ir patvirtina šių tiltelių skaitinio modeliavimo rezultatų teisingumą.

## 3. REZULTATAI

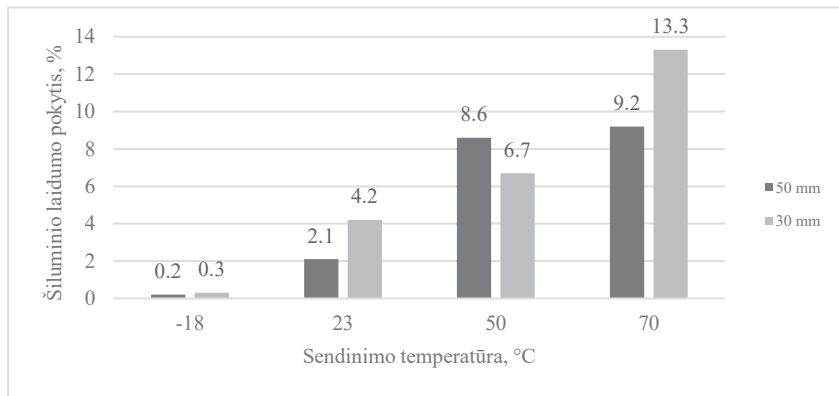
### 3.1. PIR gaminių šiluminis laidumas po sendinimo skirtingose temperatūrose

Pagal pirmąją kryptį atliktų tyrimų rezultatai pateikti 4 lentelėje. Naujų ir sendintų bandinių šilumos laidumo koeficientai buvo matuojami naudojant šilumos srauto matuoklį FOX 314. Šioje lentelėje pateiktos sendintos vertės (matuotos pagal

LST EN 12667:2002) nustatytos pagal standartines procedūras, nurodytas standžiųjų poliuretanių putų gaminių standarte LST EN 13165:2012+A2. Pradinės šiluminio laidumo vertės nustatytos iš bandinių, išpjautų iš gamykloje naujai pagamintų gaminių, ir išmatuotos prieš fiksuoto prieaugio procedūros pradžią.

### 3.1.1. Sendinimo temperatūros poveikis PIR bandinių vidutinio šiluminio laidumo pokyčiams

Pirmiausia skirtingose temperatūrose kondicionuotų bandinių šilumos laidumo koeficiento ( $\lambda$ ) vertės buvo lyginamos su pradinėmis šilumos laidumo koeficiento vertėmis. Trijų tipų bandinių šiluminio laidumo vertės buvo suvidurkintos ir pateiktos kaip procentinis pokytis kiekvienai sendinimo temperatūrai ir bandinio storiui (18 pav.).



**18 pav.** Procentinis vidutinio šiluminio laidumo pokytis po bandinių laikymo įvairiose temperatūrinėse aplinkose

Nustatyta, kad didžiausią įtaką šiluminio laidumo padidėjimui turėjo bandiniai, laikomi aukščiausioje temperatūroje (+70 °C): 30 mm storio bandiniuose šis pokytis buvo vidutiniškai 13,3 %, 50 mm storio bandiniuose – 9,2 %. Žymiai mažesni šiluminio laidumo pokyčiai buvo gauti palyginus naujų ir sendintų +50 °C temperatūroje bandinių šilumos laidumo koeficientų vertes. 30 mm storio bandiniams šis pokytis buvo 6,7 %, o 50 mm storio bandinių skirtumas 8,6 % buvo tik šiek tiek mažesnis nei po kondicionavimo +70 °C temperatūros aplinkoje.

Laboratorinėmis sąlygomis (+23 °C) laikomų bandinių šiluminių savybių pokyčiai yra dar mažesni – 4,2 % – 30 mm storio bandiniams ir 2,1 % – 50 mm storio bandiniams. Šie skirtumai rodo, kad putinimo dujų (pentano) difuzija vyksta kondicionuojant bandinius visose tyrime naudojamose temperatūrose, todėl kinta dujų sudėtis medžiagos porose, tačiau reikšmingi šiluminio laidumo pokyčiai įvyko tik tada, kai bandiniai buvo laikoma +70 °C temperatūroje. –18 °C temperatūroje laikomų bandinių šiluminio laidumo pokyčiai buvo nereikšmingi (0,2–0,3 %). Tai rodo, kad esant neigiamai temperatūrai putinimo dujų (pentano) difuzija vyksta labai lėtai ir tai nepakeičia dujų sudėties tiek, kad sukeltų šiluminio laidumo vertės pokyčius (liko paklaidos ribose).

**4 lentelė.** Šiluminio laidumo vertės prieš tam tikrą sendinimą ir po jo, esant skirtingoms temperatūros sąlygoms (pasitikėjimo intervalai apskaičiuojami esant 90% pasikliautinumui)

Storis, mm	Sendinta $\lambda$ vertė (EN 12667), W/(m·K)	Pradinė $\lambda$ vertė, W/(m·K)	Sendinta +70 °C $\lambda$ vertė, W/(m·K)	Sendinta +50 °C $\lambda$ vertė, W/(m·K)	Sendinta +23 °C $\lambda$ vertė, W/(m·K)	Sendinta –18 °C $\lambda$ vertė, W/(m·K)	
50	0,0245 ±0,0002 (±0,98%)	0,0205 ±0,0002 (±1,49%)	0,0222 ±0,0002 (±0,76%)				
		0,0204 ±0,0003 (±1,65%)	0,0226 ±0,0009 (±3,90%)				
		0,0209 ±0 (±0,12%)	0,0231 ±0 (±0,39%)				
	0,0244 ±0,0009 (±3,78%)	0,0201 ±0 (±0,13%)			0,0218 ±0 (±0,37%)		
		0,0206 ±0,0002 (±1,07%)			0,0224 ±0,0003 (±1,34%)		
		0,0207 ±0,0001 (±0,68%)			0,0226 ±0 (±0,23%)		
	0,0255 ±0 (±0,13%)	0,021 ±0 (±0,14%)				0,0214 ±0 (±0,13%)	
		0,0204 ±0,0002 (±0,87%)				0,021 ±0 (±0,33%)	
		0,0208 ±0,0001 (±0,64%)				0,021 ±0 (±0,48%)	
	0,0247 ±0,0006 (±2,57%)	0,0205 ±0,0005 (±2,27%)					0,0206 ±0,0004 (±1,89%)
		0,0204 ±0,0003 (±1,33%)					0,0204 ±0,0002 (±0,85%)
		0,0208 ±0 (±0,14%)					0,0209 ±0 (±0,30%)
30	0,0242 ±0,0003 (±1,03%)	0,0206 ±0,0002 (±0,71%)	0,0226 ±0,0001 (±0,57%)				
		0,0209 ±0,0001 (±0,67%)	0,0239 ±0,001 (±0,47%)				
		0,021 ±0,0002 (±0,74%)	0,0242 ±0,0002 (±0,75%)				
	0,0247 ±0,0002 (±0,77%)	0,0213 ±0,0003 (±1,41%)			0,0222 ±0,0003 (±1,14%)		
		0,0207 ±0,0003 (±1,61%)			0,0224 ±0,001 (±5,58%)		
		0,0208 ±0 (±0,27%)			0,0223 ±0,0003 (±1,28%)		
	0,0247 ±0 (±0,16%)	0,0208 ±0 (±0,10%)				0,0216 ±0 (±0,38%)	
		0,0206 ±0,0002 (±0,86%)				0,0214 ±0,0001 (±0,63%)	
		0,0211 ±0,0001 (±0,63%)				0,022 ±0,0002 (±0,93%)	
	0,0246 ±0,0003 (±1,17%)	0,0204 ±0 (±0,26%)					0,0204 ±0 (±0,15%)
		0,0207 ±0,0001 (±0,48%)					0,0206 ±0 (±0,45%)
		0,0211 ±0,0001 (±0,48%)					0,0213 ±0 (±0,36%)

Bandiniai su dangomis

Aplijuoti bandiniai

Bandiniai be dangų

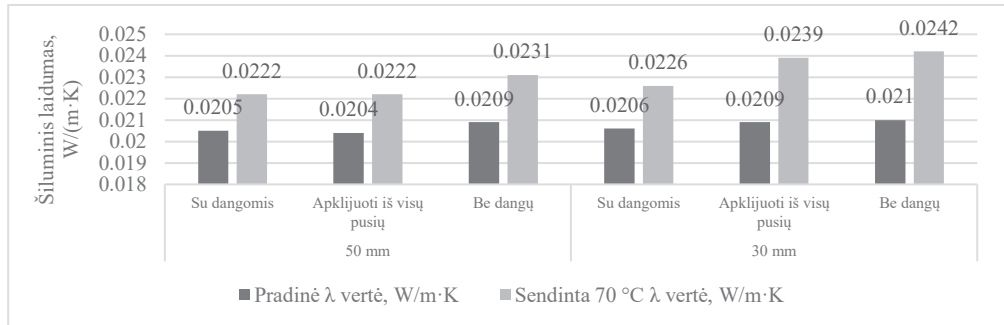
### 3.1.2. Bandinių storio įtaka PIR bandinių šiluminio laidumo pokyčiui

Neigiamoje temperatūroje (–18 °C) laikomų bandinių šiluminis laidumas kito ne daugiau kaip 2 % (22 pav.), todėl nėra pagrindo teigti, kad esant neigiamos

temperatūros sąlygoms, plonesnių gaminių šiluminis laidumas kinta greičiau ar labiau nei storesnių bandinių. Tačiau procentiniai vidutinių šiluminio laidumo verčių pokyčiai, pateikti 18 pav., rodo, kad 30 mm storio bandinių vidutinės šilumos laidumo koeficiento vertės pokytis yra maždaug 1,5 karto didesnis nei 50 mm storio bandinių po kondicionavimo didesnėse nei kambario temperatūrose.

### 3.1.3. Dangų įtakos bandinių šiluminių savybių pokyčiui analizė

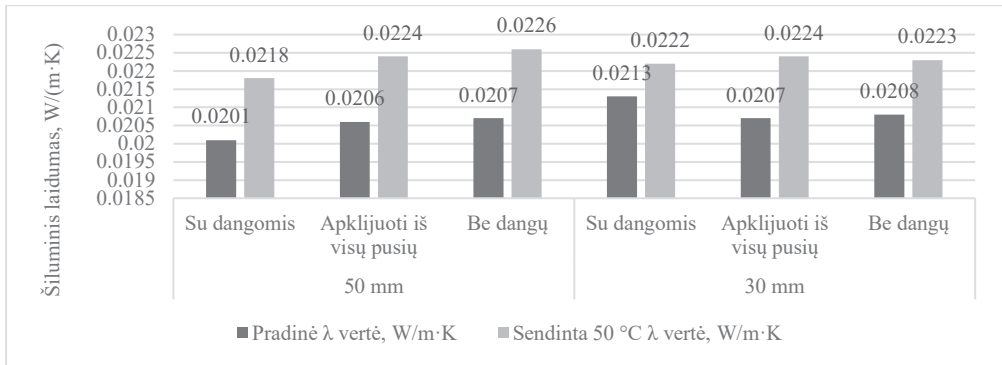
Bandinių su skirtingomis dangomis (su gamykline difuzijai atsparia danga; iš visų pusių sandariai apkljuota difuzijai atsparia danga; be dangų) šiluminio laidumo pokyčiai, veikiant +70 °C temperatūrai, pateikti 19 pav.



**19 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo +70 °C temperatūroje

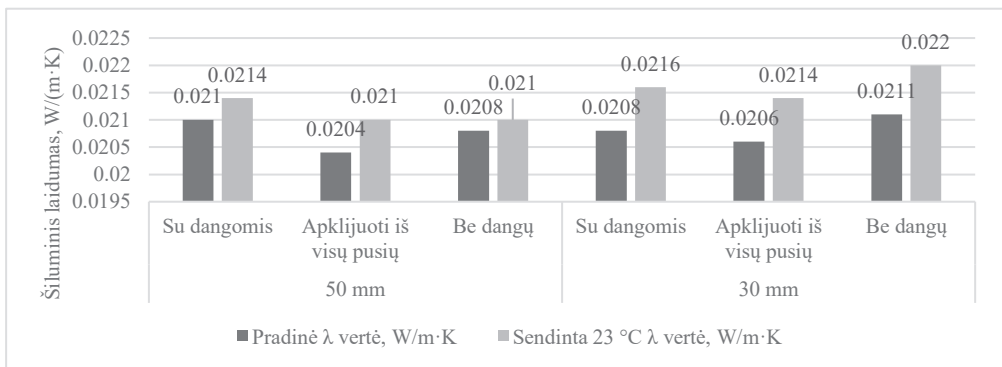
Abiejų tiriamų storių atveju buvo užfiksuotas visų tipų bandinių šiluminio laidumo padidėjimas, kuris 50 mm storio bandiniams siekia 8–10 %, o 30 mm storio – 10–15 %. Šiluminis laidumas labiausiai padidėjo plonesniuose bandiniuose su pašalintomis dangomis – 15,2 %. Plonesniems, iš visų pusių apkljuotiems difuzijai nelaidžia danga, 30 mm storio bandiniams, šiluminis laidumas padidėja beveik tiek pat, kiek bandinių su pašalintomis dangomis. Storesnių, iš visų pusių apkljuotų, bandinių (50 mm) šiluminis laidumas šiek tiek padidėjo, palyginti su bandiniais su gamykline danga, ir buvo mažesnis nei bandinių su pašalintomis dangomis. Tai patvirtina sutankintų paviršinių sluoksnių įtaką sumažėjusiam dujų difuzijos intensyvumui. Šio eksperimento rezultatai parodė, kad PIR bandinių laikymas aukštoje temperatūroje padidina dengtų bandinių ir bandinių be dangų šiluminį laidumą.

Kitame tyrimo etape nauji bandiniai buvo sendinami +50 °C temperatūroje, matavimo rezultatai parodyti 20 pav. Šiuo atveju bandinių šiluminio laidumo pokyčiai buvo maždaug vienodi, 8–9 %, išskyrus 30 mm storio bandinių su gamykline danga, kurių pradinis šiluminis laidumas buvo didesnis nei kitų. Palyginus su +70 °C temperatūroje laikomų bandinių šiluminio laidumo matavimų rezultatais pastebėta, kad šiame etape 50 mm storio bandinių šiluminis laidumas pasikeitė panašiai, o 30 mm storio bandinių šiluminio laidumo pokyčiai buvo mažesni.



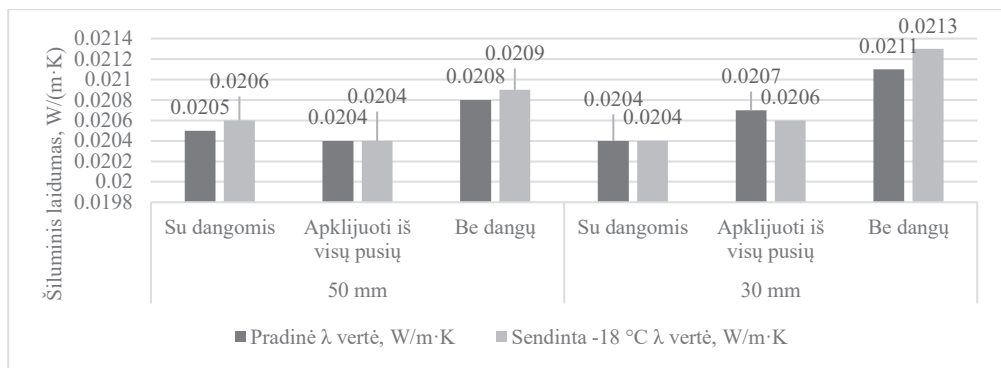
**20 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo +50 °C temperatūroje

Kambario temperatūroje (+23 °C) sendintų bandinių šiluminio laidumo matavimo rezultatai pateikti 21 pav. Šiuo atveju temperatūros poveikis yra dar mažesnis, 50 mm storio bandiniams jis yra tik 1–3 %, o 30 mm storio – apie 4 %. Tikėtina, kad gauti šiluminio laidumo skirtumai yra labiau susiję su bandinių struktūra ar jų dangomis, nei su putinimo dujų difuzijos poveikiu. Įdomu tai, kad 50 mm bandinių be dangų šiluminis laidumas keitėsi mažiausiai ir siekė tik 1 %, o analogiškas plonesnis bandinys keitėsi labiausiai (4 %). Tai galima paaiškinti tik tuo, kad bandinių paviršiuje yra tankesnis medžiagos sluoksnis.



**21 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo +23 °C temperatūroje

Paskutinio eksperimentinio etapo, kai bandiniai buvo sendinami neigiamoje (–18 °C) temperatūroje, šiluminio laidumo matavimo rezultatai pateikti 22 pav. Šiuo atveju nei dangos, nei neigiama temperatūra neturi praktiškai jokios įtakos šiluminio laidumo pokyčiams. Visais išmatuotais atvejais rezultatai nuo pradinės šiluminio laidumo vertės skyrėsi iki 1 %, t. y. matavimo paklaidos ribose. Šie pokyčiai yra dar mažesni nei bandiniams, laikomiems laboratorinėmis sąlygomis (+23 °C). Tai rodo, kad net paviršiniuose medžiagų sluoksniuose nevyksta dujų difuzija.



**22 pav.** Bandinių su skirtingomis dangomis šiluminio laidumo pokyčiai po sendinimo –18 °C temperatūroje

### 3.1.4. Skirtingai sendintų bandinių šiluminio laidumo verčių palyginimas

Lyginant išmatuotas vertes su standartinėmis sendintomis vertėmis, galima pastebėti, kad viso 50 mm storio bandiniai nepasiekė sendintų verčių, išmatuotų pagal standartines šiluminio laidumo nustatymo procedūras. Išimtis yra tik 30 mm bandinys be dangų, sendinamas +70 °C temperatūroje, kuris pasiekė tą pačią šiluminio laidumo vertę kaip ir bandinys, sendintas pagal standartinę procedūrą. Kadangi standartinis bandymas atliekamas išpjaunant 20 mm storio bandinį iš gaminio šerdies, galima sakyti, kad 30 mm storio bandinys be dangų atitiko labai panašias sąlygas. Visais kitais atvejais dangų buvimas sulėtino medžiagos senėjimą. Palyginus bandinių su gamyklinėmis dangomis šiluminį laidumą po standartinio sendinimo ir išlaikius +70 °C temperatūroje, nustatyta, kad 30 mm storio bandinių skirtumas yra 7 %, o 50 mm storio – apie 10 %.

## 3.2. PIR gaminių šiluminis laidumas esant skirtingai temperatūrai

### 3.2.1. Šiluminis laidumas, išmatuotas šilumos srauto matuoklio aparatu

Šio tyrimo etapo tikslas yra išmatuoti šiluminį laidumą esant skirtingoms vidutinėms bandinio temperatūroms. Pradiniai PIR gaminių šiluminio laidumo bandymai įvairiose temperatūrinėse aplinkose buvo atlikti naudojant šilumos srauto matuoklį FOX 314. Matavimui buvo naudojami 30 mm storio 305 × 305 mm bandiniai su gamyklinėmis dangomis, nustatant skirtingas šilumos srauto matuoklio aparato apatinės ir viršutinės plokščių temperatūras iki 10 °C skirtumo, kad susidarytų skirtingos vidutinės bandinio temperatūros. Gauti rezultatai pateikti 5 lentelėje.

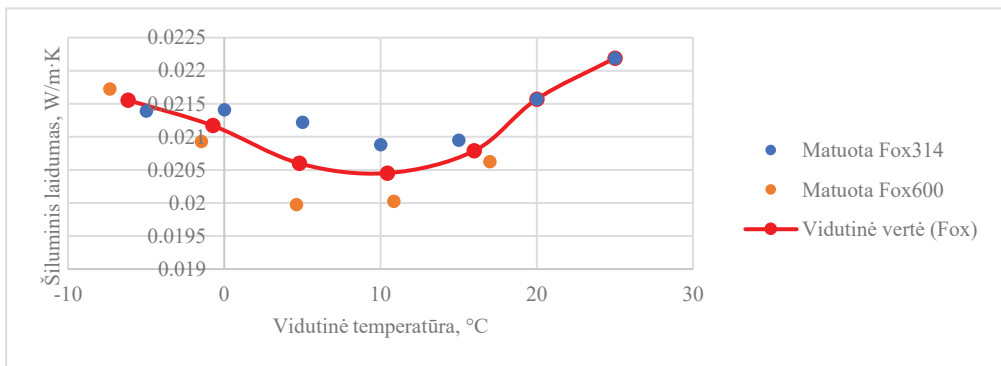
Matavimo rezultatai rodo, kad tiriamos izoliacinės medžiagos šiluminis laidumas yra mažiausias esant vidutinei +10 °C bandinio temperatūrai. Šiluminis laidumas didėja, kai vidutinė bandinio temperatūra krenta, tačiau šis pokytis yra lygus 2,4%, kai vidutinė bandinio temperatūra pakinta nuo +10 °C iki –5 °C. Iš 5 lentelės galima pastebėti, kad gamintojo deklaruota šiluminio laidumo vertė jokioje vidutinėje bandinio temperatūroje nebuvo pasiekta. Šiluminis laidumas arčiausiai deklaruojamos vertės buvo išmatuotas žemiausioje –7 °C vidutinėje bandinio temperatūroje, išmatuota šiluminio laidumo reikšmė deklaruotą vertę viršijo tik

esant +25 °C vidutinei bandinio temperatūrai.

