

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Ruta Vanaga
Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**KLIMATAM ADAPTĪVAS FASĀŽU SISTĒMAS RISINĀJUMS
GANDRĪZ NULLES ENERĢIJAS ĒKĀM: BIOMIMIKRIJAS
PRINCIPU LIETOJUMS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Vanaga, R. Klimatam adaptīvas fasāžu sistēmas risinājums gandrīz nulles enerģijas ēkām: biomimikrijas principu lietojums. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar Enerģētikas un elektrotehniskas fakultātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2018. gada 1. novembra lēmumu, protokols Nr. 100.

Šī darba izstrādi atbalstīja valsts pētījumu programma “Energoefektīvi un oglekļa mazietilpīgi risinājumi drošai, ilgtspējīgai un klimata mainību mazinošai energoapgādei (LATENERGI)”.

ISBN 978-9934-22-249-8 (print)
978-9934-22-250-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA VIDES ZINĀTNĒ IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda vides zinātnē iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 11. aprīlī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Ainis Lagzdīņš,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Dr. Uli Jakob,
Štutgartes Tehniskā augstskola (*Die Hochschule für Technik Stuttgart*), Vācija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda vides zinātnē iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ruta Vanaga (paraksts)

Datums

Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, kopā 164 lpp. Literatūras sarakstā ir 220 nosaukumi.

SATURS

Lietotie saīsinājumi	5
Ievads	6
Darba mērķis un uzdevumi	7
Pētījuma metodika.....	8
Darba zinātniskā nozīme	8
Darba praktiskais lietojums	9
Darba aprobācija	9
Darba struktūra un apjoms	11
1. Biomimikrijas pieejā balstīta klimatam adaptīvas fasādes sistēmas elementa <i>Bi-SES</i> risinājuma izstrāde.....	12
1.1. Problēmas definēšana	12
1.2. Jautājuma bioloģizēšana.....	12
1.3. Izvirzītie atlases kritēriji	12
1.4. Dabiskā vide vs būvētā vide	13
1.5. Daudzkritēriju analīzes (<i>AHP</i>) lietojums biomimikrijā. Piemērotākās dabas stratēģijas izvēle <i>Bi-SES</i> izstrādei.....	13
1.6. Dabas stratēģiju atdarināšana klimatam adaptīvas fasāžu sistēmas elementa <i>Bi-SES</i> izstrādē.....	16
1.7. Klimatam adaptīvā fasādes sistēmas elementa <i>Bi-SES</i> risinājuma koncepcija	18
2. Klimatam adaptīvās fasādes MODUĻA <i>Bi-SES</i> eksperimentālā izpēte.....	22
2.1. Pirmais eksperiments. Fāžu pārejas materiāla izvēle. Parafīns, sāļi, taukskābes.....	22
2.2. Otrais eksperiments – <i>Bi-SES</i> un atsaucis sienas salīdzinājums.....	30
3. Klimatam adaptīvās fasādes MODUĻA <i>Bi-SES</i> matemātiskā modelēšana	34
3.1. Matemātiskā modelēšana <i>COMSOL Multiphysics</i> vidē, siltuma pārnēses procesu lietojums, lietotie robežnosacījumi.....	34
3.2. Izmantotie vienādojumi	35
3.3. Simulācijas modeļa izvadmērījumi	36
3.4. Simulācijas modeļa validācija	36
3.5. Modelēšanas rezultātu analīze	37
4. Klimatam adaptīvā fasādes moduļa <i>Bi-SES</i> lietojums ēkā.....	41
Secinājumi.....	44
Atsauces	46

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

ES – Eiropas Savienība LV – Latvijas valsts MK – Ministru kabinets <i>netZEB</i> – neto nulles enerģijas ēka (<i>net zero energy building</i>) GNEĒ – gandrīz nulles enerģijas patēriņa ēka (<i>nearly zero energy building</i>) ZEP ēka – zema enerģijas patēriņa ēka IEA – Starptautiskā Enerģētikas aģentūra (<i>International Energy Agency</i>) S/V attiecība – norobežojošo virsmu laukumu attiecība pret apkurināmo tilpumu KAFS – klimata adaptīva fasāžu sistēma (<i>CABS – climate adaptive building shell</i>) <i>Bi-SES</i> – <i>Building Integrated Solar Energy Storage</i>, ēkā integrēta saules enerģijas uzglabāšanas sistēma DSK – diferenciālā skenējošā kalorimetrija DF – dubultā fasāde	<i>EPBD</i> – <i>Energy Performance of Buildings Directive</i>. Direktīva par ēku energoefektivitāti SEG – siltumnīcas efekta gāzes <i>EFTE</i> – etilēntetrafluoretilēns PV – foto voltāžas paneļi <i>LED</i> – (<i>light-emitting diode</i>) gaismas diodes (spuldzes) <i>XPS</i> – ekstrudētais putupolistirēns LS – laurīnskābe SS – stearīnskābe MS – miristīnskābe PS – palmitīnskābe KS – kaprīnskābe FPM – fāžu pārejas materiāli LLMM – Latvijas Laikmetīgās mākslas muzejs <i>AHP</i> – analītiskais hierarhijas process, daudzkritēriju analīzes sistēma (<i>Analytical Hierarchy Process</i>) <i>ASHRAE</i> – <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
n_{50} – gaisa apmaiņas kārtas, attiecinātas uz ēkas tilpumu pie 50 Pa spiediena λ – siltumvadītspēja, W/(m K) U – siltuma caurlaidības koeficients, W/(m²K) ρ – blīvums kg/m³ C_{ap} – vidējais īpatnējā siltumietilpība starp T_i un T_f, J/(kg K) C_{ip} – vidējais īpatnējā siltumietilpība starp T_m un T_i, J/(kg K) C_{sp} – vidējais īpatnējā siltumietilpība starp T_i un T_m, J/(kg K) H_i – komponentes molārais kušanas siltums i kušanas punktā T, J/mol Q – uzkrātā siltuma daudzums, kJ Q_l – absorbētais latentais siltums, J Q_s – absorbētais sajūtais siltums, J R – gāzes konstante 8,314 J/(mol K) T_s – virsmas, temperatūra, °C T_{sur} – apkārtējās vides temperatūra, °C	T_e – eitektiskā punkta temperatūra, K T_f – beigu temperatūra, °C T_i – sākotnējā temperatūra, °C T_{ie} – komponentes kušanas punkts I, K T_m – kušanas temperatūra, °C a_m – izkususi daļa c_i – īpatnējā siltumietilpība katrai i komponentei c_p – īpatnējā siltumietilpība, kJ/kg c_{pm} – modificētā īpatnējā siltumietilpība, kJ/kg h – kušanas latentais siltums, kJ/kg; i – vispārīgi pieņemts kā 1 vai 2 m – materiāla masa, kg m_e – eitektiskā maisījuma masa, g m_{fi} – taukskābju masa, g $wt\%_{fi}$ – masas attiecība vienai taukskābei, % x_i – eitektiskā maisījuma sastāvs, mola procenti Δh_m – kušanas siltums uz vienu masas vienību, J/kg ΔT_m – kušanas temperatūras amplitūda, K ΔH – entalpijas starpība, kJ/kg

IEVADS

Spēkā esošais ES klimata un enerģētikas ietvars līdz 2020. gadam nosaka trīs galvenos mērķus: 1) par 20 % samazināt SEG emisijas, salīdzinot ar 1990. gada līmeni; 2) nodrošināt 20 % atjaunojamo energoresursu lietošanu enerģijas ražošanā; 3) uzlabot energoefektivitāti par 20 %. Ņemot vērā to, ka ēku sektors ir viens no lielākajiem enerģijas patērētājiem un SEG ražotājiem (materiālu ražošana, būvniecība, ēku apkure, dzesēšana), uzlabojot ēku energoefektivitāti, iespējams tuvināties izvirzīto mērķu sasniegšanai.