**5 lentelė.** Šiluminio laidumo matavimų šilumos srauto matuokliuose FOX 314 ir FOX 600 rezultatai esant skirtingoms vidutinėms temperatūroms

Matavimai FOX 314		Matavimai FOX 600	
Deklaruojama $\lambda$ vertė, W/(m·K)			
0,0220			
Vidutinė temperatūra, °C	Šiluminis laidumas, W/(m·K)	Vidutinė temperatūra, °C	Šiluminis laidumas, W/(m·K)
-5	0,0214	-7,34	0,0217
0	0,0214	-1,48	0,0209
+5	0,0212	+4,62	0,0200
+10	0,0209	+10,86	0,0200
+15	0,0210	+16,99	0,0206
+20	0,0216		
+25	0,0222		

3.1 skyriuje atlikti bandymai parodė, kad plonesnių PIR gaminių šiluminis laidumas gali skirtis nuo storesnių. Norint gauti apibendrintus rezultatus, 30 mm storio bandiniai buvo supjaustyti iš tos pačios PIR produktų partijos, kaip ir matuojant šilumos srauto matuokliu FOX 314. Šie bandiniai buvo sudėti vienas ant kito, sudarant 150 mm storio 610 × 610 mm dydžio bandinį su termoporomis, sudėtomis į tarpus tarp atskirų plokščių (14 pav.). Daugiasluoksnis bandinys su termoporomis buvo naudojamas kiekvieno bandinio sluoksnio vidutinei temperatūrai nustatyti vieno matavimo metu. Šilumos srauto matuoklis FOX 600 buvo pasirinktas didesniai bandinio storiui išmatuoti, siekiant sumažinti šoninius šilumos srauto nuostolius matavimo metu. Techninės šio aparato galimybės leido pakeisti šaltos pusės temperatūrą nuo -10 °C iki 0 °C, o šiltos pusės temperatūrą – nuo 0 °C iki +22 °C. Matavimo rezultatai taip pat pateikti 5 lentelėje. PIR bandinių šiluminis laidumas, apskaičiuotas pagal išmatuotą pastovų šilumos srautą ir kiekvieno tarp sluoksnio temperatūras, parodytas 23 paveiksle.



**23 pav.** Šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinio temperatūros (šilumos srauto matuoklis)



Raudona linija 23 pav. rodo vidutines šiluminio laidumo vertes, nustatytas abiejų matavimų metu, atitinkančias vidutinę bandinio temperatūrą. Šis grafikas rodo, kad PIR izoliacinės medžiagos šilumos laidumo koeficiento vertės skirtingose temperatūrose iš tikrųjų skiriasi. Pastebėta, kad šiluminio laidumo vertės, išmatuotos šilumos srauto matuoklio aparatu FOX 314, naudojant mažesnius bandinius, buvo didesnės nei matuojamos FOX 600, naudojant didesnio ploto bandinius.

Norint išsiaiškinti, ar naudojant prietaisą su didesniu matavimo plotu matavimo metu visiškai pašalintas šoninių šilumos srautų nuostolių poveikis, šiluminiam laidumui KD aparate matuoti buvo naudojamas tas pats 150 mm storio daugiasluoksnis bandinys su termoporomis tarp sluoksniuose.

### 3.2.2. Šiluminis laidumas matuojamas KD

Bandinio įrengimo KD aparate schema parodyta 15 pav. Matuojant KD aparatu, šoniniai bandinio šilumos mainai su aplinka nevyksta, nes visą storį riboja gerai izoliuota, palyginti su bandinio plotu, didelių matmenų plokštė. Šiame matavimo etape nustatytas bandinių šiluminis laidumas turėtų geriausiai atitikti PIR gaminių šiluminį laidumą realiomis eksploataavimo sąlygomis. Penki 14 pav. pavaizduoto bandinio šilumos srauto ir temperatūros matavimai buvo atlikti naudojant KD aparatą. Atliekant keturis matavimus, šiltojoje pusėje buvo palaikoma +20 °C temperatūra, o šaltoje pusėje ji kas 5 °C buvo mažinama pradedant 0 °C iki –15 °C, taip matuojant įvairias vidutines bandinio temperatūras ir gaunant atitinkamą šilumos srautą per bandinį. Penktasis matavimas buvo atliktas su +25 °C temperatūra karštojoje ir +5 °C šaltojoje pusėje, tokiu būdu išmatuojant šiluminį laidumą aukštesnėje vidutinėje bandinio temperatūroje. Matavimo rezultatai pateikti 6 lentelėje.

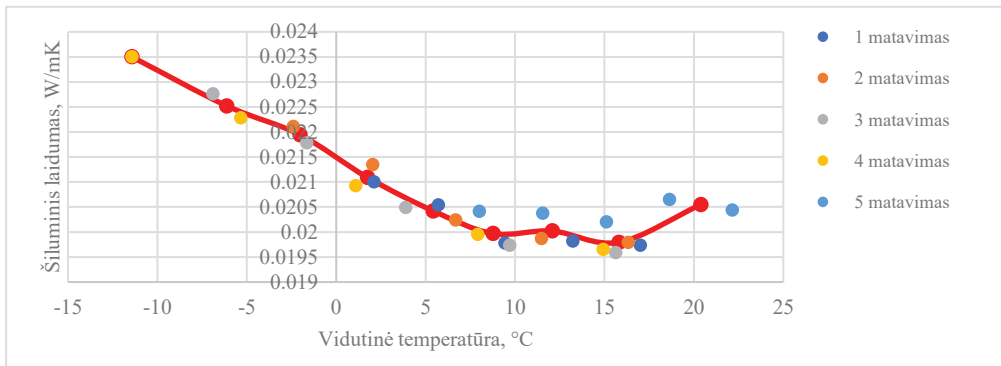
**6 lentelė.** Šiluminio laidumo matavimas skirtingose vidutinėse temperatūrose naudojant KD aparatą

1 matavimas		2 matavimas		3 matavimas		4 matavimas		5 matavimas	
Deklaruojama $\lambda$ vertė, W/(m·K)									
0,0220									
Vid. temp., °C	Šil. laid., W/(m·K)	Vid. temp., °C	Šil. laid. W/(m·K)	Vid. temp., °C	Šil. laid. W/(m·K)	Vid. temp., °C	Šil. laid., W/(m·K)	Vid. temp., °C	Šil. laid., W/(m·K)
						-11,43	0,0235		
				-6,90	0,0228	-5,35	0,0223		
		-2,41	0,0221	-1,66	0,0218	+1,09	0,0210	+8,00	0,0204
+2,1	0,0210	+2,03	0,0214	+3,88	0,0205	+7,90	0,0200	+11,54	0,0204
+5,71	0,0205	+6,66	0,0202	+9,69	0,0197	+14,92	0,0197	+15,10	0,0202
+9,43	0,0198	+11,46	0,0199	+15,63	0,0196			+18,83	0,0207
+13,22	0,0198	+16,32	0,0198					+22,14	0,0204
+17,00	0,0197								

Išmatuotų PIR bandinių šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinio temperatūros grafiškai pavaizduota 24 pav., kuriame matyti, jog šiluminio laidumo vertės yra arti vienos linijos, o tai rodo tiksliausią ir nuosekliausią šiluminio laidumo priklausomybę nuo vidutinės bandinio temperatūros.

Matuojant FOX 600, minimalios šiluminio laidumo vertės buvo nustatytos

bandiniams, kurių vidutinė temperatūra buvo +10 °C. Žemiausia vidutinė bandinio temperatūra, pasiekta pagal technines įrangos galimybes, t. y. –11 °C, atitinka didžiausią šilumos laidumo koeficiento vertę 0,0235 W/(m·K). Šilumos laidumo koeficiento vertė, išmatuota šiame bandymo etape, yra didesnė už deklaruojamą medžiagos šiluminio laidumo vertę (0,022 W/(m·K)), kurią PIR gamintojas nustatė standartiniu metodu, kai vidutinė bandinio temperatūra neviršija –2 °C.



24 pav. Šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinio temperatūros KD

### 3.3. Aplinkos temperatūros įtaka PIR produktų šiluminio laidumo pokyčiams

PIR produktų šiluminio laidumo matavimo rezultatų analizė parodė, kad PIR yra pakankamai stabili medžiaga, kai naudojama vidutinių temperatūrų aplinkoje, tačiau jos šiluminės savybės keičiasi, kai vyrauja aukštesnė temperatūra arba ji naudojama žemos temperatūros sąlygomis.

Tyrimo rezultatai patvirtino daugelio kitų tyrėjų pateiktą išvadą, kad PIR produktų šiluminio laidumo pokyčius daugiausia lemia medžiagos poras užpildančių putinimo dujų būsenos pokyčiai dėl jų difuzijos ir kondensacijos. PIR medžiagos šiluminio laidumo padidėjimas po išlaikymo temperatūrose nuo +23 °C iki +70 °C rodo tiesioginę priklausomybę nuo dujų difuzijos intensyvumo, kuris didėja didėjant dujų temperatūrai. Kai medžiaga laikoma žemesnėje teigiamos temperatūros aplinkoje, šiluminio laidumo padidėjimas yra nereikšmingas dėl mažo difuzijos intensyvumo. Kai bandiniai buvo laikomi neigiamoje –18 °C temperatūroje, jų nepakitusio šiluminio laidumo priežastis yra difuzijos sąlygų nebuvimas, nes esant žemai aplinkos temperatūrai medžiagos porose kondensuojasi putinimo dujos. Šio matavimo rezultatai rodo, kad PIR produktų laikymas neigiamoje temperatūroje nepablogina medžiagos ir nepadidina PIR gaminių šiluminio laidumo. Tai yra atvirkštinis aukštai teigiamai temperatūrai procesas, kai putinimo dujos yra dujinėje fazėje ir greičiau maišosi su aplinkos dujomis, taip negrįžtamai padidindamos medžiagos šiluminį laidumą.

Šio tyrimo rezultatai rodo, kad gamyklinių dangų poveikis stabdant putinimo dujų difuziją yra reikšmingas, o įvairios vėliau pritvirtintos difuzijai nelaidžios dangos neturi reikšmingo efekto, išskyrus iš gaminio šerdies išpjautus bandinius, kurie yra naudojami tik bandymams. Nustatyta, kad bandinių su gamyklinėmis dangomis šiluminio laidumo padidėjimas po sendinimo aukštesnėje temperatūroje

yra žymiai mažesnis nei gaminių be dangų ar iš gaminio šerdies išpjautų bandinių. Šis rezultatas kelia abejonių dėl standartinių PIR gaminių sendinimo procedūrų taikymo prieš nustatant jų šiluminį laidumą, nes PIR gamyklinių dangų atsparumas difuzijai išlieka visą gaminių tarnavimo laiką.

Taip pat pastebėta, kad plonesni bandiniai sensta greičiau, o jų šiluminio laidumo vertės padidėjimas yra intensyvesnis nei storesnių bandinių. Kuo didesnis medžiagos storis, tuo lėtesnė poras užpildančių dujų difuzija. Taip pat putų tankis yra didesnis gaminio paviršiniuose sluoksniuose, o tai irgi lemia lėtesnę dujų difuziją; plonų produktų tankis yra tolygesnis visame gaminio skerspjūvyje, tai taip pat turi didesnę poveikį dujų difuzijai iš medžiagos porų.

Šiluminės statybinių izoliacinių medžiagų savybės paprastai nustatomos standartiniais metodais esant vidutinei +23 °C aplinkos temperatūrai, todėl svarbu nustatyti ir tam tikrų izoliacinių medžiagų šiluminį laidumą esant neigiamai temperatūrai, ypač kai šios medžiagos naudojamos klimato zonose su neigiamos temperatūros sezonais. PIR bandinių šiluminio laidumo matavimo skirtingose temperatūrose rezultatai rodo, kad naujų produktų šiluminės savybės skiriasi priklausomai nuo vidutinės bandinio temperatūros, tačiau daug mažiau, nei nurodyta kai kuriose mokslo publikacijose.

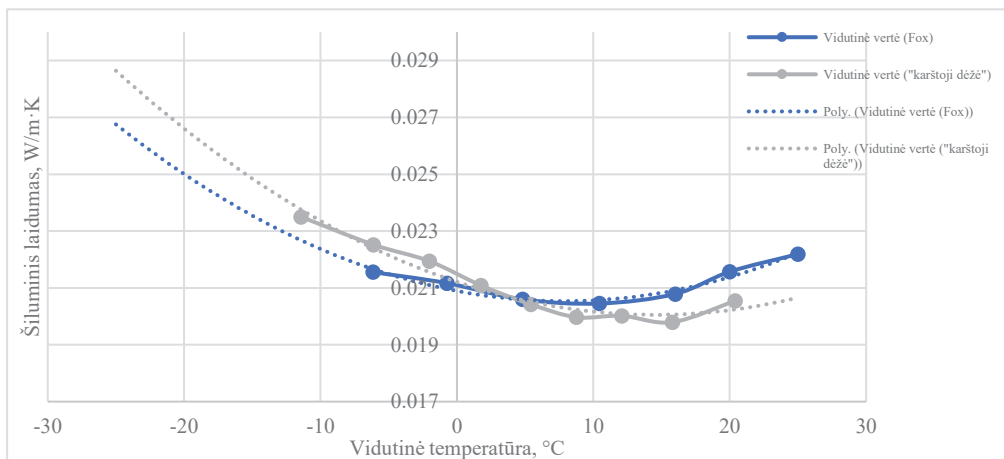
Išanalizavus šiluminio laidumo matavimo šilumos srauto matuokliu ir KD metodais rezultatus nustatyta, kad mažiausias šiluminis laidumas nustatytas bandiniams, kurių vidutinė temperatūra yra apie +10 °C, o tai atitinka daugumos šilumos izoliacijos gaminių vidutinės naudojimo sąlygas pastatų apvaskaluose. Šiluminis laidumas didėja didėjant vidutinei bandinio temperatūrai ir tampa didesnis nei deklaruota vertė tik esant vidutinei bandinio temperatūrai, aukštesnei nei +20 °C. Šį pokytį galima paaiškinti intensyvia putinimo dujų konvekcija medžiagos porose. Tačiau bandomos medžiagos atveju šis pokytis yra apie 5,5 %, lyginant išmatuotas vertes šilumos srauto matuoklio metodu, ir apie 2,6 %, kai matuojamas naudojant KD metodą, todėl galima teigti, kad praktikoje naudojamoje PIR gaminių šiluminių savybių deklaravimo procedūroje pakankamai atsižvelgiama į medžiagos šiluminio laidumo padidėjimą teigiamose temperatūrų aplinkose, neviršijančiose vidutinės +20 °C temperatūros, kuri susidaro naudojant PIR produktus pastatų atitvarų vidinei izoliacijai.

Didesni šiluminio laidumo pokyčiai buvo nustatyti bandiniams, matuotiems žemesnėje temperatūroje. Deklaruojamas šiluminis laidumas viršijamas esant vidutinei bandinių temperatūrai, žemesnei kaip -5 °C, o medžiagos šiluminis laidumas dar labiau padidėja, mažėjant temperatūrai. Šį pokytį galima paaiškinti dujų kondensacija medžiagos porose, kurios metu sugrupuotos (sujungtos) dujų molekulės padidina šilumą praleidžiančių kontaktų kiekį medžiagos porose. Šio tyrimo rezultatai rodo, kad dabartinė PIR gaminių šiluminių savybių deklaravimo tvarka tinkamai įvertina medžiagos šiluminio laidumo padidėjimą, kai naudojama šildomų pastatų atitvarų šilumos izoliacijai, tačiau turėtų būti koreguojama atsižvelgiant į PIR produktus, naudojamus šaldymo pastatuose, kai vidutinė medžiagos temperatūra gali nukristi žemiau -20 °C. Ekstrapoliavus matavimo rezultatus buvo galima numatyti, kad gaminių šiluminis laidumas padidės apie 20 %, palyginti su deklaruojama verte, o tai reikšmingai paveiks pastato atitvarų šiluminę

varžą ir, atitinkamai, energijos poreikį nustatytos vidaus oro temperatūros palaikymui.

Lyginant dviem metodais išmatuotų PIR bandinių šiluminio laidumo priklausomybės nuo vidutinės bandinių temperatūros rezultatus, pavaizduotus 25 pav., daroma išvada, kad matuojant mažo šiluminio laidumo produktus, turi būti įvertinta bandinių šilumos mainų su šonine aplinka galimybė. Matuojant bandinių šiluminį laidumą šilumos srauto matuoklio metodu esant vidutinei bandymo aplinkos temperatūrai +10 °C, rezultatai buvo artimiausi tiems, kurie buvo išmatuoti naudojant KD metodą, nes nebuvo šilumos mainų tarp bandinio ar aparato pertvaros ir aplinkos galimybės. Matavimai esant aukštesnei vidutinei temperatūrai sąlygojo šilumos perdavimo iš bandinių į aplinką sąlygas, dėl ko padidėjo šilumos srautas ir bandinių šiluminis laidumas. Kai šiluminis laidumas matuojamas žemesnėje temperatūroje, bandinys yra žemesnėje nei aplinkos temperatūra, tokiu būdu leidžiant patekti šilumai iš aplinkos, taip sumažinant išmatuotą šilumos srautą, dėl kurio šiluminis laidumas yra mažesnis nei matuojamas KD aparatu, kur šilumos mainų sąlygos su aplinka nesusidaro dėl didelio pertvaros ploto ir geros izoliacijos.

Apibendrinant tyrimo rezultatus nustatyta, kad PIR gaminių, naudojamų pastatų atitvarų šilumos izoliacijai, šiluminis laidumas eksploatacijos metu keičiasi nežymiai, jei medžiagos nėra laikomos aukštoje temperatūroje. Šio tyrimo rezultatai neturėtų būti taikomi produktams, padengtiems difuzijos nepraleidžiančiomis dangomis iš visų pusių, pavyzdžiui, vartams ar durims, šilumos izoliacijos žaliuzių sekcijoms, didelių matmenų daugiasluoksnėms plokštėms, nes nėra arba yra minimali galimybė susidaryti putinimo dujų mainams su aplinkos oru tik per pjautus galus, todėl šiluminis laidumas gali ir nepakisti. Tam reikėtų papildomų tyrimų. Tačiau naudojant produktus žemose temperatūrose, šiluminio laidumo padidėjimas turėtų būti įvertintas papildoma visų produktų šilumos laidumo koeficiento korekcija, neatsižvelgiant į putinimo dujų difuzijos galimybę.



**25 pav.** PIR šiluminio laidumo priklausomybė nuo vidutinės bandinių temperatūros

Gamyklinių dangų pašalinimas montuojant PIR gaminius ir vėlesnis difuzijai nepralaidžių dangų padengimas ant atvirų gaminio paviršių nesustabdo putinimo

dujų difuzijos, t. y. galimybė šiluminio laidumo padidėjimui yra, ypač sienos kampiniuose sujungimuose. Todėl reikėtų toliau tirti atvirų poliuretano paviršių dengimo nepralaidžiais dažais ar mastika galimybes ir jų įtaką šiluminėms savybėms.

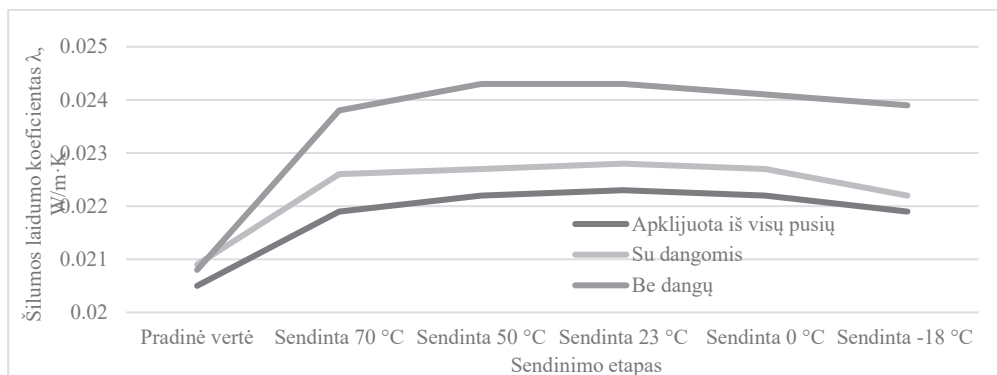
### 3.4. Tęstinio terminio sendinimo įtaka bandinių šiluminiam laidumui

7 lentelėje pateikiamos vidutinės išmatuoto šiluminio laidumo vertės prieš ir po bandinių išlaikymo skirtingose temperatūrinėse sąlygose.

**7 lentelė.** Vidutinės šiluminio laidumo vertės po tęstinio sendinimo skirtingomis temperatūros sąlygomis

Storis, mm	Dangos tipas	Šilumos laidumo koeficientas $\lambda$ , W/m·K					
		Pradinė	Sendinta +70 °C	Sendinta +50 °C	Sendinta +23 °C	Sendinta 0 °C	Sendinta -18 °C
30	Apklijuota iš visų pusių	0,0206	0,0224	0,0226	0,0228	0,0226	0,0219
	Su dangomis	0,0204	0,0219	0,0220	0,0221	0,0221	0,0222
	Be dangų	0,0208	0,0238	0,0243	0,0243	0,0241	0,0232
50	Apklijuota iš visų pusių	0,0205	0,0219	0,0220	0,0219	0,0219	0,0222
	Su dangomis	0,0206	0,0220	0,0220	0,0221	0,0221	0,0222
	Be dangų	0,0207	0,0230	0,0232	0,0231	0,0230	0,0232

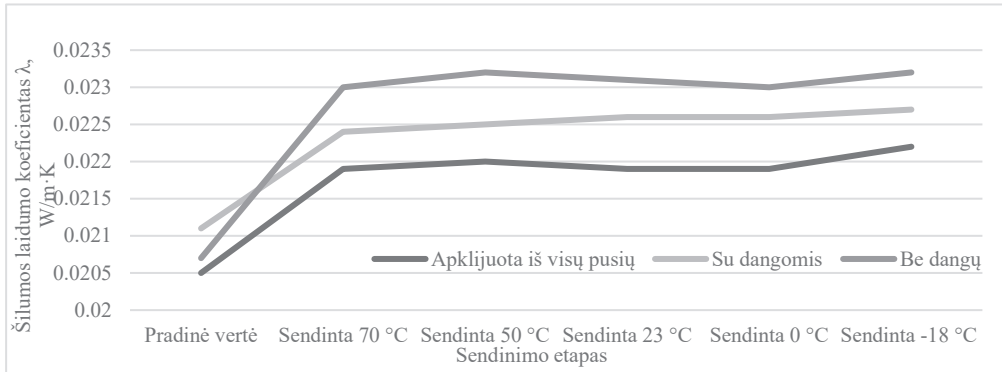
26 pav. pavaizduota 30 mm storio PIR bandinių šiluminio laidumo svyravimai, taikant tęstinio terminio sendinimo procedūrą. Visų tipų bandiniai rodo žymiai padidėjusį šiluminį laidumą po kondicionavimo +70 °C temperatūroje. Šį pokytį galima paaiškinti intensyviu dujų išsiskyrimu iš medžiagos porų į supančią aplinką. Galima pastebėti, kad kai tie patys bandiniai laikomi žemesnėje teigiamoje temperatūroje, šiluminis laidumas padidėja nereikšmingai, o bandinių su gamyklinėmis dangomis šiluminis laidumas yra artimas tiesiniam. Tai rodo, kad dujų išsiskyrimas į aplinką šiame etape iš esmės priklauso nuo jų judėjimo iš vidinių medžiagos sluoksnių į paviršinius. Bandinių be dangų šiluminis laidumas nustoja didėti anksčiau nei bandinių su dangomis, o tai priklauso nuo difuzijos galimybių, kurias riboja dangos.



**26 pav.** 30 mm storio bandinių vidutinio šilumos laidumo koeficiento kitimas tęstinio sendinimo metu

Šio eksperimento rezultatai taip pat rodo, kad bandinių be dangų šiluminis laidumas vidutinėmis eksploataavimo sąlygomis yra artimas deklaruojamam gaminio šiluminiam laidumui ir yra žymiai didesnis nei bandinių su gamyklinėmis dangomis. Tai rodo, jog taikant standartinę procedūrą net ir 30 mm storio gaminių su gamyklinėmis dangomis šiluminės savybės gali būti nepagrįstai pablogintos.

PIR šiluminio laidumo kitimo tendencija yra panaši ir 50 mm storio bandiniams (27 pav.).



**27 pav.** 50 mm storio bandinių vidutinio šilumos laidumo koeficiento kitimas tęstinio sendinimo metu

Šiuo atveju nustatyta, kad bandinio apklijavimas difuzijai nelaidžia danga iš visų pusių neturi įtakos PIR šiluminiam laidumui, nes neužtikrina dujų nepralaidumo. Šiame grafike taip pat galima pastebėti, kad bandinių šiluminio laidumo padidėjimas stabilizavosi anksčiau (jau po išlaikymo +70 °C temperatūroje), nei 30 mm storio bandinių. Taip gali nutikti dėl didesnio tiriamųjų bandinių šoninio ploto, kuris tuo pačiu laikotarpiu galėjo išskirti daugiau putinimo dujų. Ištyrus 50 mm storio bandinius taip pat paaiškėjo, kad bandinių su pašalintomis dangomis šiluminis laidumas išlieka mažesnis nei tų pačių 30 mm storio bandinių tęstinio terminio sendinimo metu. Šį skirtumą gali lemti tai, kad medžiagos paviršiaus sluoksniai sutankinami tiek, kad jie žymiai sustabdo dujų difuziją į aplinką, o eksperimento pabaigoje 50 mm storio bandinių porose likusi dujų koncentracija yra didesnė nei 30 mm storio bandiniuose. Tik tolesniais tyrimais būtų galima nustatyti bandinių storio poveikį dujų difuzijos greičiui ir atitinkamai šiluminio laidumo padidėjimui bandiniams su pašalintomis dangomis.

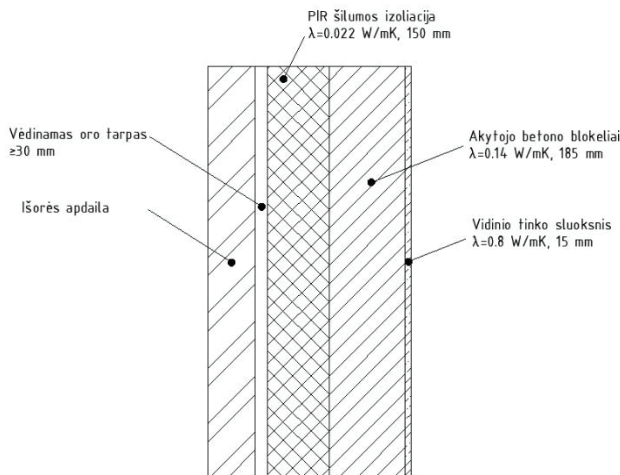
### 3.5. PIR gaminių šiluminio laidumo pokyčių poveikis šilumos perdavimui per apšiltintas atitvaras

Nustačius galimus PIR gaminių šiluminio laidumo pokyčius, lyginant su standartiškai nustatyta deklaruota šiluminio laidumo verte, buvo išanalizuotas šių skirtumų poveikis pasirinktos sienos šilumos perdavimui. Pasirinktos sienos (28 pav.) šilumos perdavimo koeficiento vertė ( $U$ ) buvo pasirinkta pagal Europos izoliacijos gamintojų asociacijos (European Insulation Manufacturers Association, 2020) rekomendacijas ir šiauriniame klimate statomų energijos beveik nevarojančių

pastatų (NZEB) reikalavimus (Ahmed ir kt., 2017).  $U$  vertė 0,12 W/(m<sup>2</sup>·K) patenka į sienų  $U$  verčių intervalą Europos šiaurinio regiono šalyse, kur jos svyruoja nuo 0,12 W/(m<sup>2</sup>·K) iki 0,17 W/(m<sup>2</sup>·K) (Paraschiv ir kt., 2017). Šiame tyrime sienos  $U$  vertė buvo apskaičiuota pagal LST EN ISO 6946:2017.

Konstrukcija susideda iš 15 mm vidinio tinko, 185 mm akytojo betono blokelių ir 150 mm PIR izoliacinio sluoksnio, taip pat iš ventiliuojamo oro tarpo ir išorinės plytų apdailos. Smeigių ir tvirtinimo detalių įtaka modeliuojamam sienos fragmentui nebuvo vertinta, nes tai yra lyginamoji analizė, todėl tvirtinimo detalės didelės įtakos neturėtų, ji būtų labai panaši visais tiriamais atvejais. Gautų rezultatų negalima tiesiogiai pritaikyti nustatant šilumos perdavimą per tam tikras sienas, nes kiekvienu atveju bus skirtingos tvirtinimo detalės, skirtingi matmenys ir kiekiai.

Reikėtų atkreipti dėmesį, jog 150 mm PIR sluoksnis buvo pasirinktas todėl, kad būtų galima pritaikyti rezultatus gautus sudėtinio bandinio šiluminį laidumą skirtingose eksploatacinėse temperatūrose matuojant šilumos srauto matuokliu FOX 600 ir „karštąją dėžę“, o 2.2.1. skyriuje aprašyto sienos fragmento PIR šilumos izoliacijos storis buvo parinktas kitoks todėl, kad ten vertinama tik dangos įtaka ilginių šiluminių tiltelių susidarymui sienos kampe.



**28 pav.** Mažai energijos vartojančio pastato sienos fragmentas

Apskaičiavus pasirinktos sienos šilumos perdavimo koeficientą, buvo sumodeliuotos skirtingos aplinkos temperatūros sąlygos, atitinkančios įvairias šilumos perdavimo skaičiavimo sąlygas ir atitinkamai išmatuotas PIR šiluminio laidumo vertes. Sąlygos ir skaičiavimo rezultatai pateikti 8 lentelėje.

Skaičiavimo rezultatai, pateikti 8 lentelėje, parodė, kad PIR gaminių šiluminis laidumas, nustatytas taikant standartinę procedūrą, atitinka sezoninių pastato šilumos nuostolių ir vėsinimo energijos nuostolių apskaičiavimo sąlygas. Apskaičiuojant pastato šilumos nuostolius šalčiausiais metų mėnesiais, galima naudoti patikslintą vertę, t. y. 0,002 W/(m·K) mažesnę šiluminį laidumą, kuris duotų apie 8 % mažesnius šilumos nuostolius per nurodytą atitvarą. Apskaičiuojant energijos nuostolius šaldytuvų paskirties pastatuose, turėtų būti naudojama 0,002 W/(m·K)



didesnė vertė už deklaruojamą PIR gaminių šilumos laidumo koeficientą, tai sumažintų numatomas metines energijos sąnaudas šaldymui, tačiau neturės reikšmingos įtakos realiam energijos suvartojimui, nes žemos lauko temperatūros periodais šilumos srautas per šaldytuvų paskirties pastatų atitvaras į aplinką yra žymiai mažesnis.

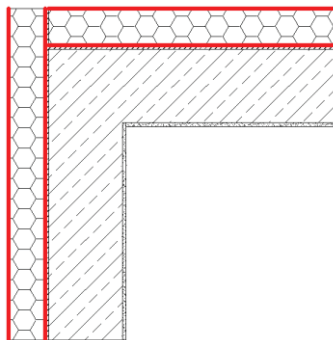
**8 lentelė.** Sienos šilumos perdavimo pokyčių priklausomybė nuo PIR šiluminio laidumo pokyčių

Išorės temp., °C	Vidaus temp., °C	Vidutinė PIR temp., °C	Skaičiavimo tikslas	Šiluminis laidumas		Šilumos perdavimo koef. $U$ , $W/(m^2 \cdot K)$
				Nustatymo būdas	$\lambda$ , $W/(m \cdot K)$	
0	+20	+10	Šildymas	Deklaruojama	0,022	0,120
0	+20	+10	Šildymas	Šilumos srauto matuoklis, + 10 °C	0,021	0,116
+30	+20	+25	Vėsinimas	Šilumos srauto matuoklis, ekstrapoliuota	0,022	0,120
-10	+20	+5	Šildymas, šalčiausią mėn.	KD	0,020	0,111
-5	-15	-10	Šaldymas	KD, ekstrapoliuota	0,024	0,129

### 3.6. Įvairių PIR dangų įtaka šilumos perdavimui per apšiltintų pastatų sienų kampus

#### 3.6.1. Skaitinio modeliavimo rezultatai

29 pav. pavaizduotos sienos, apšiltintos PIR šilumos izoliacija su skirtingomis dangomis, sumodeliuotas šilumos srautas pavaizduotas 30 pav.



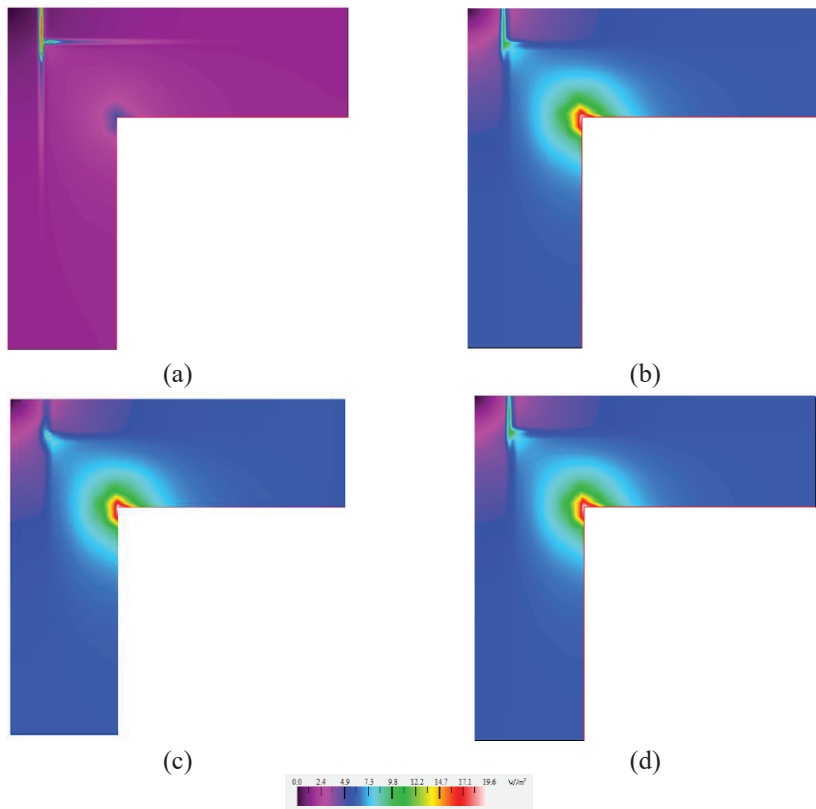
**29 pav.** Sieną apšiltinta PIR su skirtingomis dangomis: a) aliuminio folija, b) daugiasluoksnė aliuminuota danga, c) kompozitinė popierinė danga, d) plastikinė danga

Pagal (20) formulę apskaičiuotas šilumos srauto tarp sienos, apšiltintos PIR su aliuminio folijos danga, kampo ir sienos, apšiltintos PIR be dangų, kampo skirtumas buvo  $\Delta\Phi = 0,484$  W/m, o bandiniams su kitomis dangomis –  $\Delta\Phi = 0,001$  W/m. Šie

skaičiai įrodo, jog aliuminio folijos danga padidina šilumos srautą per konstrukciją, palyginti su kitomis PIR dangomis, ir turėtų būti vertinama.

Gauti rezultatai (9 lentelė) parodė, kad ilginio šiluminio tiltelio vertė, kai buvo naudojama PIR šilumos izoliacija su daugiasluoksne aliuminizuota, kompozitine popierine ar plastikine danga, buvo vienoda. Taip yra todėl, kad šios dangos turi labai panašų šilumos laidumo koeficientą, kuris yra artimas PIR šilumos izoliacinės medžiagos šiluminiam laidumui, todėl jų įtaka ilginio šiluminio tiltelio vertei yra labai maža. Kaip ir aliuminio folijos dangos atveju, net labai plona dangą gali pabloginti situaciją. Naudojant PIR šilumos izoliaciją be dangų, apskaičiuota šilumos perdavimo koeficiento  $U$  vertė buvo artima tam atvejui, kai PIR buvo naudojamas su dangomis, kurių šiluminis laidumas buvo panašus kaip paties PIR.

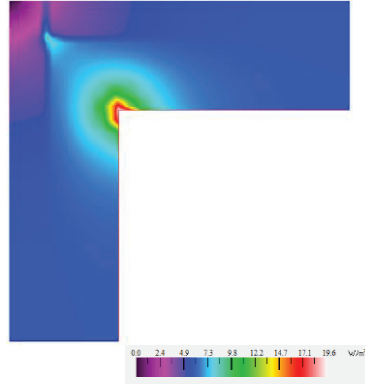
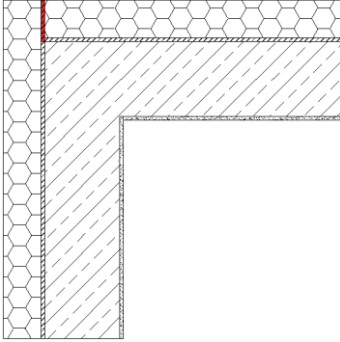
Modeliuotuose sienų kampuose PIR šilumos izoliacijos kampiniame sujungime buvo naudojamas 10 mm PU klijų sluoksnis, kad aliuminio folija kampiniame sujungime nesiliestų su aliuminio folija ant jungiamosios PIR plokštės išorinio paviršiaus.



**30 pav.** Šilumos srautas per sienas, apšiltintos PIR, kampus su skirtingomis dangomis: a) aliuminio folija, b) daugiasluoksni aliuminizuota dangą, c) kompozitinė popierinė dangą, d) plastikinė dangą

Atsižvelgiant į tai, kad PIR su aliuminio dangą rezultatai skyrėsi nuo kitų variantų, o kampai su likusiais paviršiais turėjo identišką vertes, buvo nuspręsta

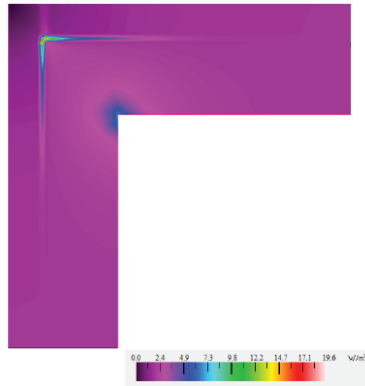
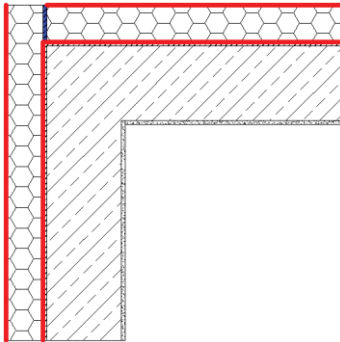
analizuoti kampa, apšiltintą PIR plokšte be dangų. 32 pav. pavaizduotas šilumos srauto intensyvumas per kampa, apšiltintą PIR šilumos izoliacija be jokių dangų, bet su PU kljais plokščių kampiniame sujungime (31 pav.).



**31 pav.** Siena apšiltinta PIR be dangų, bet su PU kljais sujungime

**32 pav.** Šilumos srautas per sienos kampa, apšiltintą PIR be dangų

Pastebėta, kad sienos kampai apšiltinti PIR šilumos izoliacija be dangų ir apšiltinti PIR šilumos izoliacija su kitomis nei aliuminio folija dangomis, turėjo tas pačias ilginių šiluminių tiltelių vertes, todėl buvo nuspręsta nevertinti PIR dangų, jei tai ne aliuminio folija. Galima sakyti, kad PIR plokštės, padengtos kompozitine popierine, daugiasluoksne aliuminizuota arba plastikine danga, davė tuos pačius rezultatus kaip PIR be dangų. Visi vėlesni šio tyrimo palyginimai buvo atlikti tarp PIR su aliuminio folijos danga ir PIR be dangų.



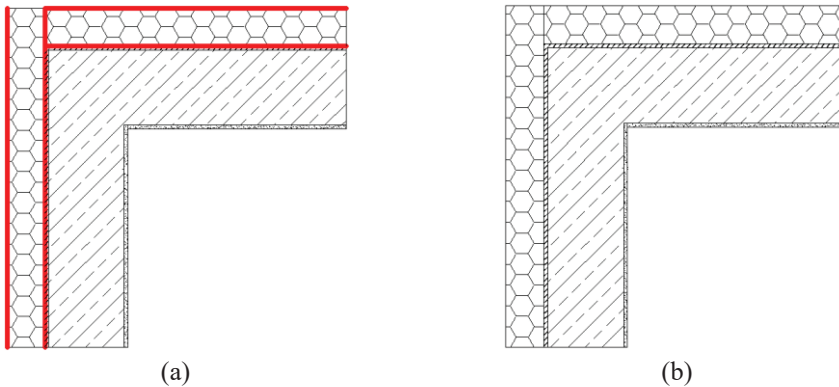
**33 pav.** Siena, apšiltinta PIR su nuimta aliuminio folijos danga sujungime tarp plokščių ir naudojant PU kljus sujungime

**34 pav.** Šilumos srautas per sienos kampa, apšiltintą aliuminio folija dengta PIR šilumos izoliacija, be aliuminio folijos dangos ir su PU kljais plokščių sujungime

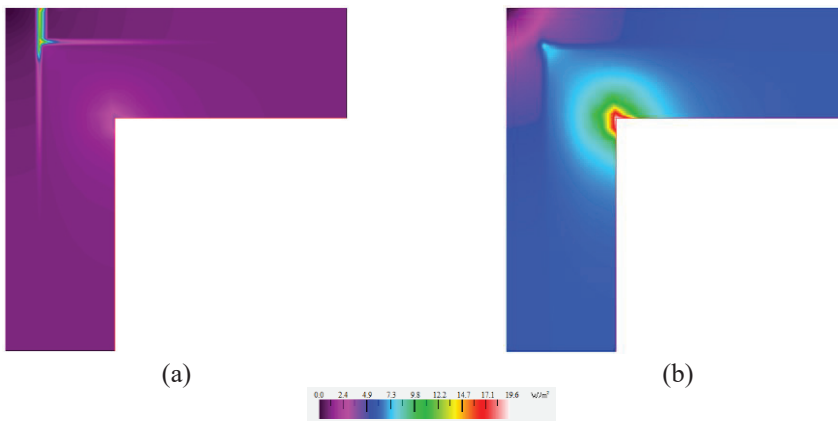
Kita modeliuojama sienos kampo konstrukcija buvo apšiltinta PIR su nuimta aliuminio folijos danga sujungime tarp PIR plokščių ir naudojant PU kljus šiame sujungime (33 pav.). Šios konstrukcijos šilumos srautas yra pateiktas 34 pav. Šią konstrukciją galima palyginti su konstrukcija, pateikta 31 pav., nes pastaroji

konstrukcija buvo apšiltinta PIR be jokių dangų ir su PU kliais plokščių susijungimo vietoje. Šilumos srauto skirtumas tarp šių dviejų konstrukcijų buvo  $\Delta\Phi = 0,088 \text{ W/m}$  ir gali būti vertinamas kaip turintis mažai reikšmės.

Kadangi PIR plokščių sujungime PU kliai dažnai nenaudojami, buvo apsvarstyta situacija, kai PIR plokščių sujungime esanti aliuminio folijos danga liečiasi su abiejų gretimų PIR plokščių aliuminio folijos dangomis išoriniuose ir vidiniuose paviršiuose (35 pav.). Palyginimui buvo atliktas dar vienas modeliavimas, kai PIR plokštės yra be dangų ir be PU klijų sujungime.



**35 pav.** Siena apšiltinta PIR: a) su aliuminio folija, be PU klijų sujungime; b) be dangų ir be PU klijų sujungime

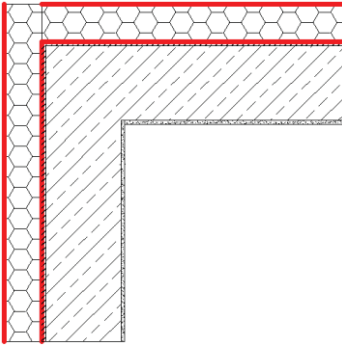


**36 pav.** Šilumos srautas per sienos kampą, apšiltintą: a) aliuminio folija padengtu PIR, be PU klijų sujungime; b) PIR be dangų ir be PU klijų sujungime

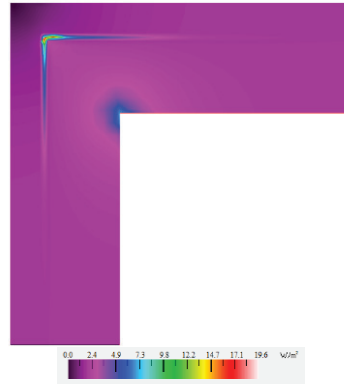
Skaitinio modeliavimo rezultatai pateikti 36 pav. Apskaičiuotas sienos, apšiltintos aliuminio folija dengta PIR šilumos izoliacija (36a pav.), kampo ilginis šiluminis tiltelis, kurio vertė  $\Psi = -0,005 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ir sienos, apšiltintos PIR šilumos izoliacija be dangų (36b pav.), kampo ilginis šiluminis tiltelis, kurio vertė  $\Psi = -0,041 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Kaip galima pastebėti, apskaičiuojant sienos kampo, apšiltinto PIR su bet kuria danga, išskyrus aliuminio foliją, ilginį šiluminį tiltelį, PU kliai dviejų plokščių kampinėje jungtyje gali būti nevertinami. Šilumos srauto skirtumas tarp šių dviejų

variantų buvo  $\Delta\Phi = 0,72 \text{ W/m}$ , o tai reiškia, kad nenaudojant PU klijų jungtyje, šilumos srautas per sienos kampos konstrukcijas padidėjo.