Ēku sektors ir atbildīgs par 40 % no kopējā EU enerģijas patēriņa, tāpēc tas ir viens no galvenajiem mērķiem energoefektivitātes paaugstināšanai. Eiropas Parlamenta un Padomes 2010. gada 19. maija direktīva 2010/31/ES par ēku energoefektivitāti norāda ietvaru, kāds dalībvalstīm jāievieš, lai samazinātu enerģijas patēriņu un palielinātu atjaunojamo energoresursu (vēlams uz vietas vai tuvumā saražotu) lietošanu ēku sektorā – visām dalībvalstīm jānodrošina, ka līdz 2020. gada 31. decembrim visas jaunās ēkas ir gandrīz nulles enerģijas ēkas (GNEĒ). GNEĒ minimālās energoefektivitātes prasības nosaka katra dalībvalsts, pamatojoties uz pozitīvu ieguldījumu un ekspluatācijas izmaksu attiecību aplēstajā ēkas kalpošanas laikā. Latvijas likumdošanā noteiktais GNEĒ līmenis ir $< 45 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ g})$ energoefektivitātes novērtējums apkurei. Ēkās, kas viegli pakļaujas zema enerģijas patēriņa ēku projektēšanas principiem (veiksmīga arhitektoniskā kompozīcija, norobežojošo konstrukciju laukuma un ēkas apkurināmā tilpuma attiecība, novietojums pret debespusēm, saules siltuma ieguvumu izmantošana, stikloto un necaurspīdīgo virsmu attiecība), sasniegt izvirzītās prasības būs ekonomiski pamatoti. Turpretī ēkās, kas sastopas ar funkcionāliem vai tehniskiem ierobežojumiem principu lietošanā, sasniegt GNEĒ līmeni ar tradicionāliem energoefektivitātes paaugstināšanas paņēmieniem var nebūt ekonomiski pamatoti.

Šobrīd tirgū pieejami siltumizolācijas produkti ar divkārt uzlabotām siltumtehnikajām vērtībām (poliuretāns, poliizocianurāts $\sim 0,023 \text{ W}/(\text{m K})$), tuvā nākotnē ikdienas lietošanā var tikt ieviesti jau izstrādāti “superizolācijas materiāli” ar vadītspēju, kas uzlabota vēl divkārt (aerogēls $\sim 0,013 \text{ W}/(\text{m K})$) vai pat desmitkārt (vakuuma paneļi $\sim 0,0035 \text{ W}/(\text{m K})$). Liela loma energoefektivitātes paaugstināšanā ir efektīvām gaisa apstrādes iekārtām, šobrīd ventilācijas sistēmu efektivitāte ievērojami uzlabota un spēj nodrošināt pat 93 % siltuma atgūšanu. Tomēr minēto tradicionālo energoefektivitātes risinājumu uzlabošanas iespējas tuvojas izsīkumam (uzlaboti siltumvadītspējas rādītāji siltumizolācijas materiāliem, logu siltumtehnikās īpašības, ventilācijas sistēmu efektivitāte), tādēļ nepieciešams ieviest konceptuāli jaunus risinājumus ēku energoefektivitātei. Starptautiskā Enerģētikas aģentūra (IEA) norāda nepieciešamību pēc ēku energofleksibilitātes – spējas pārvaldīt enerģijas nepieciešamību un ražošanu saskaņā ar vietējiem klimatiskajiem apstākļiem, lietotāju vajadzībām un tīkla prasībām. Kā viens no risinājumiem ir enerģijas ražošana *on-site* un uzkrāšana ēkas norobežojošās konstrukcijās.

Šobrīd jāveic pāreja no ēku norobežojošajām konstrukcijām ar statiskām īpašībām uz tādām, kas nodrošina pieprasījumam atbilstošu dinamiku. Klimatam adaptīvas fasāžu sistēmas (KAFS) piedāvā risinājumu – norobežojošās konstrukcijas ar dinamiskiem siltumtehnikajiem parametriem. Tām ir spēja atkārtoti un atgriezeniski mainīt dažas no tās funkcijām, reaģējot

uz mainīgām siltumtehnikām prasībām un dažādām robežvērtībām, ar mērķi uzlabot kopējo ēkas energoefektivitāti.

Lai meklētu inovatīvus KAFS risinājumus, konceptuāli jaunas idejas var iegūt, izmantojot biomimikrijas pieeju. Tā rosina iedvesmu cilvēku problēmu risināšanai meklēt dabā, kur “risinājumi” pilnveidoti 3,8 miljardu gadu laikā. Atbilstoši biomimikrijas metodikai, izstrādājot risinājumus, var iet divus ceļus: 1) problēma – bioloģija, kad sākotnēji tiek definēta problēma, kurai nepieciešams risinājums, un pēc tam meklēti risinājumi dabā; vai 2) bioloģija – risinājums, kad ideja dabā kalpo par paraugu iepriekš nedefinētam risinājumam. Promocijas darba pamatā sekots pirmajai pieejai. Definētā problēma ir “izveidot klimatam adaptīvu, inovatīvu ēku norobežojošo konstrukciju, kas aktīvi līdzdarbojas konstanta iekštelpu mikroklimata (temperatūras) nodrošināšanā, uzkrājot saules enerģiju”.

Meklējot risinājumus dabā, tikai pētītas termoregulācijas dzīvās būtnēs, vairāk koncentrējot uzmanību uz ziemeļu klimata dzīvniekiem. Ēkas norobežojošās konstrukcijas, līdzīgi dzīvnieku ādai, ir kā starpslānis starp iekšējo vidi, kur jānodrošina konstanta temperatūra, un ārējo vidi, kas pakļauta mainīgiem ārējiem apstākļiem. Tādēļ iedvesma tika meklēta dzīvnieku termoregulācijas stratēģijās, īpaši pievēršot uzmanību procesiem, kas norisinās dzīvnieku ādā un slāņos zem tās.

DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt konceptuāli jaunu klimatam adaptīvu norobežojošo konstrukciju risinājumu, izmantojot inovatīvas pētniecības metodes. Konstrukcijas galvenais uzdevums ir efektīvi savākt, uzglabāt un nodot telpai saules siltuma enerģiju. Piedāvātajam risinājumam jāspēj reaģēt uz izmaiņām apkārtējās vides klimatiskajos apstākļos. Tam jāpaplašina ēkas enerģētiskā fleksibilitāte, atbalstot IEA izvirzītās prioritātes.