Norint sumažinti šilumos srautą į išorę, didėjantį per aliuminio folijos dangą ties PIR izoliacinių plokščių jungtimi, reikia pašalinti aliuminio folijos dangas ties šia jungtimi (37 pav.). Šios konstrukcijos šilumos srautas yra pateiktas 38 pav. Šiuo atveju ilginio šiluminio tiltelio vertė buvo  $\Psi = -0,037 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Tada šilumos srauto skirtumas tarp PIR šilumos izoliacijos su aliuminio folijos danga, pašalinta sujungime, ir PU klijais sujungime bei PIR šilumos izoliacija be dangų ir be PU klijų sujungime (36b pav.) apskaičiuojamas naudojant (20) lygtį, kuris lygus  $\Delta\Phi = 0,08 \text{ W/m}$ , arba 8,5 karto mažesnis nei konstrukcijos, pavaizduotos 36a pav.



**37 pav.** Siena, apšiltinta PIR su aliuminio folijos danga, su pašalinta aliuminio folijos danga ir be PU klijų sujungime



**38 pav.** Šilumos srautas per sienos kampa, apšiltintą aliuminio folija dengtu PIR, su pašalinta aliuminio folijos danga ir be PU klijų sujungime

## 9 lentelė. Skaičiavimų rezultatai

Konstrukcijos tipas	$L_{2D}$	Ilginis šiluminis tiltelis, $\Psi$ , $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	$\Delta\Phi$ , $\text{W/m}$	
Sienos, apšiltintos PIR su skirtingomis dangomis, kampas su PU klijais sujungime tarp dviejų plokščių sienos kampe (30 pav.)	a) aliuminio folija	0,2834	-0,017	
	b) daugiasluoksnė aliuminizuota danga	0,2592		
	c) kompozitinė popierinė danga	0,2590	-0,041	0,001
	d) plastikinė danga	0,2592		0,484
Sienos, apšiltintos PIR be jokių dangų, kampas su PU klijais sujungime tarp dviejų plokščių sienos kampe (32 pav.)	0,2592	-0,041		
Sienos, apšiltintos PIR su aliuminio folijos danga, kampas be dangų ir su PU klijais sujungime tarp dviejų plokščių sienos kampe (34 pav.)	0,2636	-0,036	0,088	
Sienos, apšiltintos PIR su aliuminio folijos danga, kampas su danga ir be PU klijų sujungime tarp dviejų plokščių sienos kampe (36a pav.)	0,2948	-0,005	0,72	
Sienos, apšiltintos PIR be dangų, kampas be dangos ir be PU klijų sujungime tarp dviejų plokščių sienos kampe (36b pav.)	0,2588	-0,041		
Sienos, apšiltintos PIR su aliuminio folijos danga, be dangų ir be PU klijų sujungime tarp dviejų plokščių sienos kampe (38 pav.)	0,2628	-0,037	0,08	

### 3.6.2. Šilumos perdavimo per bandinius su intarpais eksperimentinio matavimo rezultatai

Vientisų PIR bandinių su aliuminio folijos danga ir daugiasluoksne aliuminizuota danga bei tų pačių bandinių su pasuktu intarpu, kai dalis dangų buvo išdėstyta lygiagrečiai šilumos srautui, tokiu būdu sukuriant ilginį šiluminį tiltelį, eksperimentinių matavimų rezultatai yra apibendrinti 10 lentelėje.

10 lentelėje galima pastebėti, kad šiluminės varžos buvo gana panašios tiek PIR bandinių su aliuminio folija, tiek daugiasluoksniomis aliuminizuotomis dangomis. Bandinio su aliuminio folija šiluminė varža buvo šiek tiek didesnė, nes aliuminis yra labiau laidus šilumai, todėl įvyko intensyvesnis šilumos plitimas statmenai šilumos srautui, dėl ko susidarė šoniniai šilumos nuostoliai ir sumažėjo matavimo tikslumas. Vis dėlto, šis matavimas buvo lyginamasis ir gautas šiluminės varžos skirtumas bandymo rezultatui reikšmingos įtakos neturėjo.

**10 lentelė.** Eksperimentinių matavimų rezultatai

Dangos tipas	Bandinio tipas	$R$ , ( $m^2 \cdot K$ )/W	$d$ , m	$\lambda$ , W/( $m \cdot K$ )	$A$ , $m^2$	$l$ , m	$\varphi$ , W/( $m \cdot K$ )	$\Delta\Phi$ , W/m
Aluminio folijos danga	Vientisas bandinys	3,69	0,101	0,027	0,064	0,254	0,035	0,70
	Bandinys su pasuktu intarpu	1,83		0,055				
Daugiasluoksniė aliuminizuota danga	Vientisas bandinys	3,50	0,102	0,029	0,064	0,254	0,019	0,38
	Bandinys su pasuktu intarpu	2,32		0,044				

Išmatuotos bandinių su pasuktais intarpais ekvivalentinės šiluminės varžos, t. y. su suformuotais ilginiais šiluminiais tilteliais iš skirtingų dangų, skyrėsi vienas nuo kito ir nuo vientisų bandinių. Išmatuota aliuminio folijos dangą turinčių bandinių šiluminė varža buvo maždaug du kartus didesnė už tų pačių bandinių, su suformuotu ilginiu šiluminiu tilteliu, ekvivalentinę šiluminę varžą, o šiluminių varžų skirtumas tarp bandinių su daugiasluoksne aliuminizuota danga buvo maždaug 33 %.

Ekvivalentinė bandinio su ilginiu šiluminiu tilteliu, suformuotu iš aliuminio folijos dangos, šiluminė varža buvo maždaug 20 % mažesnė nei tų bandinių, kurių intarpai pagaminti iš daugiasluoksniės aliuminizuotos dangos. Lyginant abiejų bandinių ilginių šiluminių tiltelių šilumos perdavimo vertes, galima pastebėti, kad aliuminio folijos dangos atveju ši vertė beveik padvigubėjo.

Apibendrinant skaitinio modeliavimo ir eksperimentinio matavimo rezultatus galima teigti, kad PU klijų sluoksnis, naudojamas sujungiant dvi PIR šilumos izoliacines plokštes su aliuminio danga, veikė dviem būdais: dėl jų įtakos padidėjo šilumos perdavimas per jungtį, nes PU klijų šiluminis laidumas buvo didesnis nei PIR šerdis, ir, kita vertus, PU klijai neleido vienos šilumos izoliacijos plokštės dangai susijungti su kitos šilumos izoliacinės plokštės vidinių ir išorinių paviršių dangomis, taip sumažinant bendrąjį šilumos perdavimą per sienos kampo jungtį.

### 3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Didžiausias PIR gaminių šiluminio laidumo padidėjimas (iki 15 %) nustatytas bandiniams, laikomiems aukštoje temperatūroje (iki +70 °C), kai sukuriama sąlyga intensyviai putinimo dujų difuzijai. Šiluminio laidumo pokyčiai yra mažesni bandiniams su gamyklinėmis difuzijai nepralaidžiomis dangomis, o didesni – ploniems bandiniams ir bandiniams, išpjautiems iš gaminio šerdies.

2. Pašalinus dangas šiluminis laidumas padidėja daugiau kaip 8 %, kai bandiniai veikiami aukštos temperatūros, lyginant su bandiniais su difuzijai nepralaidžiomis dangomis. Vėlesnis difuzijai atsparios plėvelės užklėjimas ant bandinių šonų neturi įtakos bandinių šiluminio laidumo pokyčiams po sendinimo.

3. PIR gaminių šiluminio laidumo matavimo šilumos srauto matuokliais tikslumas priklauso nuo vidutinio bandinio ir matavimo prietaiso aplinkos temperatūrų skirtumo. Dėl labai mažo medžiagos šiluminio laidumo matavimo metu susikuria mažas šilumos srautas, kuris gali būti iškreiptas dėl šoninių šilumos mainų tarp aplinkos, bandinio ir matavimo plokščių. Aplinkos temperatūros įtaka medžiagos šiluminio laidumo matavimui pašalinama, nustatant bandinių šiluminį laidumą KD su papildomais 1 arba 2 šilumos srauto jutikliais. Pastebėta, kad matuojant šiluminį laidumą KD metodu, matavimo tikslumą galima padidinti iki 5 %, lyginant su šilumos srauto matuoklio metodu.

4. Sienų, apšiltintų PIR šilumos izoliacinėmis plokštėmis su kitomis nei aliuminio folija dangomis, kampų sujungimų skaitinis modeliavimas parodė, jog šių dangų įtakos šilumos perdavimui per sienų kampų sujungimus galima nevertinti. Šilumos srautas per bandomosios sienos kampinę jungtį su šiomis dangomis neviršijo 0,001 W, todėl negalėjo reikšmingai padidinti pastato šilumos nuostolių.

5. Sienos kampo konstrukcijos sujungime su PU klijuais, ilginio šiluminio tiltelio savitieji šilumos nuostoliai  $L_{2D}$  buvo 0,2834 W/(m·K), o sienos kampo konstrukcijos sujungime be PU klijų – 0,2948 W/(m·K). Tai reiškia, jog PIR šilumos izoliacinių plokščių paviršius, šilumos srautui per jungtį padidės apie 0,23 W/m sienos kampo jungties aukščio.

## 4. IŠVADOS

1. PIR gaminių naudojimas neigiamos temperatūros aplinkoje nepakeičia jų šiluminio laidumo, išmatuoto standartinėmis sąlygomis, tačiau žemoje vidutinėje temperatūroje išmatuotų bandinių šiluminis laidumas gali padidėti iki 20 % dėl putinimo dujų būsenos pokyčio: esant žemai temperatūrai dujos kondensuojasi, mažėja atstumas tarp molekulių, jos sudaro junginius, kurie padidina šilumos perdavimą tarp medžiagos porų paviršių.

2. Didžiausias PIR gaminių šiluminio laidumo padidėjimas (~15 %) nustatytas po jų kondicionavimo +70 °C temperatūroje, kai sukuriama sąlyga intensyviai putinimo dujų difuzijai. Mažiausiai pakito bandinių su gamyklinėmis dangomis šiluminis laidumas, o daugiausiai – plonų bandinių.

3. Standartinė PIR šiluminio laidumo deklaruojamosios vertės nustatymo metodika, kai bandinys išpjaujamas iš gaminio šerdies, neatitinka gaminių su difuzijai nelaidžiomis dangomis naudojimo sąlygų ir turi būti koreguojama,



atsisakant išpjauto bandinio iš gaminio šerdies matavimo ir parenkant trumpesnę bandinių su dangomis sendinimo terminą. Aukštos temperatūros aplinkoje sendintų bandinių, pašalinus jų dangas, šiluminis laidumas pakinta daugiau kaip 8 %, lyginant su gamyklinėmis dangomis padengtais bandiniais. Vėliau ant atvirų bandinio šonų užkljuotos difuzijai nelaidžios plėvelės nesumažina šiluminio laidumo pokyčių po sendinimo, nes jos nesudaro tokio barjero putinimo dujų difuzijai kaip gamyklinės dangos.

4. Atlikus sienų kampinių sujungimų, apšiltintų PIR šilumos izoliacija su susisiekiančia aliuminio danga, skaitinį modeliavimą ir eksperimentinius matavimus nustatyta, kad šilumos srauto padidėjimas per sienų, kurių  $U$  vertė  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , jungtį, lyginant su ištisine PIR izoliacija, sudaro  $0,72 \text{ W}/\text{m}$  sienos aukščio, dėl to vidutinio dydžio (iki  $150 \text{ m}^2$ ) vienos šeimos būsto šilumos nuostoliai padidėja  $30\text{--}40 \text{ kWh}$  per metus.

5. PIR gaminių šiluminio laidumo matavimo šilumos srauto matuoklio metodu tikslumas priklauso nuo vidutinio bandinio ir matavimo prietaiso aplinkos temperatūrų skirtumo. Esant labai mažam medžiagos šiluminiam laidumui, matavimo metu sukuriamas mažas šilumos srautas, kuris gali būti iškreiptas dėl šoninių šilumos mainų tarp aplinkos, bandinio ir matavimo plokščių. Matuojant bandinių šiluminį laidumą KD su papildomais 1 arba 2 šilumos srauto jutikliais, matavimo tikslumą galima padidinti iki 5 %, lyginant su šilumos srauto matuoklio metodu.

6. Šio tyrimo rezultatai rodo, kad PIR pokyčiai yra žymiai mažesni nei aprašyti ankstesnių tyrimų rezultatuose. Mažėjančią temperatūros poveikį PIR produktų šiluminiam laidumui galima paaiškinti nuolatiniu medžiagos tobulinimu: mažinant porų dydį, didinant uždarų porų skaičių toliau skaidomas dujų tūris, todėl mažėja putinimo dujų kondensacijos poveikis šilumos perdavimui tarp porų paviršių ir per visą bandinį.

7. Skaičiuojant pastato šilumos nuostolius šalčiausiais metų mėnesiais, rekomenduojama naudoti patikslintą vertę, t. y.  $0,002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  mažesnę šiluminį laidumą, kuris duotų iki 8 % mažesnius šilumos nuostolius per atitvaros termoizoliacinį sluoksnį. Skaičiuojant energijos nuostolius šaldytuvų paskirties pastatuose, gali būti naudojama  $0,002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  didesnė vertė už deklaruojamą PIR gaminių šilumos laidumo koeficientą; tokiu būdu sumažėtų numatomos metinės energijos sąnaudos šaldymui, tačiau tai neturėtų reikšmingos įtakos realiam energijos suvartojimui, nes žemos lauko temperatūros periodais šilumos srautas per šaldytuvų paskirties pastatų atitvaras į aplinką yra žymiai mažesnis.

## 5. SUMMARY

### 5.1. Preface

#### Relevance of the work

Thermal insulation materials installed in the envelope of the building is exposed to various levels of temperature and humidity, therefore, their thermal properties differ from those measured under standard laboratory conditions. The thermal conductivity of most building materials decreases at low temperatures, and it increases when the temperature rises, but this aspect is rarely considered in the design of buildings, although it would be practical to estimate this to predict the energy consumption of heating more accurately. This is not difficult for air-filled thermal insulation materials, as the results of many studies show close linear relationship between the thermal conductivity of the materials and the operating ambient temperature. To reduce the thermal conductivity of the thermal insulation materials, in closed-cell materials, usually, foamed polymeric materials, the cells are filled with mixtures of various gases. Predicting changes in the thermal properties of these materials in different temperature and humidity operating environments becomes difficult because there is no linear relationship between the thermal conductivity of the gas and the ambient temperature, and the composition of the gas mixture itself changes continuously in the course of operation. One of the most effective thermal insulation materials in this group is polyurethane foam (PUR/PIR), which is currently often used as building insulation. Polyurethane foam is a rigid material of closed cells which are filled with a mixture of low thermal conductivity gases that mainly affects the thermal conductivity of the material. These materials are used in buildings across a very wide range of temperature environments: from roof insulation, where the material can heat up to + 70 °C, to the insulation of refrigeration buildings, where this material is operated at -25 °C. Such operating conditions differ significantly from the conditions for determining the properties of standard materials, and, therefore, the performance of materials may differ significantly from those determined under standard environmental conditions. PIR boards are new products compared to many traditional thermal insulation materials, so the methods for determining their properties are not yet sufficiently reliable, and measurement errors can be caused by the technical characteristics of the measuring instruments and specimens, and also by specimen preparation procedures. These circumstances may affect the accuracy of the assessment of the thermal properties of building envelopes, which is closely related to the more efficient use of energy and building materials. Therefore, studies of performance of thermal insulation materials with a gas mixture filler in closed cells are a relevant task of building thermal physics and materials engineering.

#### Work objective

The aim of this work is to investigate the regularities of determination, evaluation and change of the thermal properties of rigid polyisocyanurate (PIR) foam under different operating conditions.

## **Work tasks**

In order to achieve the aim of this work, the following tasks were set:

1. To perform analysis of the dependence of the thermal conductivity of rigid polyisocyanurate (PIR) foam on the performance parameters and aging processes.
2. To investigate the dependence of thermal conductivity of fresh and aged PIR products on ambient temperature and the duration of its effects under laboratory conditions.
3. To analyse the effect of protective facings on the properties of this thermal insulation material and the aging process.
4. To investigate heat transfer through corner joints of PIR-insulated building structures.
5. To experimentally investigate the effect of geometrical characteristics of PIR specimens and the measuring environment on the reliability of their thermal conductivity determination.
6. To prepare recommendations for the determination of thermal conductivity of PIR products and the use of thermal properties so that to predict the heat loss through partitions of buildings insulated with these products in the nordic climatic conditions.

## **Scientific novelty of the work**

1. The influence of the environment and its aging temperatures on the thermal conductivity of PIR products in the presence of various combinations of technical characteristics of protective facings has been experimentally determined.
2. The influence of thin facings on heat transfer through corner joints of structures insulated with PIR panels has been systematically investigated.

## **Practical value of the work**

1. The standard procedure for determining the declared thermal conductivity of rigid polyisocyanurate (PIR) foams when the specimen is cut from the core of the central part of the product has not been found to comply with the conditions for use with diffusion-tight facings and must be corrected according to the guidelines.
2. It indicates that the later (non-factory-made) application of a diffusion-proof film on the surfaces of aging PIR products prevents as intended any changes of the thermal conductivity of the material.
3. The design of partitions for refrigeration buildings with PIR products for insulation shall consider an increase in the heat loss of up to 20% compared to the heat loss calculated by the standard methods.

## **Defensive statements of the dissertation**

1. The thermal conductivity of PIR products measured under standard conditions remains unchanged after aging of the specimens in a negative temperature ( $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) environment, while the thermal conductivity of specimens measured in a low medium temperature ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) environment increases significantly compared to those measured under standard conditions.

2. The technical characteristics and method of the fixing of protective facings for PIR products shall be assessed by measuring the thermal conductivity of these products and calculating the heat transfer through the corner joints of PIR-insulated building structures.

## 5.2. Literature review

The construction sector makes up for almost 40% of the global energy consumption, and is therefore responsible for relatively high emissions (Rasooli, Itard and Ferreira, 2016). In order to upgrade the energy efficiency of buildings, it is necessary to decrease the heat loss through the building envelope by insulating it with thermal insulation materials, and the most important feature is thermal conductivity which defines the heat transfer and thermal resistance of the partition; it sets forth the design requirements for partitions in most building regulations. The thermal conductivity of building materials varies depending on temperature and humidity (Pérez-Bella *et al.*, 2015).

Recently, the use of rigid polyurethane-polyisocyanurate foam (PUR/PIR) in construction has increased particularly due to its good mechanical properties and lower thermal conductivity (Jin *et al.*, 2014). The highest amount of PUR/PIR is produced in the form of panels – faced boards are widely used in construction as roof or wall thermal insulation (Feldman, 2010). They can also be used for frozen food storage, refrigerators, fuel pipelines, liquefied petroleum gas transportation pipelines, etc. (Kurańska *et al.*, 2013). PUR/PIR is one of the most effective thermal insulation materials because exceptionally low thermal conductivity blowing gases are ‘locked’ in closed-cell foam structures (Zhang *et al.*, 2017). PIR is used where fire resistance is required, it has a heat-resistant structure (Okuzono *et al.*, 2001), and this foam can be used across the broad temperature range from -80 to +120 °C. PUR/PIR typical thermal conductivity values are 0.02–0.03 W/m·K, and its density ranges from 30 to 100 kg/m<sup>3</sup>, whereas compressive strength is in between 10–150 kPa.

Researchers (Kirpluks *et al.*, 2014; Tseng, Yamaguchi, and Ohmori, 1997) suggested that the total effective thermal conductivity  $\lambda^*$  of a porous foam should be considered regarding the following contributions: thermal conductivity through solids,  $\lambda_p$ , thermal conductivity through gas,  $\lambda_g$ , thermal convection in cells,  $\lambda_c$ , and thermal radiation through cell walls and through the cells themselves,  $\lambda_r$ .

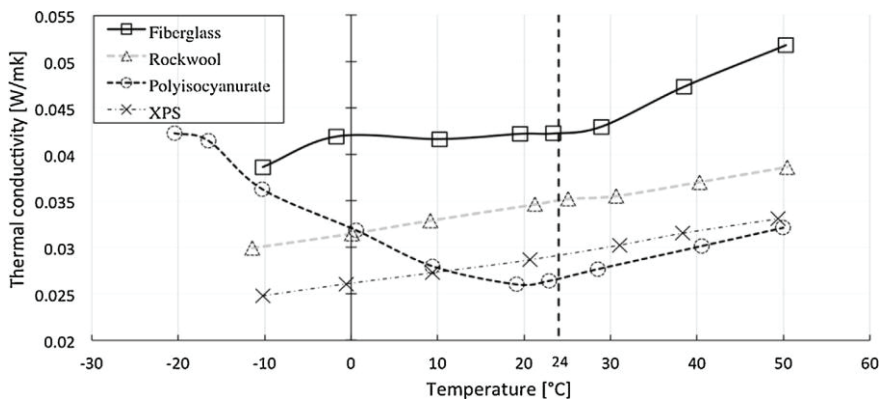
$$\lambda = \lambda_p + \lambda_g + \lambda_c + \lambda_r. \quad (1)$$

In porous foams, such as PIR, heat is transferred through a solid by conductivity, and through cells by radiation, conductivity, and convection. The heat transfer by convection through the porous foam is negligible, i.e.,  $\lambda_c = 0$  (Jarfelt, Ramnäs, 2006; Lorenzetti *et al.*, 2015; Wang, Foster, 2017; Wu, Sung, and Chu, 1999).