Lai sasniegtu mērķi, tika izvirzīti vairāki uzdevumi.

1. Risinājuma izstrādē sekot biomimikrijas metodikai.
2. Apkopot dabā sastopamās termoregulācijas stratēģijas konstantas iekšējās vides temperatūras uzturēšanai.
3. Noteikt piemērotāko dabas stratēģiju atdarināšanai saules siltumu uzkrājošu konstrukciju izstrādē.
4. Izstrādāt priekšlikumu klimatam adaptīvu norobežojošo konstrukciju risinājumam.
5. *COMSOL Multiphysics 5.1.* vidē veikt izstrādātā KAFS risinājuma matemātisko modelēšanu un simulāciju.
6. Izgatavot izstrādātā KAFS priekšlikuma prototipu, veikt eksperimentu reālos klimatiskajos apstākļos.
7. Ar eksperimentā iegūtajiem datiem veikt aprēķina modeļa validāciju.
8. Apskatīt izstrādātā klimatam adaptīvā norobežojošo konstrukciju risinājuma iestrādes piemēru ēkā.

PĒTĪJUMA METODIKA

Promocijas darbā izmantotas gan kvalitatīvās, gan kvantitatīvās zinātniskās pētniecības metodes: literatūras apskats, gadījuma izpēte, datu vākšana un analīze; izvirzītās hipotēzes pārbaudei veikti gan eksperimenti dabā, gan laboratorijas eksperimenti un matemātiskā modelēšana.

Sākot pētījumu, veikta zinātniskās literatūras analīze, apkopojot Latvijas un ES ēku energoefektivitātes normatīvos aktus un izvirzītos mērķus, apskatot jaunākos inovatīvos norobežojošo konstrukciju risinājumus un attīstības virzienus.

Lai ar biomimikrijas metodi radītu inovatīvu norobežojošo konstrukciju risinājumu ar klimata adaptīvām īpašībām, pētījumā apskatītas dažādas termoregulācijas stratēģijas dabā un, izmantojot daudzkritēriju analīzi, noteikta stratēģija ar lielāko potenciālu atdarināšanai konceptuāli jauna norobežojošo konstrukciju risinājuma izstrādē.

Otrajā nodaļā izstrādāta inovatīva, siltumenerģiju uzkrājoša norobežojošo konstrukciju risinājuma koncepcija, kas balstīta dabā sastopamu termoregulācijas stratēģiju atdarināšanā. Trešajā nodaļā aprakstīta prototipa izveide un veiktais eksperiments. Pētījumā veikti divi eksperimenti: 1) dažādu fāžu pārejas materiālu salīdzināšana; 2) fasādes moduļa testēšana laboratorijas apstākļos. Ceturtajā nodaļā veikta izstrādātās koncepcijas matemātiskā modelēšana *COMSOL* programmatūrā un verificēšana ar eksperimentālajiem datiem. Piektajā nodaļā atspoguļots izstrādātā risinājuma lietojums ēkā.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOZĪME

Promocijas darba tēma ir zinātniski nozīmīga gan Latvijas, gan arī starptautiskā mērogā, jo konceptuāli jaunu ēku energoefektivitātes uzlabošanas risinājumu izstrāde šobrīd ir ļoti aktuāla, ņemot vērā globālās sasilšanas riskus un Eiropas Savienības vadlīnijas ēku energoefektivitātes paaugstināšanai.

- Pirmo reizi Latvijā izstrādāts biomimikrijas pieejā balstīts ēkas norobežojošo konstrukciju risinājums.
- Izstrādāta metodika daudzkritēriju analīzes lietojumam biomimikrijas pieejā.
- Izstrādāts inovatīvs klimatam adaptīva fasādes moduļa prototips.
- Aprobēta dažādu fāžu pārejas materiālu un siltumvadītspējas paātrinātāju lietošana klimatam adaptīvā fasādes modulī.
- Izstrādāta metodoloģija klimatam adaptīvā fasādes moduļa integrēšanai ēkā.

Darbs var kalpot kā piemērs vairākos aspektos. Pirmkārt, biomimikrijas metodikas izmantošanai jaunu risinājumu izstrādē. Otrkārt, daudzkritēriju analīzes izmantošanai, izvērtējot dažādus iespējamus attīstības virzienus, nosakot virzienu ar lielāko potenciālu. Treškārt, izvēloties piemērotāko fāžu pārejas materiālu izmantošanai norobežojošajās konstrukcijās. Un, ceturtkārt, darbā izstrādātais klimatam adaptīvais norobežojošo konstrukciju modulis var kalpot par pamatu citu ēku energoefektivitāti paaugstinošu adaptīvu risinājumu izstrādei.

DARBA PRAKTISKAIS LIETOJUMS

Promocijas darbam ir augsta praktiskā vērtība. Izstrādātais klimatam adaptīvais norobežojošo konstrukciju risinājums nav lokāls, tas lietojams visā mērenajā klimatiskajā joslā. Iegūtie rezultāti sniedz jaunu informāciju par dažādu fāžu pārejas materiālu uzvedību reālos klimatiskajos apstākļos, par dažādu metālu izmantošanu fāžu pārejas paātrināšanai, par kompleksa, vairāku komponentu fasādes moduļa uzvedību reālos klimatiskajos apstākļos.

Promocijas darba rezultāti var tikt izmantoti, lai veicinātu gan biomimikrijas metodes lietošanu, gan arīvien jaunu risinājumu izstrādi norobežojošajām konstrukcijām, lai piešķirtu tām dinamiskas īpašības un nodrošinātu pozitīvu enerģijas pienesumu kopējai ēkas enerģijas bilancei. Veiktais pētījums var būt lietderīgs, izstrādājot jaunas ēku energoefektivitātes novērtēšanas aprēķina metodes, iekļaujot kopējā bilancē norobežojošo konstrukciju spēju uzkrāt enerģiju.

DARBA APROBĀCIJA

Promocijas darba rezultāti atspoguļoti zinātniskajās publikācijās.

1. Vanaga, R., Blumberga, A., Freimanis, R., Mols, T., Blumberga, D. Solar Facade Module for Nearly Zero Energy Building. "Energy", 2018, Vol. 157, 1025.–1034. lpp. ISSN 0360-5442. Pieejams: doi:10.1016/j.energy.2018.04.167.
2. Biseniece, E., Žogla, G., Kamenders, A., Purviņš, R., Kašs, K., Vanaga, R., Blumberga, A. Thermal Performance of Internally Insulated Historic Brick Building in Cold Climate: A Long Term Case Study. "Energy and Buildings", 2017, Vol. 152, 577.–586. lpp. ISSN 0378-7788. Pieejams: doi:10.1016/j.enbuild.2017.07.082.
3. Vanaga, R., Blumberga, A., Gušča, J., Blumberga, D. Choosing the best nature's strategy with the highest thermodynamical potential for applicatin in building thermal envelope using MCA analysis. No: "Energy Procedia", Ķīna, Shanghai, 5.–7. jūnijs, 2018. Germany: Elsevier, 2018, 450.–455. lpp. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2018.09.252.
4. Mols, T., Dzene, K., Vanaga, R., Freimanis, R., Blumberga, A. Experimental Study of Small-Scale Passive Solar Wall Module with Phase Change Material and Fresnel Lens. No: "Energy Procedia", Latvija, Rīga, 16.–18. maijs, 2018. Germany: Elsevier, 2018, 467.–473. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2018.07.048.
5. Vanaga, R., Purviņš, R., Blumberga, A., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Heat Transfer Analysis by Use Of Lense Integrated in Building Wall. No: "Energy Procedia", Latvija, Rīga, 10.–12. maijs, 2017. Germany: Elsevier, 2017, 453.–460. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.030.
6. Zamovskis, M., Vanaga, R., Blumberga, A. Mathematical Modelling of Performance of New Type of Climate Adaptive Building Shell. No: "Energy Procedia", Latvija, Rīga, 12.–14. oktobris, 2016. Germany: Elsevier, 2017, 270.–276. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.04.065.
7. Kancane, L., Vanaga, R., Blumberga, A. Modeling of Building Envelope's Thermal Properties by Applying Phase Change Materials. "Energy Procedia", 2016, Vol. 95, 175.–180. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2016.09.041.
8. Kamenders, A., Rušenieks, R., Vanaga, R., Rochas, C., Blumberga, A. Nearly Zero Energy

Building (nZEB) in Latvia. No: "9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE): Selected Papers", Lietuva, Vilnius, 22.–24. maijs, 2014. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Press Technika, 2014, 1.–8. lpp. e-ISBN 978-609-457-640-9. e-ISSN 2029-7092. Pieejams: doi:10.3846/enviro.2014.263.

9. Vanaga, R., Blumberga, A. First Steps to Develop Biomimicry Ideas. "Energy Procedia", 2015, Vol. 72, 307.–309. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2015.06.044.

Promocijas darba rezultāti atspoguļoti konferencēs.

1. Blumberga, A., Biseniece, E., Purviņš, R., Kamenders, A., Žogla, G., Blumberga, D., Vanaga, R. Vēsturisko ēku energoefektivitātes paaugstināšana aukstajā klimatiskajā zonā. Caturtais pasaules latgališu saīts. Latgolys symtgadis kongress, Latvija Rēzekne, 05.05.2017.
2. Vanaga, R., Blumberga, A., Gušča, J., Blumberga, D. Choosing the best nature's strategy with the highest thermodynamical potential for applicatin in building thermal envelope using MCA analysis. CUE2018-Applied Energy Symposium and Forum 2018: Low carbon cities and urban energy systems, Ķīna, Shanghai, 06.06.2018.
3. Mols, T., Dzene, K., Vanaga, R., Freimanis, R., Blumberga, A. Experimental Study of Small-Scale Passive Solar Wall Module with Phase Change Material and Fresnel Lens. No: "Energy Procedia", International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies, CONECT 2018, Latvija, Rīga, 16.05.2018.
4. Vanaga, R., Purviņš, R., Blumberga, A., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Heat Transfer Analysis by Use Of Lense Integrated in Building Wall. International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2017, Rīga, Latvija 10.05.2017.
5. Zamovskis, M., Vanaga, R., Blumberga, A. Mathematical Modelling of Performance of New Type of Climate Adaptive Building Shell. International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2016, Riga, Latvia, 12.10.2016.
6. Kancane, L., Vanaga, R., Blumberga, A. Modeling of Building Envelope's Thermal Properties by Applying Phase Change Materials. International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2015, Rīga, Latvija, 14.10.2015.
7. Kamenders, A., Rušenieks, R., Vanaga, R., Rochas, C., Blumberga, A. Nearly Zero Energy Building (nZEB) in Latvia. "9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE): Selected Papers", Viļņa, Lietuva, 22.05.2014.
8. Kamenders, A., Vanaga, R., Biseniece, E., Blumberga, A. Cost-Optimal Energy Performance Level for Apartment Buildings in Latvia. "27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014)", Somija, Turku, 15.06.2014.
9. Vanaga, R., Blumberga, A. First Steps to Develop Biomimicry Ideas. "Energy Procedia", International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2014, Rīga, Latvija. 14.10.2014.
10. Vanaga, R., Kamenders, A., Krauklis, E. Reaching EnerPHit Standard Using Holistic Approach. "17th International Passive House Conference 2013", Vācija, Frankfurt, 19.–20. aprīlis, 2013.
11. Kamenders, A., Vanaga, R., Krauklis, E. Post-Occupancy Evaluation of Dormitory Building with Aim of EnerPHit Renovation. "17th International Passive House Conference 2013", Vācija, Frankfurt, 19.–20. aprīlis,

Citas publikācijas

1. Kalniņš, S., Gušča, J., Valtere, S., Vanaga, R., Blumberga, D. Transition to Low Carbon Society. Evaluation Methodology. "Agronomy Research", 2014, Vol. 12, No. 3, 851.–862. lpp. ISSN 1406-894X.
2. Timma, L., Vilgerts, J., Vanaga, R., Kļavenieks, K., Blumberga, D. Decomposition Analysis Based on IPAT and Kaya Identity for Assessment of Hazardous Waste Flow within Enterprise. No: "27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems: Conference Proceedings", Somija, Turku, 15.–19. jūnijs, 2014. Turku: 2014, 1.–7. lpp.
3. Vanaga, R., Kamenders, A., Krauklis, E. Reaching EnerPHit Standard Using Holistic Approach. No: "17th International Passive House Conference 2013", Vācija, Frankfurt, 19.–20. aprīlis, 2013. Frankfurt: Passive House Institute, 2013, 149.–150. lpp. ISBN 9783000413469.
4. Kamenders, A., Vanaga, R., Krauklis, E. Post-Occupancy Evaluation of Dormitory Building with Aim of EnerPHit Renovation. No: "17th International Passive House Conference 2013", Vācija, Frankfurt, 19.–20. aprīlis, 2013. Frankfurt: Passive House institute, 2013, 533.–538. lpp. ISBN 9783000413469.

DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs rakstīts latviešu valodā. Tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, izmantotās literatūras saraksts. Promocijas darba ievadā pamatota tēmas aktualitāte, izvirzīts darba mērķis un tā īstenošanai veicamie uzdevumi, kā arī aprakstīta pētījuma zinātniskā un praktiskā nozīme. Promocijas darba pirmajā nodaļā analizēta esošā situācija ēku energoefektivitātes jomā, virzoties uz gandrīz nulles enerģijas patēriņa ēku ieviešanu, un apskatīti jaunākie risinājumi, uzlabojot norobežojošo konstrukciju siltumtehnikās īpašības. Darba otrajā nodaļā aprakstīta inovatīva klimatam adaptīva norobežojošo konstrukciju risinājuma koncepcija, kas izstrādāta, balstoties uz biomimikrijas metodi. Darba trešajā nodaļā aprakstīta prototipa izgatavošana un veiktie eksperimenti. Darba ceturtajā nodaļā aprakstīta prototipa matemātiskā modelēšana un salīdzināšana ar eksperimenta datiem. Darba piektajā nodaļā aprakstīts izstrādātā prototipa iespējamais lietojums reālā ēkā. Promocijas darba noslēgumā apkopoti gūtie secinājumi. Literatūras apskats publicēts promocijas darba pilnajā versijā, kopsavilkumā tas nav iekļauts.