Nowadays, hydrocarbon blowing gases, such as *n*-pentane or cyclopentane, are commonly used in PIR boards (Berardi, Madzarevic, 2020). Over time, the thermal properties of polymeric insulating materials deteriorate as nitrogen and oxygen in the air penetrate the cells thereby expelling the blowing gas from them (Choi, Kang,

& Huh, 2017), and the so-called aging occurs. Berardi and Madzarevic (2020) observed that the thermal conductivity of polyurethane (PUR) foam is steadier with the operating temperature, while polyisocyanurate (PIR) is more sensitive to the changing environmental conditions and should be used in thicker and larger samples, and should be protected with a low permeability layer.

The thermal conductivity of most materials increases with the increasing temperature, so temperature-dependent thermal conductivity is considered to maintain linear dependence (Khoukhi *et al.*, 2016). PIR building insulation material behaves less regularly at different temperatures; their thermal conductivity dependence on temperature is not linear. It means that, when using the values of the constant thermal conductivity coefficient, the actual efficiency of the building partitions differs from the designed ones, which increases the energy consumption of the building, increases condensation problems, and reduces the comfort of the residents (Berardi, Naldi, 2017). Figure 1 shows how the thermal conductivity coefficients of different thermal insulation materials vary with temperature.



**Figure 1.** Temperature dependence of thermal conductivity of thermal insulation materials (Berardi, Naldi, 2017)

Thermal insulation properties vary greatly between low and high temperatures, which means that the heat loss or heat inflows in a building are not always predictable by using standard calculation methods (Schumacher *et al.*, 2016). When the temperature drops below the condensation point of the blowing gas, condensate forms in the pores, and the value of the thermal conductivity coefficient increases due to the greater conductivity of the liquid phase of the blowing agent compared to its gaseous phase (Berardi *et al.*, 2018; Cai, Cremashi, and Ghajar, 2014). The transition of the blowing gas from a condensed liquid to a gaseous state depends on the temperature acting on them (Bogdan *et al.*, 2005).

PUR/PIR consists of cells of different sizes, depending on the specific composition of the foam and the manufacturing process. Cells typically form a tetrahedral group of struts connecting the thinner layers of the film which separates the cells from each other (Barrios, 2011). In the production of PIR, many tiny, closed cells are formed. Later, the blowing agent evaporates during the foaming reaction and fills these cells as a gas (Bogdan *et al.*, 2005).

Plastic and foil facing applied on PIR boards is important for the stabilization of the thermal resistance of the product, for slowing down the thermal drift, and for maintaining the intended thermal resistance (Macchi-Tejeda, Opatová, and Leducq, 2007; Mukhopadhyaya *et al.*, 2002). In order to preserve the original thermal properties of PIR, it is mandatory to keep these facings intact during the installation. In the building corners, the facings may be placed in the direction of the heat flow, which may increase heat transfer through the linear thermal bridges formed in the corner of the wall.

If we seek to construct a near zero energy building, the influence of linear thermal bridges on the building's energy demand becomes a significant factor, and previous studies have demonstrated that the influence of linear thermal bridges can reach up to 30% of the building's energy demand (Černeckienė *et al.*, 2020; Kuusk, Kurnitski and Kalamees, 2017). When the heat transfer coefficients of partitions are being calculated or linear thermal bridges are being modelled, the connections which cross the thermal insulation layer are always evaluated (Levinskytė *et al.*, 2019; Zalewski *et al.*, 2010), but the influence of the thermal insulation material facings is usually not taken into consideration. It is sometimes recommended to remove the facing at the joints, to connect products by gluing them, but in practice PIR is usually glued without removing its facings. Hence, the facing may act as a thermal bridge which needs to be further investigated.

### **5.3. Research methodology**

#### **Research concept**

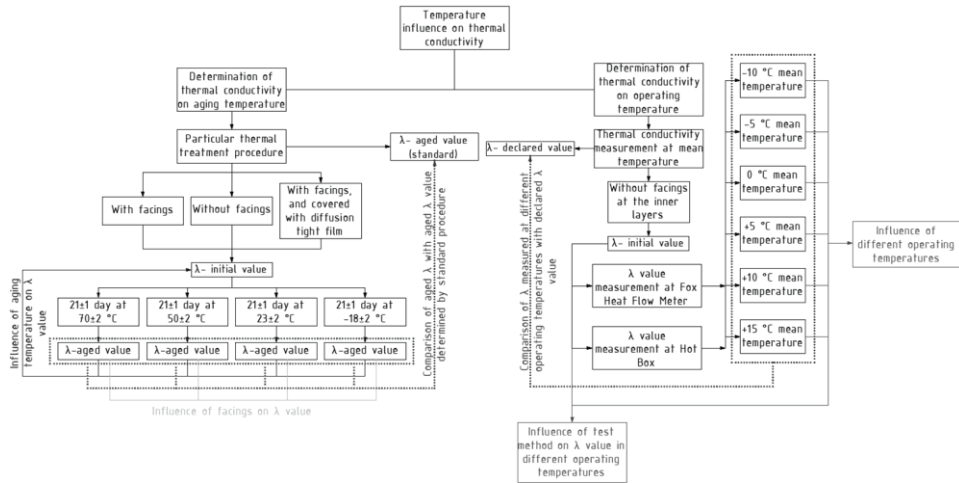
The determination of the impact of ambient temperature on the thermal conductivity of pentane blown polyisocyanurate is the first stage of the research. It was performed in two directions (Figure 2).

The first direction is the dependence of thermal conductivity, measured under standard conditions, on facings and conditioning at different temperatures. Three types of specimens had their thermal conductivity measured: specimens with factory-made facings, without facings, and with an applied diffusion-resistant film – before and after 21 days of storage at different temperature environment (-18 °C to +70 °C). Measurements were implemented under standard laboratory conditions, by generating a temperature difference of 20 K through the specimen, and thermal conductivity was determined at an average specimen temperature of +10 °C. In this study, the specimens were aged at full thickness to determine how the entire product ages at different temperatures and what effect the facings have on changes in thermal conductivity. The obtained values were compared with the thermal conductivity of products aged according to the standard procedure.

The second direction is the study of the dependence of thermal conductivity on the average temperature of the specimen measured during the test. Different temperatures of the air or heat flow meter plates in contact with the specimen surfaces were determined in the measuring instruments, according to which, the average temperature of the specimens was calculated, and values from -10 °C to +15 °C were obtained. Experiments were performed by using three measuring devices, thereby creating different possibilities for lateral heat loss during measurement. The

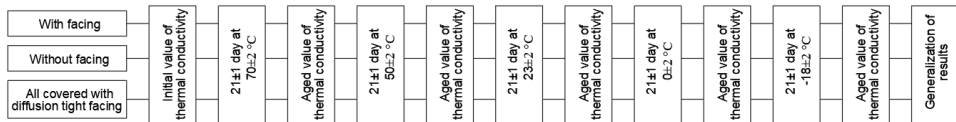


measured thermal conductivity was compared with the declared thermal conductivity. After summarizing the measurement results, the influence of ambient temperature on the thermal conductivity of PIR was defined.



**Figure 2.** Scheme of experimental research

The second stage of research is the procedure of continuous thermal aging (Figure 3). During this procedure, the specimens were stored at  $+70\pm 2$  °C for  $21\pm 1$  days. After this period, the specimens are conditioned for 16 hours at a temperature of  $+23\pm 3$  °C and a relative humidity of  $50\pm 10\%$ , the aged thermal conductivity values are then determined by using a heat flow meter. The measured value is compared with the value obtained from the standard measurement procedure. Subsequently, by using the same procedures, the specimens are conditioned for  $21\pm 1$  days at  $+50\pm 2$ ,  $+23\pm 2$ ,  $0\pm 2$  and  $-18\pm 2$  °C, and their thermal conductivity is measured after each step.

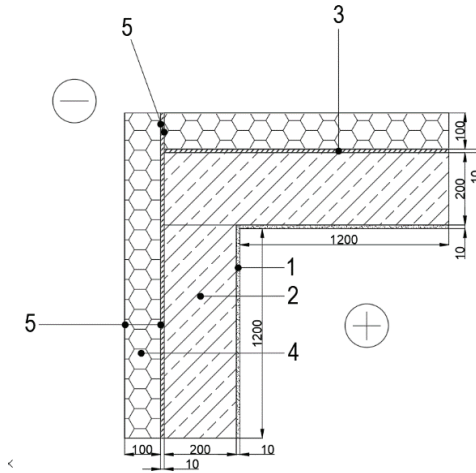


**Figure 3.** Algorithm for continuous thermal aging tests

The third stage of our research is the study of the influence of various PIR facings on heat transfer through building partitions. A study was conducted to evaluate the extent to which facings can affect heat transfer through partitions, especially when the facing is made of aluminium foil. No studies have been found to elucidate the effect of PIR facings on heat loss, but very similar studies have been performed with vacuum insulation panels (Schwab *et al.*, 2005; Tenpierik, Auberge, 2007; Tenpierik, Van der Spoel, and Cauberg, 2008). The results of the experimental measurements shall be compared with the results of the numerical modelling, therefore, the construction of a ventilated wall used for numerical modelling is



shown in Figure 4. The value of the heat transfer coefficient of this wall was chosen in accordance with the recommendations of the European Insulation Manufacturers Association (2020) and the requirements of near zero energy buildings in the northern climate. The  $U$ -value of the wall for this study was calculated according to LST EN ISO 6946:2017. The thicknesses and thermal properties of the components making up the structure are given in Table 1.



**Figure 4.** Wall corner fragment: 1 – plaster, 2 – aerated concrete block masonry, 3 – PU adhesive, 4 – PIR thermal insulation, 5 – PIR facing (see Table 1) (all dimensions are given in millimetres)

The influence of studs and fasteners on the modelled wall fragment was not evaluated as it is a comparative study; therefore, the results do not depend on the evaluation of studs and fasteners as the influence of these elements would be the same in all cases. Computer software *THERM 7*, which complies with the standard LST EN ISO 10211:2017, was used to model the heat transfer through the corner joints of the building. Boundary conditions  $\theta_{int} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\theta_e = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and surface thermal resistances  $R_{si} = 0.13\text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  and  $R_{se} = 0.04\text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  were chosen for this numerical modelling. The heat transfer coefficient of the linear thermal bridge of the simulated building wall corners insulated with PIR panels was compared with the heat transfer coefficient of the linear thermal bridge of the same wall corner insulated with PIR without facings and PU adhesive.

**Table 1.** Materials of wall construction

No.	Material	Thickness, mm	Declared thermal conductivity $\lambda$ , W/(m·K)
1	Plaster	10	0.9
2	Aerated concrete block masonry	200	0.13
3	PU adhesive	$\leq 10$	0.04
4	PIR board with facing:	100	0.022
	a) aluminium foil	100 $\mu\text{m}$	211
	b) aluminized multilayer facing	155 $\mu\text{m}$	0.125
	c) multilayer paper facing	132 $\mu\text{m}$	0.066
	d) plastic facing	103 $\mu\text{m}$	0.125

A heat flow meter is used for experimental measurements to study the influence of various PIR facings on heat transfer. Although the heat flow meter apparatus was designed to determine the thermal resistance and thermal conductivity of a solid, according to Lorenzati *et al.* (2014), the equivalent thermal resistance  $R_e$  of composite specimens made of different thermal conductivity materials can also be determined. In this case, the mean difference in surface temperatures of the specimen was used to calculate the  $R_e$  value.

The heat transfer coefficient of the linear thermal bridge formed in the test specimen is described by the following equation:

$$\varphi = \frac{(U_e - U) \cdot A}{2l} = \frac{A \cdot \left(\frac{\lambda_e - \lambda}{d}\right)}{2l} = \frac{A}{d} \cdot (\lambda_e - \lambda) = \frac{A}{d \cdot 2l} \cdot (\lambda_e - \lambda), \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (2)$$

where:  $l$  – the length of the linear thermal bridge formed in the specimen, equal to the length of the measuring area of the heat flow meter,  $l = 0.254$  m;  $A$  – measuring area,  $\text{m}^2$ ;  $\lambda$  – thermal conductivity of a single specimen,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_e$  – equivalent thermal conductivity of the specimen with the insert,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

An increase in heat flux density through 1 m of PIR joint with facings  $\Delta\Phi$ ,  $\text{W}/\text{m}$ , is calculated according to the formula:

$$\Delta\Phi = \varphi \cdot \Delta\theta, \text{ W}/\text{m} \quad (3)$$

### Measuring instruments used in the research

Three measuring devices were used to measure the thermal conductivity of the investigated products. The *FOX 314* heat flow meter (developed by *TA Instruments*, USA) is made of two panels with heat flow meters and temperature sensors placed above and below the specimen. The heat flow meter *FOX 600* was used to measure the thermal conductivity of the specimens at different average temperatures. The ‘Hot-box’ was used to study the dependence of the thermal conductivity of PIR on the average specimen temperature. ‘Hot-boxes’ are widely used for thermal testing of building components, usually with larger dimensions than a heat flow meter (Asdrubali and Baldinelli, 2011). The ‘Hot-box’ consists of two closed chambers which maintain a constant, individual temperature and air velocity. The chambers are separated by the test specimen or the partition in which the specimen is placed. For the calculation of the total thermal resistance of the specimen, a stabilized heat flow between the two rooms at a stable temperature is used, calculated as the energy supplied to the measuring chamber. When knowing the thickness of the specimen of homogeneous material and the ambient conditions, its thermal conductivity is calculated. A heat flow sensor *PU 4.3* (TPD TND-TH) mounted on the warm side of the specimen, where the air temperature is about  $+20$  °C, was used to measure the heat flow through the specimen. The heat flow sensor has a diameter of 100 mm and a thickness of 3 mm; calibration value –  $6.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{mV})$  (accuracy 5%); temperature correction  $+0.04\%/K$ ; thermal conductivity –  $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . The technical characteristics of the measuring instruments are given in Table 2. Prior to measuring thermal conductivity, all specimens were conditioned at a controlled temperature and relative humidity climate chamber at  $+23 \pm 3$  °C and  $50 \pm 10\%$  relative humidity.

**Table 2.** Technical characteristics of measuring instruments

Technical characteristics	Measuring instrument		
	FOX 314	FOX 600	'Hot-box'
Dimensions of heat flow meter plates	305 × 305 mm	610 × 610 mm	3000 x 3000 mm
Heat flow meter measuring area	100 × 100 mm	254 × 254 mm	2400 × 2400 mm
Thickness of the guard	30 mm	50 mm	206 mm
Thermal resistance of the guard	0.96 (m <sup>2</sup> ·K)/W	1.6 (m <sup>2</sup> ·K)/W	5.86 (m <sup>2</sup> ·K)/W
Accuracy of temperature control	±0.01 °C	±0.01 °C	+0.04 %/K
Absolute thermal conductivity accuracy	up to ±2%	up to ±1%	5%

### Specimens prepared for the research

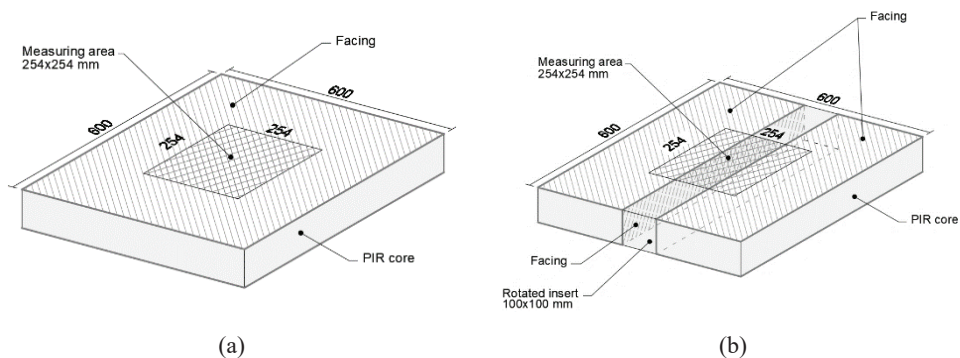
For the experimental studies mentioned above, pentane blown PIR boards with aluminized multilayer facing were obtained from the manufacturer. To study the dependence of PIR thermal conductivity on facings and their effects in different temperature environments, 30 mm and 50 mm thick specimens, 305 × 305 mm in size were prepared (see Table 3). Same specimens were prepared for continuous thermal aging as well. Specimens of each thickness were cut from products featuring three different production dates. Three types of specimens were used for each production date: with a factory-made aluminized multilayer facing; covered with a diffusion-tight film; and without facings.

**Table 3.** Different thicknesses used for certain research stage

Research stage	Research stage direction	Apparatus used	Specimen thickness, mm			
			30	50	100	150
I stage	Determination of thermal conductivity on aging temperature	<i>FOX 314</i>	x	x		
	Determination of thermal conductivity on operating temperature	<i>FOX 600</i>	x			
		'Hot-box'				x
II stage	Continuous thermal aging	<i>FOX 314</i>	x	x		
III stage	Determination of influence of various PIR facings on heat transfer through building partitions	Numerical simulation and <i>FOX 600</i>				x

For the initial measurements of PIR thermal conductivity at different temperature environments, 30 mm thick specimens with factory-made facings were used to determine the various lower and upper temperatures of the heat flow meter plates with a difference of 10 K. Then, 5 specimens with a thickness of 30 mm and dimensions of 600 × 600 mm were prepared and formed into a single 150 mm thick specimen for measurement in a 'hot-box' (see Table 3). During the measurement, the specimens were placed on top of each other, and the specimen facings of the

inner layers were removed to create good contact between the individual specimens. In this experiment, the edges of each board were limited by a specimen frame of the same temperature, thus eliminating the possibility of lateral heat loss.



**Figure 5.** Specimens with marked measuring area: (a) solid specimen, (b) specimen with a rotated insert (all dimensions given in millimetres)

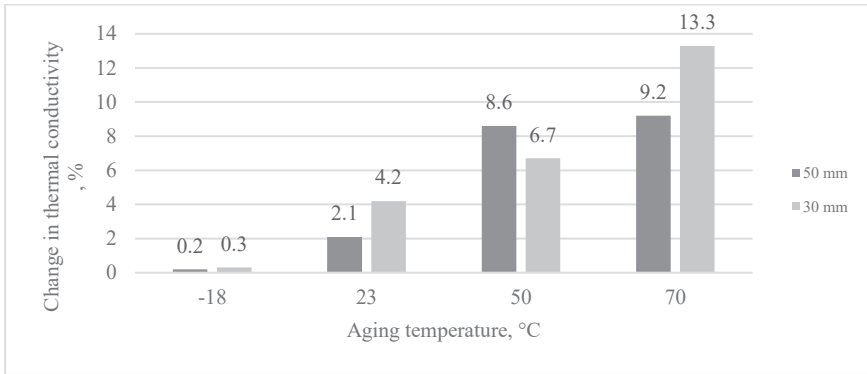
Specimens for the experimental measurement of the effect of different PIR facings on heat transfer through building envelopes were made of two 100 mm thick PIR panels with an aluminium foil facing and a multilayer aluminized facing (see Table 3). PIR boards with factory-made facings were used for the initial measurement of the  $R$ -value. A  $100 \times 100$  mm wide strip with facings was then cut from the central part of the plate and rotated  $90^\circ$  so that the facings on this strip were perpendicular to the surface facings of the whole specimen (Figure 5). Thus, in the new specimen, the facings coincided with the direction of the heat flow, thus forming a linear thermal bridge.

#### 5.4. Research results

##### Thermal conductivity of PIR products after aging at different temperatures

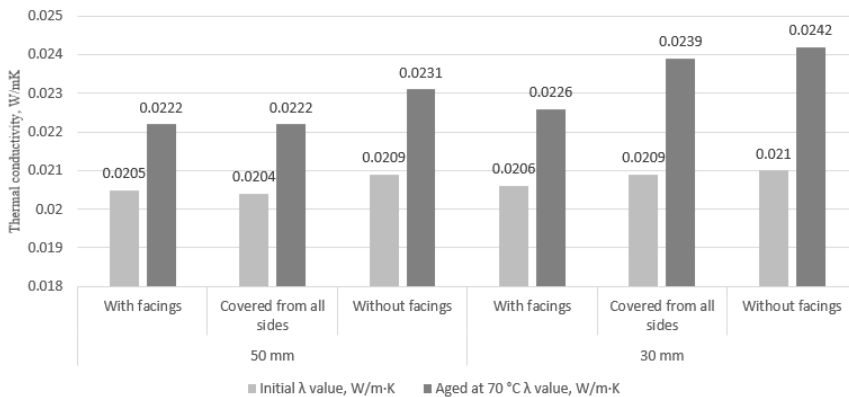
The thermal conductivity values of the three types of specimens were averaged and presented as the percentage change for each aging temperature and specimen thickness (Figure 6). It was found that the increase in thermal conductivity was mainly influenced by the specimens stored at  $+70^\circ\text{C}$ : in 30 mm thick specimens this change was on average 13.3%, in 50 mm specimens, it was 9.2%. Significantly smaller changes in thermal conductivity were obtained by comparing the values of heat transfer coefficients of new and aged at  $+50^\circ\text{C}$  specimens. 30 mm value of 6.7% and 50 mm value of 8.6% were only slightly lower than after conditioning at  $+70^\circ\text{C}$ . The changes in the thermal properties of the specimens stored at  $+23^\circ\text{C}$  are even smaller: 4.2% for 30 mm and 2.1% for 50 mm. This indicates that diffusion of the blowing gas, which changes the gas composition in the material cells, occurs after the conditioning of the specimens at all temperatures used in this study, but significant changes in thermal conductivity occurred only when the specimens were stored at  $+70^\circ\text{C}$ . The changes in the thermal conductivity of the specimens stored at  $-18^\circ\text{C}$  were insignificant (0.2–0.3%). This indicates that at, negative temperatures,

the diffusion of the blowing gas takes place very slowly, and this does not change the composition of the gas to such an extent as to affect the changes in the value of thermal conductivity.