1. BIOMIMIKRIJAS PIEEJĀ BALSTĪTA KLIMATAM ADAPTĪVAS FASĀDES SISTĒMAS ELEMENTA *BI-SES* RISINĀJUMA IZSTRĀDE

Biomimikrijai divas pretējas pieejas – dizaina spirāles [1]: 1) “no problēmas uz bioloģiju” definē tehnoloģisku “problēmu” un meklē atbildi dabā; 2) “no bioloģijas uz dizainu” aplūko stratēģiju dabā un meklē piemērotu lietojumu.

Klimatam adaptīvas fasāžu sistēmas modulis *Bi-SES* (*Building Integrated Solar Energy Storage*) tiks izstrādāts, sekojot biomimikrijas dizaina spirālei „No problēmas un bioloģiju”. Turpmākas izstrādes gaitā tiks veikti šādi uzdevumi:

- 1) definē problēmu;
- 2) “bioloģizēt” jautājumu;
- 3) izvirza atlases kritērijus;
- 4) atrod piemērotas stratēģijas dabā;
- 5) ar daudzkritēriju analīzi nosaka stratēģiju ar lielāko potenciālu;
- 6) atdarina dabas stratēģiju norobežojošās konstrukcijas uzbūvē.

1.1. Problēmas definēšana

Promocijas darbā definēta šāda problēma: “Norobežojošā konstrukcija, kas var piedalīties ēkas enerģijas bilancē, nodrošinot saules enerģijas uzkrāšanu.”

1.2. Jautājuma bioloģizēšana

Atbilstoši biomimikrijas metodikai, pirms meklēt risinājumus dabā, nepieciešams “bioloģizēt” jautājumu. Būvniecības tehnoloģiju terminoloģiju jāpielāgo bioloģijai [2].

1.1. tabula

Tehniskās prasības saules siltuma enerģiju uzglabājošai fasādei

Funkcija	Tehniskie mērķi	Bioloģizētie jautājumi
Minimāli siltuma zudumi	Augsta siltuma pretestība	Norobežojošās čaulas ar augstu siltuma pretestību
	Adaptīva siltuma pretestība	Norobežojošās čaulas ar adaptīvu siltuma pretestību
Maksimāli siltuma ieguvumi	Saules enerģijas caurlaidība	Saules siltuma enerģijas caurlaidība
	Sekošana saules virzienam	Sekošana saulei
	Ieguvumi difūza starojuma apstākļos	Nemainīga izsauļojuma uzturēšana Difūza starojuma uztveršana
	Siltuma radīšana	Reaģēšana mainīgiem apstākļiem Siltuma ražošanas procesi dzīvajos organismos
Enerģijas apmaiņa konstrukcijā	Enerģijas uztveršana	Enerģijas ražošana dzīvajos organismos, sezonālās izmaiņas
	Enerģijas uzglabāšana	Enerģijas uzglabāšanas medijs dzīvajos organismos
	Enerģijas atdošana	Siltuma apmaiņas procesi

1.3. Izvirzītie atlases kritēriji

Lai meklētu piemērotākās stratēģijas dabā, turpmāk uzsvars likts uz dzīvo organismu termoregulācijas procesiem ar galveno akcentu uz ziemeļu klimata dzīvajiem organismiem. Izvirzīti vairāki atlases kritēriji.

Dabas stratēģiju atlases kritēriji

Funkcija	Kritērijs
Enerģijas ražošana	Metaboliskie procesi Termoregulācija
Enerģijas uzkrāšana	Sezonālās atšķirības metaboliskajos un termoregulācijas procesos
Enerģijas aprites procesu adaptācija ārējiem apstākļiem	Termoregulācijas optimizēšanas procesi Pielāgošanās mainīgiem apstākļiem

1.4. Dabiskā vide vs būvētā vide

Daba var kalpot kā iedvesmas avots ēku energoefektivitātes paaugstināšanai. Pastāv līdzības starp būvētām un dabiskām vidēm. Ēkas ārējā čaula veido robežu starp iekšējiem apstākļiem un apkārtējo vidi, betēku inženiertehniskās sistēmas – apkure, dzesēšana, ventilācija – uztur nemainīgus komforta iestatījumus. Analogi ir endotermiskiem dzīvniekiem – vielmaiņa nodrošina gandrīz nemainīgu ķermeņa temperatūru, saskaroties ar vides temperatūras svārstībām. Pastāv plašs termoregulācijas stratēģiju klāsts dzīvajos organismos – palielināta/samazināta vielmaiņa, ziemas guļa; siltuma zudumu palielināšana/samazināšana ar asinsrites sistēmas palīdzību u. c. Veģetācijai piemīt cita spēja – absorbēt CO₂ un atbrīvot O₂, ļaujot samazinātu gaisa apmaiņu un ar to saistītos siltuma zudumus izelpotā CO₂ dēļ. Šīs un citas stratēģijas var kalpot kā iedvesma, lai atrisinātu vajadzību – uzturēt nemainīgu iekštelpu mikroklimatu. Mikroklimatam ir trīs galvenās komponentes – temperatūra, mitrums un gaisapmaiņa. Šajā darbā apskatīta tikai iekštelpu temperatūra, un par optimālu tiks uzskatīta temperatūra +22 °C [3]–[12].

Konstantas temperatūras uzturēšanai ēkā ir nepieciešama enerģija – gan apsildei, gan dzesēšanai. Siltuma avots – iekšējais, kā endotermiem dzīvniekiem. Siltuma apgādes sistēmu uzskatīsim par vielmaiņu, kur ar kurināmo uzņemtajam enerģijas apjomam atbilstošā daudzumā tiek saražots siltums. Par termoneitrālo zonu ar nemainīgu vielmaiņas līmeni uzskatīsim periodu gadā, kad ēkai nav nepieciešama ne apsilde, ne dzesēšana; “vielmaiņas ātrums” ir konstants un vienāds ar nulli. Zemākā āra gaisa temperatūra, kad jāceļ “vielmaiņas ātrums” (jāuzsāk siltuma ražošana), ir +8 °C piecas dienas no vietas. Vasaras sezonu Latvijas klimatā ēkās bez prasībām telpu temperatūrai var “pārciest”, “vielmaiņas ātrumu” saglabājot termoneitrālajā zonā. Ziemas sezonu, nepalielinot “vielmaiņas ātrumu”, pārciest nav iespējams. Āra gaisa temperatūras svārstības vasarā ir daudz tuvākas vēlamajai iekštelpu temperatūrai nekā ziemā. Tādēļ, meklējot dabas stratēģiju, akcents likts uz aukstuma pārvarēšanu.

Pētījumā apskatītas dažādas termoregulācijas stratēģijas. Par piemērotākajām atdarināšanai norobežojošajās konstrukcijās šajā pētījumā atzītas – trāns, asinsrites sistēma, āda un augu valsts pārziemošanas stratēģija. Lai izvēlētos piemērotāko, veikta daudzkritēriju analīze.