**Figure 6.** Percentage change in mean thermal conductivity after storage of specimens in various temperature environments

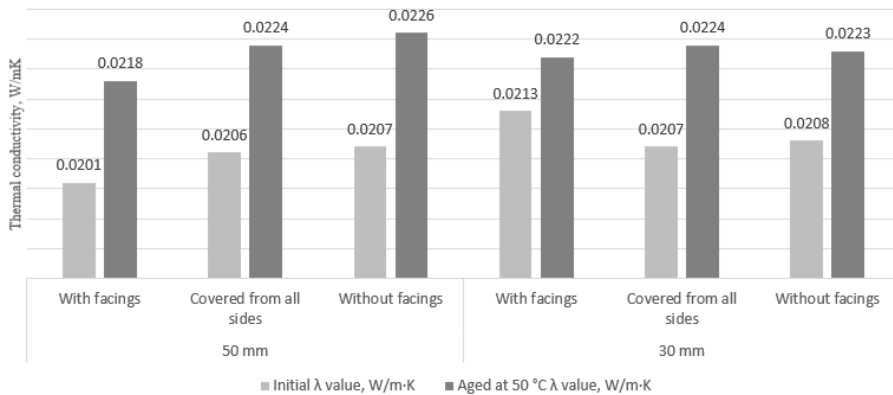
For both investigated thicknesses, an increase in the thermal conductivity of all types of specimens was recorded (Figure 7), which reached 8–10% for 50 mm thick specimens and 10–15% for 30 mm thick specimens. Thus, the thermal conductivity increased the most in the thinner specimens with removed facings – 15.2%. For thinner, covered, 30 mm thick specimens, the thermal conductivity increases almost as much as the specimens without facings. The thermal conductivity of the thicker, covered specimens increased slightly compared to the specimens with the factory-made facings and was lower than that of the specimens with the facings removed. This might suggest that the reduced gas diffusion intensity is dependent on the influence of the compacted surface layers.



**Figure 7.** Changes in thermal conductivity of specimens with different facings after aging at +70 °C

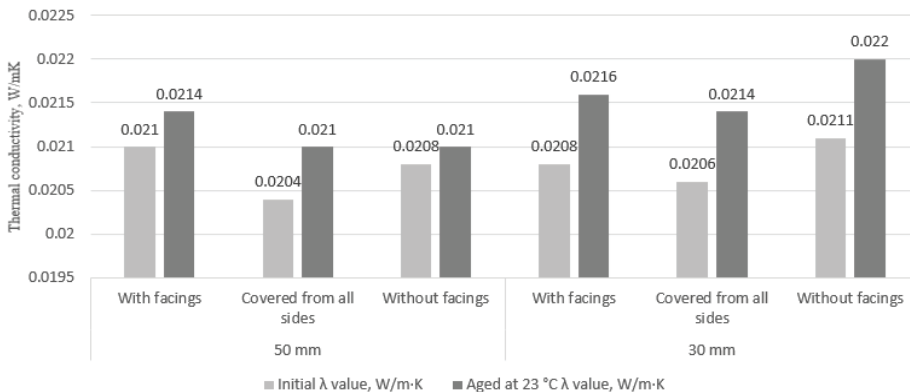
In the next stage of the study, the new specimens were aged at + 50 °C (Figure 8). In this case, the changes in thermal conductivity of the specimens were approximately the same, 8–9%, except for 30 mm with the factory-made facing,

which had a higher initial thermal conductivity level than the others.



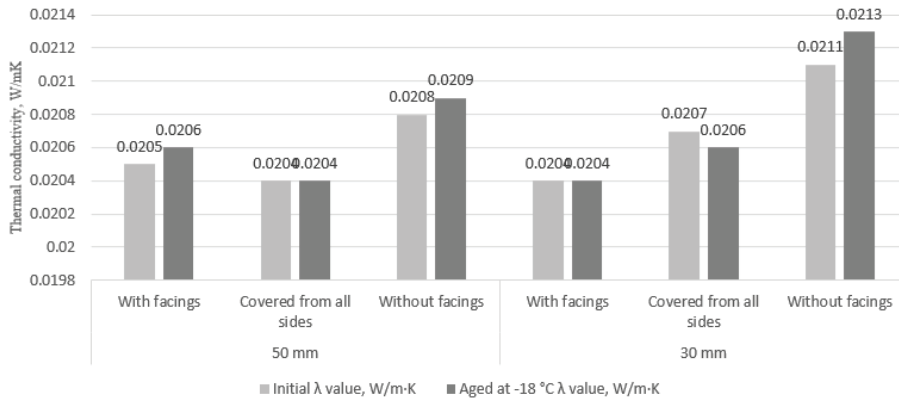
**Figure 8.** Changes in thermal conductivity of specimens with different facings after aging at +50 °C

The effect of +23 °C temperature is even smaller (Figure 9): for 50 mm specimens, it is only 1–3%, and, for 30 mm thick, it is 4%. The differences in the obtained thermal conductivity are likely to be more related to the structure of the specimens or their facings than to the effect of diffusion of the blowing gas.



**Figure 9.** Changes in thermal conductivity of specimens with different facings after aging at +23 °C

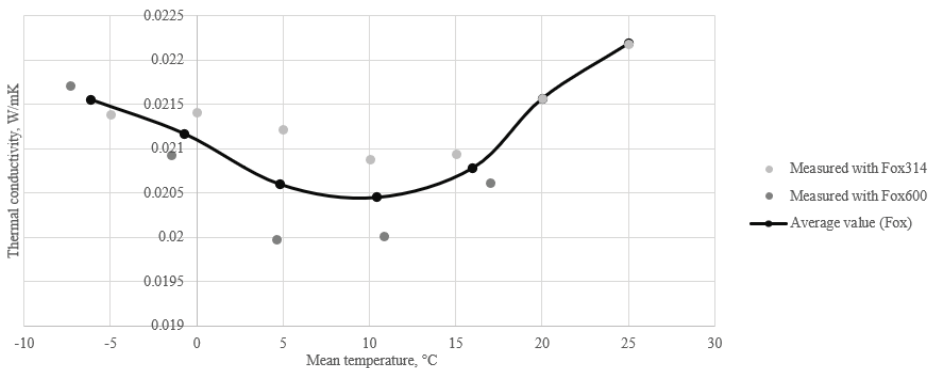
At -18 °C, neither the facing nor the negative temperature has virtually any effect on the changes in thermal conductivity. In all measured cases, the results differed from the initial thermal conductivity value by up to 1%, i.e., within the measurement error (Figure 10).



**Figure 10.** Changes in thermal conductivity of specimens with different facings after aging at -18 °C

### Thermal conductivity of PIR products at different operating temperatures

The measurement results show that the thermal conductivity of the tested insulating material is the lowest at a mean specimen temperature of +10 °C (Figure 11). The thermal conductivity increases as the mean specimen temperature decreases (change of 2.4% is observed) when the mean specimen temperature changes from +10 °C to -5 °C. The thermal conductivity closest to the declared value (0.022 W/m·K) was measured at a mean specimen temperature of -7 °C, and the measured thermal conductivity exceeded the declared value only at a mean specimen temperature of +25 °C. The graph shows that the thermal conductivity values of PIR at different temperatures differ. It was observed that the thermal conductivity values measured with the *FOX 314* apparatus using smaller specimens were higher than those measured with the *FOX 600* apparatus using larger area specimens.

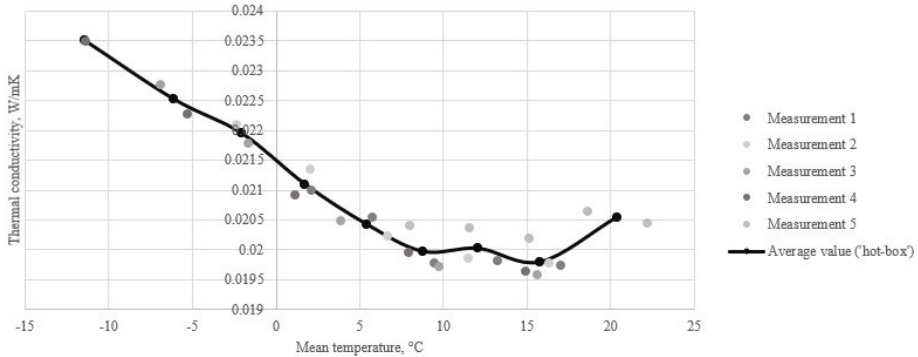


**Figure 11.** Dependence of thermal conductivity on the mean specimen temperature (heat flow meter)

When measured in a ‘hot-box’ apparatus (Figure 12), the lowest mean specimen temperature (-11 °C) achieved according to the hardware capabilities corresponds to a maximum thermal conductivity of 0.0235 W/(m·K). The value of



thermal conductivity measured at this stage of the test is higher than the declared value of thermal conductivity of the material when the mean temperature of the sample does not exceed  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

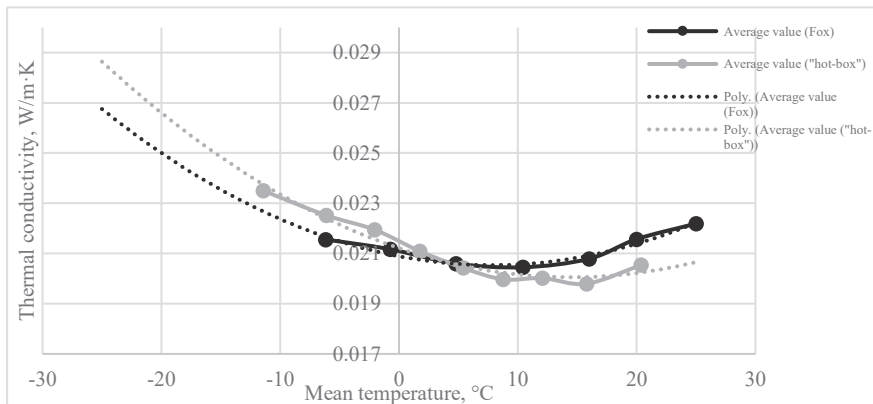


**Figure 12.** Dependence of thermal conductivity on mean specimen temperature ('hot-box' apparatus)

The black line (Figures 11–12) shows the average of the thermal conductivity values determined during the measurements, corresponding to the mean temperature of the specimen(s).

Analysis of the results of the thermal conductivity measurements showed that PIR is a sufficiently stable material when used in a medium temperature environment, but its thermal properties change when higher temperatures prevail or when it is used at low temperatures. The results of the study confirmed the conclusion presented by other researchers that the changes in the thermal conductivity of PIR are mainly due to the changes in the state of the blowing gases filling the cells of the material due to their diffusion and condensation.

The results of PIR specimens' thermal conductivity measurement at different temperatures show that the thermal properties of new products differ depending on the mean specimen temperature, but much less than reported in some other scientific publications.

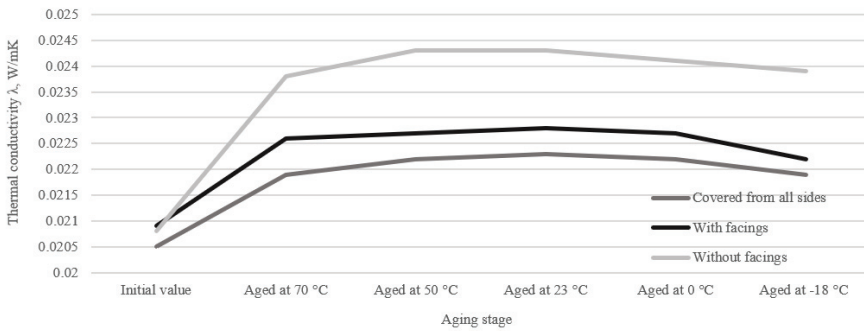


**Figure 13.** Dependence of PIR thermal conductivity on mean specimen temperature

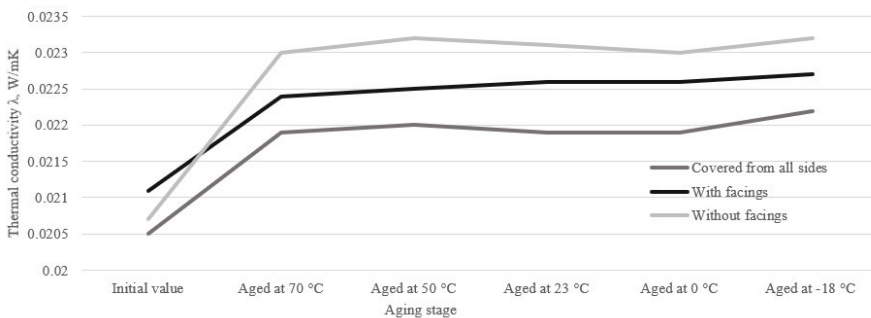
The results of this study show that the current procedure for declaring the thermal properties of PIR adequately estimates the increase in the thermal conductivity of the material when used as thermal insulation of building envelopes but should still be adjusted for PIR products used in refrigeration buildings. By extrapolating the measurement results (Figure 13), it can be predicted that the thermal conductivity of the products will increase by about 20% compared to the declared value, which will considerably affect the thermal resistance and energy demand of the building envelope to maintain the set indoor air temperature.

### Influence of continuous thermal aging on the thermal conductivity of samples

Fluctuations in the thermal conductivity of 30 mm thick PIR specimens using the continuous thermal aging procedure are presented in Figure 14. All types of specimens show a notable increase in the thermal conductivity after conditioning at +70 °C. It has been observed that the thermal conductivity increases slightly when the same specimens are stored at lower temperatures, and the thermal conductivity of the specimens with facings is close to linear. This indicates that the release of gases into the environment at this stage is largely dependent on their movement from the inner layers of the material to the surface. The thermal conductivity of specimens without facings stops increasing earlier, depending on the diffusion possibilities limited by the facings.



**Figure 14.** Variation of the average thermal conductivity of 30 mm thick specimens during continuous aging

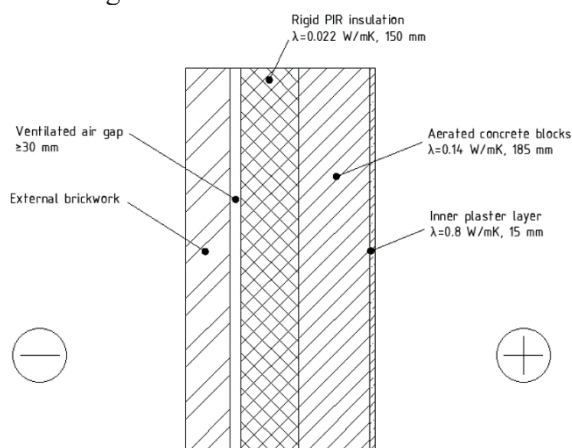


**Figure 15.** Variation of the average thermal conductivity of 50 mm thick specimens during continuous aging

The trend of the PIR thermal conductivity change is similar for 50 mm specimens (Figure 15). It was found that the covering open ends of the specimen with a diffusion-tight film do not affect the thermal conductivity, nor do they ensure gas tightness. It can also be observed that the increase in the thermal conductivity of the specimens stabilized earlier than that of the 30 mm thick specimens.

### Effects of changes in thermal conductivity of PIR products on heat transfer through insulated partitions

After identifying possible changes in the thermal conductivity of PIR products compared to the standard declared value of thermal conductivity, the effect of these differences on the heat transfer of the selected wall was analysed. The value of the wall heat transfer coefficient was chosen to be  $U = 0.12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  falling within the range of wall  $U$  values in the countries of the northern region of Europe. The wall construction is shown in Figure 16.



**Figure 16.** Fragment of a wall of near zero energy building

When calculating the heat transfer coefficient of the selected wall, different ambient temperature conditions were modelled, corresponding to various heat transfer calculation conditions and PIR thermal conductivity values measured accordingly. The conditions and calculation results are presented in Table 4, which shows that the thermal conductivity of PIR, if determined by using the standard procedure, meets the conditions for the calculation of seasonal heat loss and cooling energy loss in a building.

When calculating the heat loss of a building in the coldest months of the year, a revised value can be used, i.e.,  $0.002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  lower thermal conductivity, which would give about 8% less heat loss through the specified partition. When calculating energy losses in refrigerator buildings, a value of  $0.002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  should be added to the declared thermal conductivity, which would reduce the estimated annual energy consumption for refrigeration, but this will not considerably affect the actual energy consumption, as the heat flow during periods of low outdoor temperatures through refrigerator building envelopes is usually much smaller.

**Table 4.** Dependence of wall heat transfer changes on PIR thermal conductivity changes

Exterior temp., °C	Interior temp., °C	Mean temp. of PIR, °C	Purpose of calculation	Thermal conductivity		Heat transfer. $U$ , W/(m <sup>2</sup> ·K)
				Method of determination	$\lambda$ , W/(m·K)	
0	+20	+10	Heating	Declared	0.022	0.120
0	+20	+10	Heating	Heat flow meter, + 10 °C	0.021	0.116
+30	+20	+25	Cooling	Heat flow meter, extrapolated	0.022	0.120
-10	+20	+5	Heating, the coldest month	'Hot-box'	0.020	0.111
-5	-15	-10	Freezing	'Hot-box', extrapolated	0.024	0.129

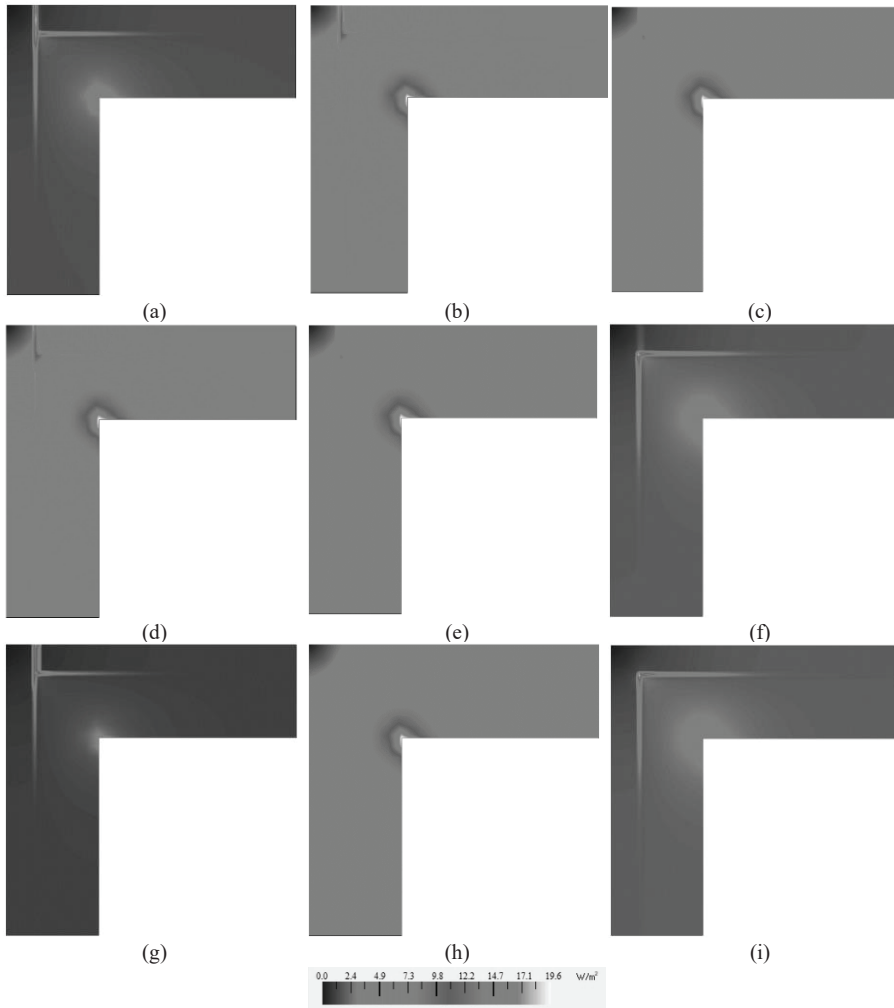
**Influence of different PIR facings on heat transfer through the corners of insulated building walls**

Figure 17 shows the heat flux through a wall corner insulated with PIR with different facings. The obtained results (Table 5) showed that the value of the linear thermal bridge when using PIR with multilayer aluminized composite paper or plastic facing was the same.

**Table 5.** Calculation results

Construction type	$L_{2D}$	$\Psi$ , W/(m·K)	$\Delta\Phi$ , W/m		
Wall corner insulated with PIR with different facings, with PU adhesive in the joint between two boards (Figure 17)	a) aluminium foil facing	0.2834	-0.041	0.001	0.484
	b) multilayer aluminised facing	0.2592			
	c) composite paper facing	0.2590			
	d) plastic facing	0.2592			
Wall corner insulated with PIR without facings with PU adhesive in the joint between two boards (Figure 17e)	0.2592	-0.041	0.088		
Wall corner insulated with PIR with aluminium foil facing, with PU adhesive in the joint between two boards (Figure 17f)	0.2636	-0.036			
Wall corner insulated with PIR with aluminium foil facing without PU adhesive in the joint between two boards (Figure 17g)	0.2948	-0.005			
Wall corner insulated with PIR without facings, and without PU adhesive in the joint between two boards (Figure 17h)	0.2588	-0.041	0.08		
Wall corner insulated with PIR with aluminium foil facing without PU adhesive and with removed facing in the joint between two boards (Figure 17i)	0.2628	-0.037			

It was observed that the wall corners insulated with PIR without facings (Fig. 17e) and with other than aluminium foil facings had the same values of linear thermal bridges, therefore it was decided not to evaluate PIR facings of any types except for aluminium foil. Another modelled wall corner structure was insulated with PIR with a removed aluminium foil facing in the joint between the boards and using PU adhesive in the joint (Figure 17f). The difference in the heat flow between these two structures was  $\Delta\Phi = 0.088 \text{ W/m}$ , which can be considered as of little significance.



**Figure 17.** Heat flow through the wall corner insulated with PIR with a) aluminium foil, b) multilayer aluminized facing, c) composite paper facing, d) plastic facing, e) without facings, f) aluminium foil and PU adhesive in the joint, g) aluminium foil and without PU adhesive in the joint, h) without facing and without PU adhesive in the joint, i) aluminium foil, with removed facing in the joint and without PU adhesive

For comparison, another simulation was performed when PIR is without facings and without PU adhesive in the joint (Figures 17g and 17h). As it can be seen, when calculating the linear thermal bridge of a wall corner insulated with PIR with any facing other than aluminium foil, PU adhesive in the corner joint of two boards need not be considered. The difference in the heat flow between these two variants was  $\Delta\Phi = 0.72$  W/m; this means that, without the use of PU adhesive in the joint, the heat flow through the corner of the wall is increased.

In order to reduce the heat flux to the outside (which increases through the aluminium foil facing at the PIR connection), the facings at this connection must be removed (Figure 17i). In this case, the difference in the heat flow between PIR with aluminium foil facing removed and with PU adhesive in the joint, and PIR without facings and without PU adhesive in the joint (Figure 17h) is  $\Delta\Phi = 0.08$  W/m, i.e., the value is 8.5 times smaller than for the structure given in Figure 17f.

As shown in Table 6, the thermal resistances were quite similar for both PIR with aluminium foil and multilayer aluminized facings. The thermal resistance of the specimen with aluminium foil facing was slightly higher because aluminium is more conductive to heat, which results in more intense heat propagation perpendicular to the heat flow, thereby resulting in lateral heat loss and reduced measurement accuracy.

Equivalent thermal resistances of the inverted specimens, i.e., with formed linear thermal bridges from different facings, were measured, and they differed from each other and from solid specimens. The measured thermal resistance of the specimens with aluminium foil facing was approximately twice as high as the equivalent thermal resistance of the same specimens with the formed linear thermal bridge, and the difference in thermal resistance between the specimens with multilayer aluminized facing was around 33%.

**Table 6.** Results of experimental measurements

Facing type	Specimen type	$R$ , ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )/W	$d$ , m	$\lambda$ , W/( $\text{m} \cdot \text{K}$ )	$A$ , $\text{m}^2$	$l$ , m	$\varphi$ , W/( $\text{m} \cdot \text{K}$ )	$\Delta\Phi$ , W/m
Aluminium foil facing	Solid specimen	3.69	0.101	0.027	0.064	0.254	0.035	0.70
	Specimen with rotated insert	1.83		0.055				
Multilayer aluminized facing	Solid specimen	3.50	0.102	0.029	0.064	0.254	0.019	0.38
	Specimen with rotated insert	2.32		0.044				

The equivalent thermal resistance of the specimen with a linear thermal bridge formed of an aluminium foil facing was approximately 20% lower than that of the specimens with inserts made of a multilayer aluminized facing. When comparing the heat transfer values of the linear thermal bridges of both specimens, it can be observed that, in the case of the aluminium foil facing, this value almost doubled.

When summarizing the results of numerical modelling and experimental measurements, it can be stated that the PU adhesive layer acted in two ways: they increased heat transfer through the joint because the thermal conductivity of the PU adhesive was higher than the PIR core; on the other hand, the PU adhesive did not allow joining of facings of two individual PIR boards on the inner and outer surfaces, thus reducing the overall heat transfer through the wall corner joint.

## 5.5. General conclusions

1. The use of PIR products in negative temperature environments does not change their thermal conductivity measured under standard conditions, but specimens measured at low medium temperatures may increase the thermal conductivity by up to 20% due to changes in the blowing gas state: gas condenses, the distance between the molecules decreases, they form compounds which increase the heat transfer between the surfaces of the material cells.

2. The largest increase in the thermal conductivity of PIR products (~ 15%) was found after their conditioning at +70 °C, when the conditions were created for intensive diffusion of blowing gases. The thermal conductivity of the specimens with factory-made facings changed the least, and that of the thin specimens changed the most.

3. The standard procedure for determining the declared thermal conductivity of PIR when a specimen is cut from the core of a product does not meet the conditions for the use of products with diffusion-proof facings and needs to be adjusted by waiving the measurement of the cut core and opting for a shorter aging period for the faced samples. The thermal conductivity of specimens aged in a high temperature environment after removal of their facings changes by more than 8% compared to samples faced with factory-made facings. Subsequently, diffusion-proof films applied to the open sides of the specimen do not reduce the changes in the thermal conductivity after aging, as they do not form such a barrier to the diffusion of blowing gases as the factory-made facings.

4. Numerical modelling and experimental measurements of wall corner joints insulated with PIR thermal insulation with contacting aluminium facing show that the increase of the heat flow through the joint of walls with U value 0.15 W/(m<sup>2</sup>·K), compared to continuous PIR insulation, is 0.72 W/m wall height, which increases the heat loss of a medium-sized (up to 150 m<sup>2</sup>) single-family home by 30–40 kWh per year.

5. The accuracy of the measurement of the thermal conductivity of PIR products by the heat flow meter method depends on the difference between the average ambient temperatures of the specimen and the measuring device. With a very low value of the thermal conductivity of the material, small heat flux is generated during the measurement which can be distorted due to the lateral heat exchange between the environment, the specimen, and the measurement plates. When measuring the thermal conductivity of the specimens in a 'hot-box' with additional 1 or 2 heat flow sensors, the measurement accuracy can be increased by up to 5% compared to the heat flow meter method.



6. The results of this research show that the changes in PIR are noticeably smaller than those described in the results of previous studies. The decreasing effect of temperature on the thermal conductivity of PIR products can be explained by the continuous improvement of the material: by reducing the cell size, increasing the number of closed cells, the gas volume is further decomposed, thereby reducing the effect of blowing gas condensation on the heat transfer between cell surfaces and throughout the specimen.

7. When calculating the heat loss of a building in the coldest months of the year, it is recommended to use a revised value, i.e.,  $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  lower thermal conductivity, which would give up to 8% lower heat loss through the thermal insulation layer of the partition. A value higher than  $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  than the declared thermal conductivity of PIR products may be used to calculate the energy losses in refrigerator buildings; this would reduce the estimated annual energy consumption for refrigeration but would not have a large impact on the actual energy consumption, as the heat flow through the enclosures of refrigerator buildings to the environment is noticeably lower during periods of low outdoor temperatures.

## 6. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. ABDU, A. A., BUDAIWI, I. M. (2005). Comparison of Thermal Conductivity Measurements of Building Insulation Materials under Various Operating Temperatures. *Journal of Building Physics*, Vol. 29, No. 2, 171-184. doi: 10.1177/1744259105056291.
2. ABU-JDAYIL, B., MOURAD, A-H., HITTINI, W., HASSAN, M., HAMEEDI, S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709-735. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102.
3. AHMED, K., CARLIER, M., FELDMANN, C., KURNITSKI, J. (2017). A new method for contrasting energy performance and near-zero energy building requirements in different climates and countries. *Energies*, 10, 334. doi: 10.3390/en11061334.
4. ALEV, Ü., KALAMEES, T. (2016). Avoiding mould growth in an interiorly insulated log wall. *Building and Environment*, 105, 104-115. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.020.
5. AL-HOMOUD, M. S. (2004). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40, 353-366. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
6. ALVEY, J. B., PATEL, J., STEPHENSON, L. D. (2017). Experimental study on the effects of humidity and temperature on aerogel composite and foam insulations. *Energy and Buildings*, 144, 358-371. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.070.
7. ASDRUBALI, F., BALDINELLI, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*, 43, 1618-1626. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.005.
8. BAILLIS, D., COQUARD, R., (2008). Radiative and Conductive Thermal Properties of Foams. In A. Öchsner, G. E. Murch and M. J. S. De Lemos (Eds.), *Cellular and Porous Materials: Thermal Properties Simulation and Prediction*, (pp. 343-384). Weinheim: WILEY-VCH.
9. BARRIOS, M. *Material Characterization of Rigid Foam Insulation at Low Temperature. Doctoral Dissertation*. Tallahassee: Florida State University, 2011.
10. BEN LARBI, A. (2005). Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings. *Energy and Buildings*, 37, 945-951. doi:10.1016/j.enbuild.2004.12.013.
11. BENNETT, B., LAWLOR, D. (2014). *Study of Conventional Roof Performance*. Vancouver: RDH Building Engineering Ltd.
12. BERARDI, U. (2017a). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 123, 230-241. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.03.014.
13. BERARDI, U. (2017b). The impact of temperature dependency of the building insulation thermal conductivity in the Canadian climate. *Energy Procedia*, 132, 237-242. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.684.
14. BERARDI, U. (2019). The impact of aging and environmental conditions on the effective thermal conductivity of several foam materials. *Energy*, 182, 777-794. doi: 10.1016/j.energy.2019.06.022.
15. BERARDI, U., NALDI, M. (2017). The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance. *Energy and Buildings*, 144, 262-275. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.03.052.

16. BERARDI, U., NOSRATI, R.H. (2018). Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions. *Energy*, 147 (2018), 1188-1202. doi: 10.1016/j.energy.2018.01.053.
17. BERARDI, U., MADZAREVIC, J. (2020). Microstructural analysis and blowing agent concentration in aged polyurethane and polyisocyanurate foams. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114440. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114440.
18. BERARDI, U., TRONCHIN, L., MANFREN, M., NASTASI, B. (2018). On the Effects of Variation of Thermal Conductivity in Buildings in the Italian Construction Sector. *Energies*, 11, 872. doi: 10.3390/en11040872.
19. BERGGREN, B., WALL, M. (2013). Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes—Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology. *Energy and Buildings*, 65, 331–339. doi:10.1016/j.enbuild.2013.06.021.
20. Berkeley Lab. (2020). *Two-Dimensional Building Heat-Transfer Modeling*. [žiūrėta 2020-03-09] Prieiga per internetą: <https://windows.lbl.gov/software/therm>.
21. BIEDERMANN, A., KUDOKE, C., MERTEN, A., MINOGUE, E., ROTERMUND, U., EBERT, H.P., HEINEMANN, U., FRICKE, J., SEIFERT, H. (2001). Analysis of Heat Transfer Mechanisms in Polyurethane Rigid Foam. *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 37, 467-483. doi: 10.1106/KEMU-LH63-V9H2-KFA3.
22. BISWAS, K., DESJARLAIS, A., SMITH, D., LETTS, J., YAO, J., JIANG, T. (2018). Development and thermal performance verification of composite insulation boards containing foam-encapsulated vacuum insulation panels. *Applied Energy*, 228, 1159-1172. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.136.
23. BYNUM, R. T., Jr. (2000). *Insulation Handbook*. New York: McGraw-Hill.
24. BJÖRK, F., ENOCHSSON, T. (2009). Properties of thermal insulation materials during extreme environment changes. *Construction and Building Materials*, 23, 2189-2195. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.006.
25. BOGDAN, M., HOERTER, J., MOORE Jr., F. O. (2005). Meeting the Insulation Requirements of the Building Envelope with Polyurethane and Polyisocyanurate Foam. *Journal of Cellular Plastics*, 41, 41-56. doi: 10.1177/0021955X05049869.
26. BOMBERG, M. & KUMARAN, M. (1995). *Procedures to Predict Long-Term Thermal Performance of Boardstock Foam Insulations: Supplementary Report on Expanded Polystyrene*. Montreal: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
27. BOZSAKY, D. The development of thermal insulation materials from the beginnings to the appearance of plastic foams. In *XXXVII IAHS World Congress on Housing, October 26-29, 2010, Santander, Spain*.
28. BRANDRETH, D. A. (1989). Insulation Foam Aging – A Review of the Relevant Physical Phenomena. *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 25, 139-147. doi: 10.1177/0021955X8902500204.
29. BUDAIWI, I., ABDU, A. (2013). The impact of thermal conductivity change of moist fibrous insulation on energy performance of buildings under hot-humid conditions. *Energy and Buildings*, 60, 388-399. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.035.
30. BUDAIWI, I., ABDU, A.; AL-HOMOUD, M. (2002). Variations of Thermal Conductivity of Insulation Materials Under Different Operating Temperatures: Impact on Envelope-Induced Cooling Load. *Journal of Architectural Engineering*, 2002, 125-132. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0431(2002)8:4(125).
31. CAI, S., CREMASCHI, L., GHAJAR, A. J. (2014). Pipe insulation thermal conductivity under dry and wet condensing conditions with moisture ingress: A critical review. *HVAC&R Research*, 20, 459-479. doi: 10.1080/10789669.2014.882678.

32. *Chemical Economics Handbook. Polyurethane Foams* (2016). [žiūrėta 2017-11-16]. Prieiga per internetą: <https://www.ihs.com/products/polyurethane-foams-chemical-economics-handbook.html>.
33. CHOE, H., CHOI, Y., KIM, J. H. (2019). Threshold cell diameter for high thermal insulation of water-blown rigid polyurethane foams. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 73, 344-350. doi: 10.1016/j.jiec.2019.02.003.
34. CHOI, H-J., KANG, J-S., HUH, J-H. (2017). A Study on Variation of Thermal Characteristics of Insulation Materials for Buildings According to Actual Long-Term Annual Aging Variation. *International Journal of Thermophysics*, 39:2. doi: 10.1007/s10765-017-2318-3.
35. CHRISTIAN, J. E., DESJARLAIS, A., GRAVES, R., SMITH, T.L. Five-Year Field Study Confirms the PIMA Standard for Estimating Polyisocyanurate Insulation Long-Term Thermal Performance. In *11th Conference on Roofing Technology, September 21-22, 1995, Gaithersburg, MD, USA*.
36. CLARKE, J. A., YANESKE, P. P. (2009). A rational approach to the harmonisation of the thermal properties of building materials. *Building and Environment*, 44, 2046-2055. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.02.008.
37. CORNILLE, A., GUILLET, C., BENYAHYA, S., NEGRELL, C., BOUTEVIN, B., CAILLOL, S. (2016). Room temperature flexible isocyanate-free polyurethane foams. *European Polymer Journal*, 84, 873-888. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.05.032.
38. ČERNECKIENĖ, J., ŽDANKUS, T., VALANČIUS, R., FOKAIDES, P. A. (2020). Numerical investigation of the impact of longitudinal thermal bridging on energy efficient buildings under humid continental climate conditions: The case of Lithuania. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410, 105. doi:10.1088/1755-1315/410/1/012105.
39. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings [žiūrėta 2017-11-23]. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:lt:PDF>.
40. DOHRN, R., FRONSECA, J. M., ALBERS, R., KUŠAN-BINDELS, J., MARRUCHO, I. M. (2007). Thermal conductivity of polyurethane foam cell gases: Improved transient hot wire cell – data of isopentane + n-pentane mixtures – Extended Wassiljewa-model. *Fluid Phase Equilibria*, 261, 41-49. doi: 10.1016/j.fluid.2007.07.059.
41. DURAKOVIC, B., YILDIZ, G., YAHIA, M.E. (2020). Comparative Performance Evaluation of Conventional and Renewable Thermal Insulation Materials Used in Building Envelopes. *Technički vjesnik*, 27, 1, 283-289. doi: 10.17559/TV-20171228212943.
42. ENGELS, H-W., PIRKL, H-G., AALBERS, R., ALBACH, R. W., KRAUSE, J., HOFFMANN, A., CASSELMANN, H., and DORMISH, J. (2013). Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 52, 9422-9441. doi: 10.1002/anie.201302766.
43. ERHORN-KLUTTIN, H., ERHORN, H. (2009). *Impact of Thermal Bridges on the Energy Performance of Buildings*. Brussels: European Communities.
44. ESCOBAR, L.A., MEEKER, W.Q. (2006). A Review of Accelerated Test Models. *Statistical Science*, Vol. 21, No. 4, 552-577. doi: 10.1214/088342306000000321.
45. European Insulation Manufacturers Association (2020). *U-Values in Europe*. [žiūrėta 2020-02-15] Prieiga per internetą: <https://www.eurima.org/u-values-in-europe/>.

46. Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations (2006). *Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR). Report No. 1.* Brussels: BING.
47. FELDMAN, D. (2010). Polymeric foam materials for insulation in buildings. In M. R. Hall (Ed.), *Materials for energy efficiency and thermal comfort in Buildings*, (pp. 257-273). Cambridge: Woodhead Publishing.
48. FERKL, P., TOULEC, M., LAURINI, E., PRICL, S., FERMEGLIA, M., AUFFARTH, S., ELING, B., SETTELS, V., KOSEK, J. (2017). Multi-scale modelling of heat transfer in polyurethane foams. *Chemical Engineering Science*, 172, 323-334. doi: 10.1016/j.ces.2017.06.035.
49. FINCH, G., RICKETTS, L., DELL, M. Conventional roofs: Measuring impacts of insulation strategy & membrane colour in Canada. In *14<sup>th</sup> Canadian Conference on Building Science and Technology, October 29-30, 2014, Toronto, Ontario, Canada.*
50. GAILIUS, A., VĖJELIS, S. (2012). *Akustinės ir termoizoliacinės medžiagos.* Vilnius: Technika.
51. GIUNDA d'ALBANI, A. W., de KLUIVER, L. L., de KORTE, A. C. J., van HERPEN, R. A. P., WEEWER, R., BROUWERS, H. J. H. (2017). Mass loss and flammability of insulation materials used in sandwich panels during the pre-flashover phase of fire. *Fire and Materials*. doi: 10.1002/fam.2418.
52. GRAVIT, M., KULESHIN, A., KHAMETGALIEVA, E., KARAKAZOVA, I. (2017). Technical characteristics of rigid sprayed PUR and PIR foams used in construction industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 90, 012187. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012187.
53. HALLIWELL, S.M. (2003). *Polymers in Building and Construction.* Shrewsbury: Rapra Technology Limited.
54. HEJNA, A., KOSMELA, P., KIRPLUKS, M., CABULIS, U., KLEIN, M., HAPONIUK, J., PISZCZYK, Ł. (2018). Structure, Mechanical, Thermal and Fire Behavior Assessments of Environmentally Friendly Crude Glycerol-Based Rigid Polyisocyanurate Foams. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 1854-1868. doi: 10.1007/s10924-017-1086-2.
55. *Insulation Market Analysis By Product (Fiberglass, Foamed Plastic, Mineral Wool), By Application (Residential Construction, Industrial, HVAC And OEM, Nonresidential Construction) And Segment Forecast To 2024* [žiūrėta 2017-11-27]. Prieiga per internetą: <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/insulation-market>.
56. ISLAM, S., BHAT, G. (2019). Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. *Journal of Environmental Management*, 251, 109536. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109536.
57. YARAHMADI, N., VEGA, A., JAKUBOWICZ, I. (2017). Accelerated ageing and degradation of rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, 138, 192-200. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.012.
58. JAMSHIDI, M. *A Process for Recycling Thermosetting Foams and the Incorporation of Recycled Foams into Structural Composite Panels. Doctoral Dissertation.* London: Queen Mary University of London, 2009.
59. JARFELT, U., RAMNÄS, O. Thermal conductivity of polyurethane foam – best performance. In *10<sup>th</sup> International Symposium on District Heating and Cooling, September 3-5, 2006, Hannover, Germany.* Frankfurt am Main: AGFW, 2006. p. 11.
60. JELLE, P. B. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43, 2549-2563. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.

61. JELLE, P. B. (2012). Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory. *Journal of Material Science*, 47, 6475-6496. ISSN 0022-2461.
62. JIN, J., DONG, Q-x., SHU, Z-j., WANG, W-j., HE, K. (2014). Flame retardant Properties of Polyurethane/expandable Praphite Composites. *Procedia Engineering*, 71, 304-309. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.044.
63. JONES, P., PINTO, P., PATTERSON, J., TWEED, C. (Eds.). (2009). *Low Carbon Urban Built Environment. European Carbon Atlas*. Cardiff: The Welsh School of Architecture, Cardiff University, UK.
64. KANCHANAPIYA, P., METHACANON, P., TANTISATTAYAKUL, T. (2018). Techno-economic analysis of light weight concrete block development from polyisocyanurate foam waste. *Resources, Conservation & Recycling*, 138 (2018), 313-325. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.07.027.
65. KAPPS, M., BUSCHKAMP, S. (2004). *The production of rigid polyurethane foam. Technical information No. PU21012-04-06*. Leverkusen: Bayer MaterialScience.
66. KHATOON, H., IQBAL, S., IRFAN, M., DARDA, A., RAWAT, N.K. (2021). A review on the production, properties and applications of non-isocyanate polyurethane: A greener perspective. *Progress in Organic Coatings*, 154, 106124. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.106124.
67. KHOUKHI, M. (2018). The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. *Energy and Buildings*, 169, 228-235. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.055.
68. KHOUKHI, M., FEZZIOUI, N., DRAOUI, B., SALAH, L. (2016). The impact of changes in thermal conductivity of polystyrene insulation material under different operating temperatures on the heat transfer through the building envelope. *Applied Thermal Engineering*, 105, 669-674. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.065.
69. KHOUKHI, M., HASSAN, A., ABDELBAQI, S. (2019). The Impact of Variable Thermal Conductivity of Insulation Materials on the Building Energy Performance in Hot Climate. *E3S Web of Conferences*, 103. doi: 10.1051/e3sconf/201910302001.
70. KIM, Y.H., KANG, M.J., PARK, G.P., PARK, S.D., KIM, S.B., KIM, W.N. (2011). Effects of Liquid-Type Silane Additives and Organoclay on the Morphology and Thermal Conductivity of Rigid Polyisocyanurate-Polyurethane Foams. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 124, 3117-3123. doi: 10.1002/app.35429.
71. KIRPLUKS, M., CABULIS, U., ZELTINS, V., STIEBRA, L., AVOTS, A. (2014). Rigid Polyurethane Foam Thermal Insulation Protected with Mineral Intumescent Mat. *AUTEX Research Journal*, Vol. 14 (4), 259-269. doi: 10.2478/aut-2014-0026.
72. KONTOLEON, K. J., GIARMA, C. (2016). Dynamic thermal response of building material layers in aspect of their moisture content. *Applied Energy*, 170, 76-91. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.106.
73. KOŚNY, J., KOSSECKA, E. Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs. *Energy and Buildings*. 2002, 34, 445-454.2002. ISSN 0378-7788.
74. KURANSKA, M., PROCIAK, A., KIRPLUKS, M., CABULIS, U. (2013). Porous polyurethane composites based on bio-components. *Composites Science and Technology*, 75, 70-76. doi: 10.1016/j.compscitech.2012.11.014.
75. KUS, H., ÖZKAN, E., GÖCER, Ö., EDIS, E. (2013). Hot box measurements of pumice aggregate concrete hollow block walls. *Construction and Building Materials*, 38, 837-845. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.053.