1.5. Daudzkritēriju analīzes (AHP) lietojums biomimikrijā. Piemērotākās dabas stratēģijas izvēle BI-SES izstrādei

Biomimikas dizaina spirāle ir sarežģīta kritēriju un alternatīvu hierarhija, kur jāizvēlas viena no iespējām – tipiska daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas (MCDM) problēma [13], [14]. “No problēmas uz bioloģiju” metodikā pēc problēmas definēšanas seko jautājumu bioloģizēšanas fāze (kritēriju atlase) un atbilstošu dabas stratēģiju meklēšana (alternatīvu

atlase). Ja alternatīvas ir vairākas, jāizvēlas piemērotākā atbilstoši kritērijiem un mērķim. Šajā etapā var palīdzēt daudzkritēriju analīze. Kā piemērotākā izvēlēta *AHP* metode, jo mērķis nav izslēgt kādu no alternatīvām, bet iegūt pilnu ainu – kurai no alternatīvām, kurā kritērijā ir labākais sniegums, un izpētīt, kā veidojas alternatīvu ranžēšanas hierarhiskā novērtējuma struktūra.

Pētījuma mērķis ir izstrādāt inovatīvu norobežojošo konstrukciju risinājumu, kas spēj pielāgoties iekštelpu mikroklimata prasību un ārējo laikapstākļu izmaiņām. Konstrukcijas izveidei par būtiskiem atzīti šādi kritēriji:

1.3. tabula

Kritēriji inovatīvām klimatam adaptīvām norobežojošajām konstrukcijām

Kritēriji	Definīcija
1 Pārvades siltuma zudumi	Pirmā ēkas enerģijas bilances komponente ir pārvades siltuma zudumi caur norobežojošajām konstrukcijām. Ir steidzama nepieciešamība pēc jauniem risinājumiem siltuma pārvades jomā, jo, uzlabojot esošos risinājumus, nav paredzams tehnoloģisks izrāviens. Esošie risinājumi daudzos gadījumos nenodrošina ekonomiski pamatotu zema enerģijas patēriņa ēku līmeņa sasniegšanu. Nepieciešams līdz minimumam samazināt pārvades siltuma zudumus.
2 Ventilācijas siltuma zudumi	Otrā komponente ēkas enerģijas bilancē ir ventilācijas siltuma zudumi (ventilācija un infiltrācija). Ventilācijas gaisa daudzums ir saistīts lietotājam nepieciešamo svaigā gaisa pieplūdi, lai aizvietotu piesārņoto gaisa daudzumu (izelpa (CO ₂), gaistošās vielas, piesārņojuma avoti). Infiltrācija saistīta ar gaisa ieplūšanu ēkā caur konstrukciju un neblīvumiem tajā. Katru norobežojošo konstrukciju ēka var raksturot ar gaisa caurlaidības rādītāju.
3 Saules siltuma ieguvumi	Trešā komponente ēkas enerģijas bilancē ir saules siltuma ieguvumi. Saules siltuma ieguvumi ir ļoti svarīgi zema enerģijas patēriņa ēku projektēšanā. Caur pareizi orientētiem logiem ziemas sezonā siltuma ieguvumu ir vairāk nekā zudumu – tie sedz daļu apkurei nepieciešamās enerģijas. Tādēļ inovatīvam norobežojošo konstrukciju risinājumam jāizmanto saules siltuma enerģija.
4 Siltuma inerce	Ēkas siltuma inerci raksturo norobežojošo konstrukciju siltumietilpība. Tai ir sekundāra ietekme uz ēkas enerģijas bilanci. Ēkas masivitāte nosaka, kādu daļu no siltuma ieguvumiem iespējams lietderīgi izmantot, samazinot enerģijas patēriņu ēkas apkurei vai dzesēšanai. Ēkas ar augstu siltumietilpību ir noturīgākas attiecībā pret āra gaisa temperatūras svārstībām gan vasarā, gan ziemā, radot patīkamāku mikroklimatu ēkā.
5 Enerģijas uzglabāšana	Enerģijas uzglabāšana norobežojošajās konstrukcijās ir konceptuāli jauns risinājums ēku enerģijas bilancei. Tā ir viena no stratēģijām vasaras enerģijas pārpalikuma uzkrāšana ziemas periodam, kas ļautu ēkām kļūt energo neitrālām gada griezumā (nepatērējot vairāk nekā uzglabāts).
6 Enerģijas ražošana	Ēkas norobežojošajās konstrukcijās integrētas enerģijas ražošanas tehnoloģijas ir cits samērā jauns koncepts. Šobrīd sastopami daudzi piemēri ar <i>BIPV</i> (<i>Building Integrated PhotoVoltaic</i>) ēkā iebūvētām foto voltāžas sistēmām.
7 Mainīgas virsmas īpašības	Mainīgas virsmas īpašības varētu samazināt apkurei un dzesēšanai nepieciešamo enerģiju, pateicoties izmaiņām materiālu emisivitātes rādītājos. Piemēram, dzesēšanas sezonai būtu piemērotas gaišas, atstarojošas krāsas, bet apkures sezonā materiāliem jāabsorbē maksimāli daudz enerģijas, tādēļ krāsai nepieciešams būt tumšai.

Pētījumā ir izvēlētas četras vispārīgas termoregulācijas stratēģijas, lai ar daudzkritēriju analīzi izvēlētos stratēģiju, kurai ir lielākais potenciāls kļūt par iedvesmu inovatīvam klimatam adaptīvām norobežojošo konstrukciju risinājumam. Daudzkritēriju lēmumpieņemšanas metodes nedod labāko iespējamo alternatīvu no bezgalīga alternatīvu spektra. Tā atspoguļo ekspertiem nozīmīgas izvēles [13], [14].

Alternatīvas – klimatam adaptīvām fasāžu sistēmām piemērotas termoregulācijas stratēģijas dabā