76. KUUSK, K., KURNITSKI, J., KALAMEES, T. (2017). Calculation and compliance procedures of thermal bridges in energy calculations in various European countries. *Energy Procedia*, 132, 27-32. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.626.
77. LEACH, A. G. (1993). The thermal conductivity of foams. I: models for heat conduction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26, 733-739. doi: 10.1088/0022-3727/26/5/003.
78. LEVINSKYTĖ, A., BLIŪDŽIUS, R., BURLINGIS, A., MAKAVECKAS, T. Dependencies of heat transmittance through the ventilated wall system on thermal conductivity of connectors crossing thermal insulation layer. In *Proceedings of the 4th Central European Symposium on Building Physics, September 2–5, 2019, Prague, Czech Republic*. EDP Sciences: Les Ulis, France, 2019. doi:10.1051/mateconf/201928202089.
79. LI, X., STRIBECK, A., SCHULZ, I., PÖSELT, E., ELING, B., HOELL, A. (2016). Nanostructure of thermally aged thermoplastic polyurethane and its evolution under strain. *European Polymer Journal*, 81, 569-581. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2015.11.027.
80. *Lietuvos standartas LST EN ISO 6946:2017 „Pastato komponentai ir elementai. Šiluminė varža ir šilumos perdavimo koeficientas. Skaičiavimo metodai (ISO 6946:2017)“* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
81. *Lietuvos standartas LST EN ISO 10211:2017 „Statybinių konstrukcijų šilumos tilteliai. Šilumos srautai ir paviršiaus temperatūros. Detalieji skaičiavimai (ISO 10211:2017)“* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
82. *Lietuvos standartas LST EN 12667:2002 „Šiluminės statybinių medžiagų ir gaminių savybės. Šiluminės varžos nustatymas apsaugotos karštosios plokštės ir šilumos srauto matuoklio metodais. Didelės ir vidutinės šiluminės varžos gaminiai.“* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
83. *Lietuvos standartas LST EN 13165:2012+A2:2016 „Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Gamykliniai standžiųjų poliuretano putų (PU) gaminiai. Specifikacija.“* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016.
84. LISZKOWSKA, J., CZUPRYŃSKI, B., PACIOREK-SADOWSKA, J. (2016). Thermal Properties of Polyurethane-Polyisocyanurate (PUR-PIR) Foams Modified with Tris(5-Hydroxypentyl) Citrate. *Journal of Advanced Chemical Engineering*. Vol. 6, Issue 2. p. 8. doi: 10.4172/2090-4568.1000148.
85. LISZKOWSKA, J., MORACZEWSKI, K., BOROWICZ, M., PACIOREK-SADOWSKA, J., CZUPRYŃSKI, B., ISBRANDT, M. (2019). The Effect of Accelerated Aging Conditions on the Properties of Rigid Polyurethane-Polyisocyanurate Foams Modified by Cinnamon Extract. *Applied Sciences*, 9, 2663. doi: 10.3390/app9132663.
86. LORENZATI, A., FANTUCCI, S., CAPOZZOLI, A., PERINO, M. (2014). The effect of different materials joint in Vacuum Insulation Panels. *Energy Procedia*, 62, 374-381. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.399.
87. LORENZETTI, A., ROSO, M., BRUSCHETTA, A., BOARETTI, C., MODESTI, M. (2015). Polyurethane-graphene nanocomposite foams with enhanced thermal insulating properties. *Polymers Advanced Technologies*, 2016, 27, 303-307. doi: 10.1002/pat.3635.
88. LUDWICK, A., AGLAN, H., ABDALLA, M.O., CALHOUN, M. (2008). Degradation Behavior of an Ultraviolet and Hygrothermally Aged Polyurethane Elastomer: Fourier Transform Infrared and Differential Scanning Calorimetry Studies. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 110 (2), 712-718. doi: 10.1002/app.28523.



89. MACCHI-TEJEDA, H., OPATOVÀ, H., LEDUCQ, D. (2007). Contribution to the gas chromatographic analysis for both refrigerants composition and cell gas in insulating foams – Part I: Method. *International Journal of Refrigeration*, 30, 329-337. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.04.003.
90. MAKAVECKAS, T., BLIŪDŽIUS, R., BURLINGIS, A. (2020). The Influence of Different Facing of Polyisocyanurate Boards on Heat Transfer through the Wall Corners of Insulated Buildings. *Energies*, 13, 1991. doi: 10.3390/en13081991.
91. MARRUCHO, I. M., SANTOS, F., OLIVEIRA, N. S., DOHRN, R. (2005). Aging of Rigid Polyurethane Foams: Thermal Conductivity of N<sub>2</sub> and Cyclopentane Gas Mixtures. *Journal of Cellular Plastics*, 41, 207-224. doi: 10.1177/0021955X05053520.
92. MARTIN, K., CAMPOS-CELADOR, A., ESCUDERO, C., GÓMEZ, I., SALA, J. M. (2012). Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility. *Energy and Buildings*, 50, 139–149. doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.028.
93. MATTILA, H. P. Moisture Behavior of Building Insulation Materials and Good Building Practices. In *Rakennusfysiikka 2017 (Building Physics 2017), October 24-26, 2017, Tampere, Finland*.
94. McELROY, D. L., COURVILLE, G. E., CHRISTIAN, J. E., GRAVES, R. S., LINKOUS, R. L. (1991). Thermal Properties of Polyisocyanurate Foam Board Roof Insulation Blown With CFC-11 Substitutes. In *International Symposium on Roofing Technology April 17-19, 1991, Gaithersburg, MD, USA*.
95. MODESTI, M., CONSTANTINI, F., dal LAGO, E., PIOVESAN, F., ROSO, M., BOARETTI, C., LORENZETTI, A. (2018). Valuable secondary raw material by chemical recycling of polyisocyanurate foams. *Polymer Degradation and Stability*, 156, 151-160. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.08.011.
96. MODESTI, M., LORENZETTI, A., BESCO, S. (2007). Influence of Nanofillers on Thermal Insulating Properties of Polyurethane Nanocomposites Foams. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 47 (9), 1351-1358. doi: 10.1002/pen.20819.
97. MUKHOPADHYAYA, P., BOMBERG, M. T., KUMARAN, M. K., DROUIN, M., LACKEY, J., van REENEN, D., NORMANDIN, N. (2002). Long-term thermal resistance of polyisocyanurate foam insulation with impermeable facers. *Insulation Materials: Testing and Applications*, Vol. 4, ASTM STP 1426, 351-365. Montreal: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
98. MURPHY, J. (2010). Long-term Aging of Closed-Celled Foam Insulation. *Cellular Polymers*, 29 (5), 313-326. doi: 10.1177/026248931002900504.
99. OCHS, F., HEIDEMANN, W., MÜLLER-STEINHAGEN, H. (2008). Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 539-552. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005.
100. OKUZONO, S., TOKUMOTO, K., TAMANO, Y., LOWE, D. W. (2001). New Polyisocyanurate Catalyst Which Exhibit High Activity at Low Temperature. *Journal of Cellular Plastics*, 37, 72-89. doi: 10.1106/DWGD-PX79-WR0G-9GBW.
101. PAPAPOULOS, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37, 77-86. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.05.006.
102. PARASCHIV, L. S., PARASCHIV, S., ION, V. I. (2017). Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation. *Energy Procedia*, 128, 393-399. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.044.
103. PARK, D. H., PARK, G. P., KIM, S. H., KIM, W. N. (2013). Effects of Isocyanate Index and Environmentally-Friendly Blowing Agents on the Morphological, Mechanical, and Thermal Insulating Properties of Polyisocyanurate-Polyurethane

- Foams. *Macromolecular Research*, Vol. 21 (8), 852-859. doi: 10.1007/s13233-013-1106-6.
104. PATNAIK, A., MVUBU, M., MUNIYASAMY, S., BOTHA, A., ANANDIWALA, R. D. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy and Buildings*, 92, 161-169. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.056.
  105. PAVEL, C. C., BLAGOEVA, D. T. (Eds.). (2018). *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings. Revised edition. JRC Technical Reports*. Brussels: European Commission.
  106. PÉREZ-BELLA, J. M., DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ, J., CANO-SUÑÉN, E., ALONSO-MARTÍNEZ, M., del COZ-DÍAZ, J. J. (2015). Detailed territorial estimation of design thermal conductivity for façade materials in North-Eastern Spain. *Energy and Buildings*, 102, 266-276. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.025.
  107. Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Association (2015). *Environmental Product Declaration No. EPD10042*. Arlington: PIMA.
  108. Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Association (2017). PIMA Technical Bulletin #117. Polyiso Insulation Types: A Guide to the Classification of Polyiso Board Insulation Products. Arlington: PIMA.
  109. PROCIAK, A., PIELICHOWSKI, J., STERZYNSKI, T. Thermal diffusivity of rigid polyurethane foams blown with different hydrocarbons. *Polymer Testing*. 2000, 19, 705-712. ISSN 0142-9418.
  110. PU Europe (2021). [žiūrėta 2021-02-20]. Prieiga per internetą: <https://www.pu-europe.eu/>.
  111. 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. *Energy and Buildings*, 119, 51-61. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.009.
  112. SADINENI, S. B., MADALA, A., BOEHM, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3617-3631. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.014.
  113. SARIER, N., ONDER, E. (2007). Thermal characteristics of polyurethane foams incorporated with phase change materials. *Thermochimica Acta*, 454, 90-98. doi: 10.1016/j.tca.2006.12.024.
  114. SCHIAVONI, S., D'ALESSANDRO, F., BIANCHI, F., ASDRUBALI, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
  115. SCHUMACHER, C., STRAUBE, J., RICKETTS, L., FINCH, G. (2016). The Effects of Temperature on Insulation Performance: Considerations for Optimizing Wall and Roof Designs. In *31<sup>st</sup> RCI International Convention and Trade Show, March 10-16, 2016, Orlando, FL, USA*.
  116. SCHWAB, H., STARK, C., WACHTEL, J., EBERT, H. P., FRICKE, J. (2005). Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Façades. *Journal of Building Physics*, 28, 345-355. doi: 10.1177/1097196305051794.
  117. SEO, W. J., JUNG, H. C., HYUN, J. C., KIM, W. N., LEE, Y-B., CHOE, K. H., KIM, S-B. (2002). Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of Rigid Polyurethane Foams Blown by Distilled Water. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 90, 12-21. doi: 10.1002/app.12238.
  118. SHI, J., LIU, Y., LIU, B., HAN, D. (2019). Temperature Effect on the Thermal Conductivity of Expanded Polystyrene Foamed Concrete: Experimental Investigation

- and Model Correction. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. doi: 10.1155/2019/8292379.
119. SINGH, S. N., NTIRU, M., DEDECKER, K. (2003). Long Term Thermal Resistance of Pentane Blown Polyisocyanurate Laminate Boards. *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 39 (2003), 265-280. doi: 10.1177/002195503035065.
  120. STOVALL, T. (2012). Closed Cell Foam Insulation: A Review of Long Term Thermal Performance Research. Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-2012/583. doi: 10.2172/1093061.
  121. STOVALL, T., VANDERLAN, M., ATCHLEY, J. Evaluation of Experimental Parameters in the Accelerated Aging of Closed-Cell Foam Insulation: Results after Five Years of Full-Thickness Aging. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference (ASHRAE)*, December 1-3, 2013, Clearwater, FL, USA.
  122. STRAUBE, J. *Thermal Metrics for High Performance Enclosure Walls: The Limitations of R-Value. Research Report – 0901*. Somerville: Building Science Press, 2007.
  123. TABRIZI, T. B., HILL, G., AITCHISON, M. (2017). The impact of different insulation options on the life cycle energy demands of a hypothetical residential building. *Procedia Engineering*, 180, 128-135. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.172.
  124. TAO, W-H., HSU, H-Ch., CHANG, Ch-Ch., HSU, Ch-L., LIN, Y-S. (2001). Measurement and Prediction of Thermal Conductivity of Open Cell Rigid Polyurethane Foam. *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 37, 310-332. doi: 10.1106/1X25-NV25-LUA2-GHR3.
  125. TENPIERIK, M., CAUBERG, H. (2007). Analytical Models for Calculating Thermal Bridge Effects Caused by Thin High Barrier Envelopes around Vacuum Insulation Panels. *Journal of Building Physics*, 30, 185–215. doi: 10.1177/1744259107073160.
  126. TENPIERIK, M., VAN der SPOEL, W., CAUBERG, H. (2008). An Analytical Model for Calculating Thermal Bridge Effects in High Performance Building Enclosure. *Journal of Building Physics*, vol. 31, No. 4, 361-387. doi: 10.1177/1744259107088008.
  127. THEODOSIOU, T. G., PAPADOPOULOS, A. M., (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40, 2083-2089. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.06.006.
  128. THEODOSIOU, T., TSIKALOUKAKI, K., BIKAS, D. Analysis of the thermal bridge effect on ventilated facades. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, October 16-19, 2016, Thessaloniki, Greece*. doi:10.1016/j.proenv.2017.03.121.
  129. Types of Laminated PIR Boards. [žiūrėta 2020-04-14] Preiga per internetą: <http://www.poliuretanos.com/en/productos/laminados/pur-al.html>.
  130. TSENG, C., YAMAGUCHI, M., OHMORI, T. (1997). Thermal conductivity of polyurethane foams from room temperature to 20 K. *Cryogenics*, 37, 305-312. doi: 10.1016/S0011-2275(97)00023-4.
  131. TSENG, C-J., KUO, K-T. (2002). Thermal Properties of Phenolic Foam Insulation. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 25(6), 753-758. doi: 10.1080/02533839.2002.9670748.
  132. VATIN, N., SULTANOV, S., KRUPINA, A. (2019). Comparison of Thermal Insulation Characteristics of PIR, Mineral Wool, Carbon Fiber, and Aerogel. In V. Murgul and M. Pasetti (Eds.), *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 983, (pp. 877-883). ISSN 2194-5357.

133. VERDEJO, R., STÄMPFLI, R., ALVAREZ-LAINEZ, M., MOURAD, S., RODRIGUEZ-PEREZ, M. A., BRÜHWILER, P. A., SHAFFER, M. (2009). Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 69, 1564-1569. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.07.003.
134. VIOT, H., SEMPEY, A., PAULY, A., MORA, L. (2015). Comparison of different methods for calculating thermal bridges: Application to wood-frame buildings. *Building and Environment*, 93, 339-348. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.07.017.
135. VITKAUSKIENĖ, I., MAKUŠKA, R., STIRNA, U., CABULIS, U. Thermal Properties of Polyurethane-Polyisocyanurate Foams Based on Poly(ethylene terephthalate) Waste. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2011, 17(3), 249-253. ISSN 1392-1320.
136. WALKER, R., PAVÍA, S. (2015). Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings. *Building and Environment*, 94, 155-165. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.07.033.
137. Wang, Y. C., Foster, A. (2017). Experimental and numerical study of temperature developments in PIR core sandwich panels with joint. *Fire Safety Journal*, 90, 1-14. doi: 10.1016/j.firesaf.2017.03.003.
138. Wang, X., Liu, H., Wang, K., Liu, B., Wang, L. (2017). Optimization of Thermal Insulation Performance for the Porous Materials. *Heat Transfer Engineering*, vol. 0, no. 0, 1-9. doi: 10.1080/01457632.2017.1369847.
139. WINKLER-SKALNA, A., ŁOBODA, B. (2020). Determination of the thermal insulation properties of cylindrical PUR foam products throughout the entire life cycle using accelerated aging procedures. *Journal of Building Engineering*, 31, 101348. ISSN: 2352-7102.
140. WU, H-W.; SUNG, W-F.; CHU, H-S. Thermal conductivity of polyurethane foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999, 42, 2211-2217. ISSN: 0017-9310.
141. XU, Q., HONG, T., ZHOU, Z., GAO, J., XUE, L. (2017). The effect of the trimerization catalyst on the thermal stability and the fire performance of the polyisocyanurate-polyurethane foam. *Fire and Materials*, 2018:42, 119-127. doi: 10.1002/fam.2463.
142. Zalewski, L., Lassue, S., Rousse, D., Boukhalfa, K. (2010). Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. *Energy Conversion and Management*, 51, 2869–2877. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.026.
143. Zhang, H., Fang, W-Z., Li, Y-M., Tao, W-Q. (2017). Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams. *Applied Thermal Engineering*, 115, 528-538. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.057.

## 7. CURRICULUM VITAE

Tomas Makaveckas gimė 1987 m. lapkričio 13 d. Kaune. 2006 m. baigęs Garliavos Juozo Lukšos gimnaziją, Kauno technologijos universitete pradėjo mokytis Pastatų inžinerinių sistemų studijų programą, kurią 2010 m. baigė ir įgijo Statybos inžinerijos bakalauro laipsnį. Studijas tęsė Aleksandro Stulginskio universitete, studijuodamas Vandens apsaugos inžineriją, kurią 2012 m. baigęs įgijo Vandens inžinerijos magistro laipsnį. Baigęs studijas dirbo UAB „Manfula“ darbų vykdytoju, vėliau inžinieriumi-projektuotoju. Nuo 2014 m. dėsto paskaitas Alytaus kolegijos studentams bei vadovauja baigiamiesiems darbams, taip pat nuo 2015 m. dirba UAB „Finnfoam“ techniniu konsultantu. Kauno technologijos universiteto, Architektūros ir statybos instituto doktorantas nuo 2017 iki 2021 m.

## 8. STRAIPSNIŲ IR MOKSLINIŲ KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

1. **MAKAVECKAS, Tomas**, BLIŪDŽIUS, Raimondas and BURLINGIS, Arūnas. Determination of the impact of environmental temperature on the thermal conductivity of polyisocyanurate (PIR) foam products. *Journal of Building Engineering*. 2021, vol. 41, p. 1-14. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102447.
2. **MAKAVECKAS, Tomas**, BLIŪDŽIUS, Raimondas and BURLINGIS, Arūnas. The influence of different facings of polyisocyanurate boards on heat transfer through the wall corners of insulated buildings. *Energies*. 2020, vol. 13, iss. 8, p. 1-14. DOI: 10.3390/en13081991.
3. **MAKAVECKAS, Tomas** and BLIŪDŽIUS, Raimondas. The influence of polyisocyanurate (PIR) facing on the heat transfer through the corners of insulated building partitions. *E3S Web of conferences: 12th Nordic symposium on building physics (NSB 2020)*, Tallinn, Estonia, September 6-9, 2020. 2020, vol. 172, p. 1-6. DOI: 10.1051/e3sconf/202017208008.
4. LEVINSKYTĖ, Aurelija, BLIŪDŽIUS, Raimondas, BURLINGIS, Arūnas and **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. 2019, vol. 282, p. 1-7. DOI: 10.1051/matecconf/201928202089.
5. **MAKAVECKAS, Tomas**, BLIŪDŽIUS, Raimondas and LEVINSKYTĖ, Aurelija. Analysis of the variation of thermal conductivity of rigid polyisocyanurate foam (PIR) in the context of aging. *DBMC 2020: XV International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 20-23, October, 2020, Barcelona, Catalonia. / C. Serrat, J. R. Casas, V. Gibert (Eds). Barcelona. 2020, p. 1-8. DOI: 10.23967/dbmc.2020.009.

### Mokslinių konferencijų sąrašas

1. **MAKAVECKAS, Tomas** and BLIŪDŽIUS, Raimondas. The influence of polyisocyanurate (PIR) facing on the heat transfer through the corners of insulated building partitions. *12th Nordic symposium on building physics (NSB 2020)*, Tallinn, Estonia, September 6-9, 2020.
2. **MAKAVECKAS, Tomas**, BLIŪDŽIUS, Raimondas and LEVINSKYTĖ, Aurelija. Analysis of the variation of thermal conductivity of rigid polyisocyanurate foam (PIR) in the context of aging. *DBMC 2020: XV International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 20-23, October, 2020, Barcelona, Catalonia.

## 9. PADEKA

Dėkoju prof. dr. Raimondui Bliūdžiui už puikų vadovavimą doktorantūros studijoms ir visokeriopą pagalbą rengiant publikacijas moksliniams žurnalams ir pranešimus konferencijoms, patarimus ir naudingas diskusijas. KTU ASI Statybinės fizikos laboratorijos vedėjui dr. Karoliui Banioniui ir visam laboratorijos kolektyvui dėkoju už galimybę naudotis visa turima laboratorine įranga ir už konstruktyvias pastabas, kurių sulaukiau visu daktaro disertacijos rengimo metu. Ypač noriu padėkoti KTU ASI Vyresniajam mokslo darbuotojui dr. Arūnui Burlingiui už kantrybę ir pagalbą atliekant eksperimentinius matavimus – be jo pagalbos daugumos tyrimų nebūčiau galėjęs atlikti. Mokslo darbuotojui dr. Juozui Ramanauskui ir Jaunesniajai mokslo darbuotojai Aurelijai Stonkuvienei dėkoju už pastabas ir patarimus rengiant 2.2 ir 3.6 skyrius. Finnfoam Oy generaliniam direktoriui Henri Juhani Nieminen ir Finnfoam UAB vykdomajam direktoriui Egidijus Sutkui dėkoju už palaikymą ir patarimus planuojant tyrimus ir tyrimui suteiktas medžiagas. Šeimai ir draugams dėkoju už moralinį palaikymą, supratimą ir kantrybę.



UDK 699.86+678.664(043.3)

SL 344. 2021-11-19, 13,75 leidyb. apsk. l. Tiražas 16 egz. Užsakymas 281.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas

Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