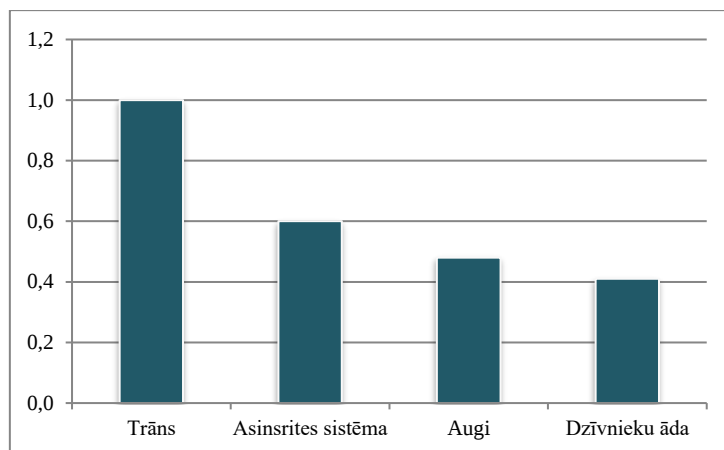
	Alternatīva	Definīcija
1	Zemādas tauku slānis – trāns	Trāns ir labi apasiņots zemādas tauku slānis, kas sastopams vaļveidīgajos jūras dzīvniekiem un kalpo gan kā izolators, gan metaboliskās enerģijas uzglabāšanas substance. Tauku slāņa biezums un sastāvs ir sezonāli mainīgs, un tā uzbūve nav viendabīga – ārējam slānim ir zemāka siltumvadītspēja nekā iekšējam slānim.
2	Asinsrites sistēma	Asinsrites sistēmai ir svarīga loma termoregulācijas procesos – tā nodrošina konvektīvo siltuma apmaiņu organismos. Konvekcija ir daudz efektīvāks siltuma apmaiņas process nekā pārvade. Asinsrites sistēma samazina vai palielina siltuma zudumus. Tā ir spējīga pielāgoties izmaiņām, izmantojot mainīgus cirkulācijas loku garumus, apejas (<i>by-pass</i>), cirkulācijas ātrumu, un var pielāgoties sezonāli, dienu un stundu griezumā.
3	Āda	Dzīvnieku ādai dažādos klimatiskajos apstākļos ir dažādas īpašības – absorbēt saules radiāciju (ledus lāči) vai izmantot to kā dzesējošu virsmu (ziloņi). Daži dzīvnieki var mainīt virsmas krāsu – no melnas, kad nepieciešams absorbēt saules enerģiju, uz atstarojošu pārklājumu, kad nepieciešams dzesēties. Vēžveidīgie savukārt maina krāsu, izkliedējot vai samazinot pigmentu saturošus hromatoforus. Šī alternatīva ietver arī apspalvojumu, jo tas ir cieši saistīts ar procesiem ādā (piloerēcija).
4	Augu augšanas un pārziemošanas stratēģijas	Neraugoties uz to, ka dzīvnieku termoregulācijas stratēģiju līdzība ar procesiem ēkā ir izteikta, augu pastāvēšanas un pārziemošanas stratēģijas arī var kalpot par iedvesmu inovatīvam norobežojošo konstrukciju risinājumam. Augi pārziemo, pielāgojot šūnu sastāvu, stiprinot šūnu membrānas, veidojot pretaizsalšanas vielas, ievaskojot mūžzaļo augu skuju virsmas. Augu dzīves cikla stratēģijas varētu būt noderīgas ēku energoefektivitātei, jo augu šūnās notiek fotosintēzes procesi un CO ₂ uztveršanas un O ₂ ražošanas procesi.

Biomimikrijā pēc jautājumu bioloģizēšanas posma seko dabas procesu pētīšana un būtības izprašana. Dažādu alternatīvu gadījumā jāizvēlas piemērotākā stratēģija, ko turpināt pētīt nākamajos posmos, atdarinot dabas stratēģiju tehnoloģiskos risinājumos. Iepriekš definētais mērķis, kritēriji (bioloģizētie jautājumi) un alternatīvas (dabas stratēģijas) ir kompleksas lēmumpieņemšanas hierarhijas sastāvdaļas.

1.5.1. Rezultāti, secinājumi

AHP iegūtās prioritātes rāda, ka svarīgākais kritērijs inovatīvu klimatam adaptīvu norobežojošo konstrukciju izveidei, atspoguļojot autores izvēles, ir enerģijas uzglabāšana. Nākamais svarīgākais kritērijs ir siltuma inerces un par daudz mazāk svarīgiem atzīti pārējie kritēriji. Kopējās prioritātes katrai alternatīvai iegūst, reizinot ar attiecīgā kritērija svaru un summējot svērtās lokālās prioritātes.

Kopējās alternatīvu prioritātes rāda, ka trāns ir daudzsoļīgākā termoregulācijas stratēģija atdarināšanai inovatīvos klimatam adaptīvos norobežojošo konstrukciju risinājumos saskaņā ar autores zināšanām par izvēlētajām alternatīvām un iegūtajiem kritēriju svāriem. Otra perspektīvākā dabas stratēģija ir asinsrites sistēma. Augiem un dzīvnieku ādai kopumā ir zemāks potenciāls. Lai arī atsevišķos kritērijos (enerģijas ražošana, saules siltuma ieguvumi) augiem un dzīvnieku ādai ir augstākais vērtējums, šiem kritērijiem konkrētajā darba uzdevumā piešķirts zemāks svars, tādēļ kopējās prioritātēs augu un dzīvnieku ādas stratēģijas novērtētas zemāk. Mainoties kritēriju svāriem, mainītos arī kopējās iegūtās prioritātes. Šajā uzdevumā par galvenajiem kritērijiem tika izvirzīti tādi, kas norobežojošajām konstrukcijām pievienotu jaunas, dinamiskas īpašības.



1.1. att. Kopējās alternatīvu prioritātes, izvēloties piemērotāko dabas stratēģiju.

1.1. attēls atspoguļo trāna pārsvaru pār citām dabas stratēģijām. Tuvāk apskatot globālo prioritāšu aprēķina tabulu (skat. promocijas darba pilno versiju), redzams, ka šis pārsvars tiek iegūts ar lielāko lokālo prioritāti “smagākajā” kritērijā – enerģijas uzglabāšana. Arī otrajā svarīgākajā kritērijā – siltuma inerence – trānam ir augstākā lokālā prioritāte. Tas kopumā dod ievērojamu pārsvaru pār citām alternatīvām. Jutīguma analīze liecina, ka izveidotā *AHP* struktūra ir jutīga uz izmaiņām kritēriju svaros.

Ar *AHP* metodi iegūtie rezultāti, izvēloties piemērotāko dabas stratēģiju atdarināšanai inovatīvos klimatam adaptīvos norobežojošo konstrukciju risinājumos, tiks tālāk izmantoti nākamajos biomimikrijas dizaina spirāles etapos. Trans un asinsrite novērtēti visaugstāk, tāpēc šīs stratēģijas tiks aplūkotas tuvāk, lai atklātu to darbības principus, kas būtu piemēroti ieviešanai klimatam adaptīvās norobežojošajās konstrukcijās.

Trāns var kalpot par iedvesmu, attīstot fāžu pārejas materiālus saturošas konstrukcijas, kas palīdz saglabāt konstantu uzstādīto temperatūru, neskatoties uz iekštelpu un ārējām temperatūras svārstībām. Fāžu pārejas materiālus saturošās konstrukcijās varētu izmantot arī asinsrites sistēmas īpašības, optimizējot enerģijas uztveršanas, novadīšanas un atbrīvošanas procesus, kā arī veidojot konstrukcijas spēju pielāgoties klimata izmaiņām, kas arī ir viens no galvenajiem asinsrites uzdevumiem.

Daudzkritēriju lēmumpieņemšanas metode *AHP*, tās hierarhiskā struktūra var tikt veiksmīgi lietota biomimikrijas pieejā, dizaina spirāles “Jautājuma biologizēšanas” un “Dabas modeļu atklāšanas” etapos. *AHP* palīdz definēt mērķim svarīgus kritērijus, noteikt katra kritērija relatīvo nozīmīgumu un novērtēt alternatīvas atbilstoši kritērijiem. Atspoguļotais piemērs analītiskā hierarhijas procesa lietošanai biomimikrijas pieejā var kalpot kā vadlīnijas projektētājiem un pētniekiem, lai novērtētu biomimikrijas iespējas praktiskai lietošanai ēku projektēšanā – inovācijām ēku norobežojošās konstrukcijās, enerģijas ražošanas tehnoloģijās, radot jaunus materiālus utt.

1.6. Dabas stratēģiju atdarināšana klimatam adaptīvas fasāžu sistēmas elementa *Bi-SES* izstrādē

Sekojošā daudzkritēriju analīzē iegūtajiem rezultātiem, inovatīva norobežojošo konstrukciju risinājuma izstrādē tiek apskatītas trāna īpašības un nozīme organismā.

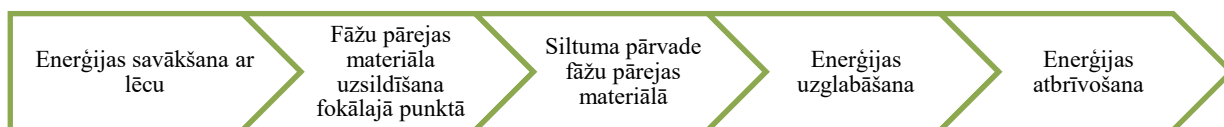
Par iedvesmu inovatīvajam risinājumam norobežojošajām konstrukcijām kalpoja izvērstā enerģijas apmaiņas aprēķina formula, nosakot nepieciešamo vielmaiņas apmaiņu dzīvniekam, lai kompensētu visus siltuma apmaiņas procesus. $M = h_{\text{cond}} (T_b - T_a) + h_{\text{conv}} (T_s - T_a) + h_{\text{rad}} (T_s - T_{\text{sur}}) + E + S$, kur uzmanību pievērša komponente S jeb siltuma uzglabāšana. Promocijas darbā iezīmēta robežšķirtne starp statiskajām norobežojošajām konstrukcijām “vakar” un dinamiskajām “rītdienas” norobežojošajām konstrukcijām, kas piedalīsies ēkas enerģijas aprites ciklā. Tādēļ siltuma uzglabāšanas komponente dzīvnieka vielmaiņas bilanci deva impulsu iekļaut šo procesu norobežojošajās konstrukcijās, radot prototipu sienai, kas var piedalīties ēkas enerģijas bilanci kā enerģijas uzkrājējs. Dzīvnieka organismā enerģijas uzkrāšana notiek zemādas tauku slānī trānā, kura sastāvā ietilpst taukskābes, kas ir fāžu maiņas materiāli un ir spējīgi uzkrāt enerģiju. Ēkā šo funkciju var veikt fāžu pārejas materiāls.

Otrs nozīmīgs aspekts ir siltumizolācijas slāņa atrašanās vieta. Siltumizolācijas slānim atrodies ārpusē, ķermeņa virsmas temperatūra zem apspalvojuma ir tikai dažus grādus vēsāka nekā kodola temperatūra. Bet, atrodoties iekšpusē, ārējās virsmas / ādas temperatūra ir āra vides temperatūrā. Vaļveidīgajiem trāna sastāvs nav vienāds visā tā biezumā, un atšķirīgas ir arī temperatūras. Ārējā slānī novērojams stāvs temperatūras gradients, bet iekšējais slānis ir gandrīz vienāds ar ķermeņa temperatūru. Savukārt karnielim kuprī izvietotais tauku slānis ir ne tikai barības vielu rezerve, bet arī aizsardzība pret pārkaršanu dienas karstumā. Akumulējot saules enerģiju kuprī, samazina siltuma ieguvumus uz ķermeņa kodolu, bet vakaros liekais siltums tiek emitēts apkārtējā vidē [15].

Kažoks un apspalvojums atbilstu ierastajiem risinājumiem, siltinot ēku no ārpuses. Bet jūras dzīvniekiem siltumizolācijas slānis – trāns – atrodas iekšpusē no starojošās virsmas. Un atšķirībā no siltumizolācijas slāņa ārpusē ar asinsrites sistēmu ir iespējams šo slāni iekļaut vai izslēgt no siltuma apmaiņas procesiem. Trāna slānis ir izplatīts termoregulācijas stūrakmens jūras zīdītājiem, kas mīt vidē, kurā temperatūras svārstības ir nelielas. Apzinoties visus potenciālos siltuma pārvades procesus, nolemts apskatīt fāžu pārejas materiāla izmantošanu inovatīva fasādes sistēmas risinājuma izstrādē.

Lielākais trūkums tradicionālajām norobežojošajām konstrukcijām ir to statiskās īpašības un nespēja pielāgoties mainīgiem klimatiskiem apstākļiem un iekštelpas mikroklimata parametru izmaiņām. Tādēļ inovatīvajam risinājumam tika sekots jūras zvaigznes piemēram, kurai pārmaiņas virsmas īpašībās iniciē lēcu kārtējums, kas raida saules starus precīzi uz uztvērēju un atbilstoši vajadzībai maina virsmas krāsu.

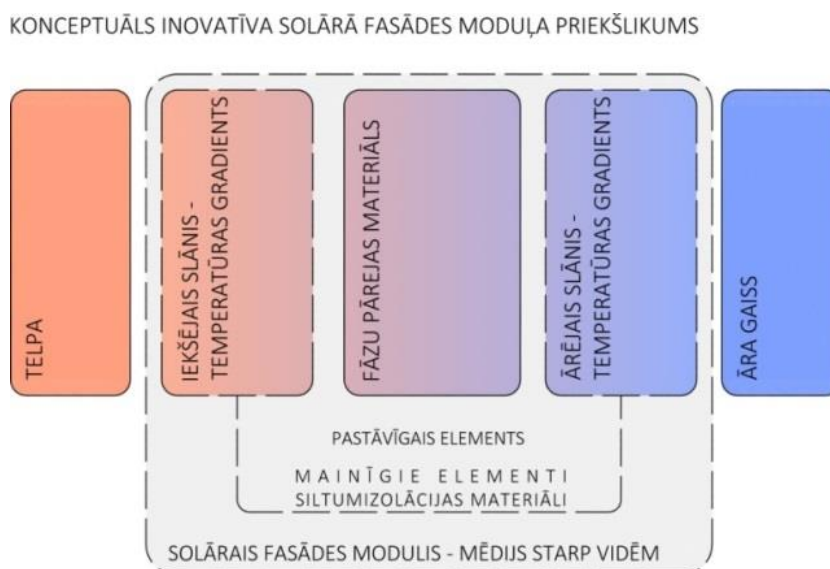
Piedāvātā risinājuma pamatuzdevums ir maksimālā intensitātē uztvert saules enerģiju, noglabāt to fāžu pārejas materiālā un, ja nepieciešams, nodot telpai. Plānotā enerģijas plūsma atspoguļota 1.2. attēlā kā enerģijas uzkrāšanas process labvēlīgos apstākļos.



1.2. att. Enerģijas plūsma inovatīvajā solārajā fasādes modulī.

1.7. Klimatam adaptīvā fasādes sistēmas elementa *Bi-SES* risinājuma koncepcija

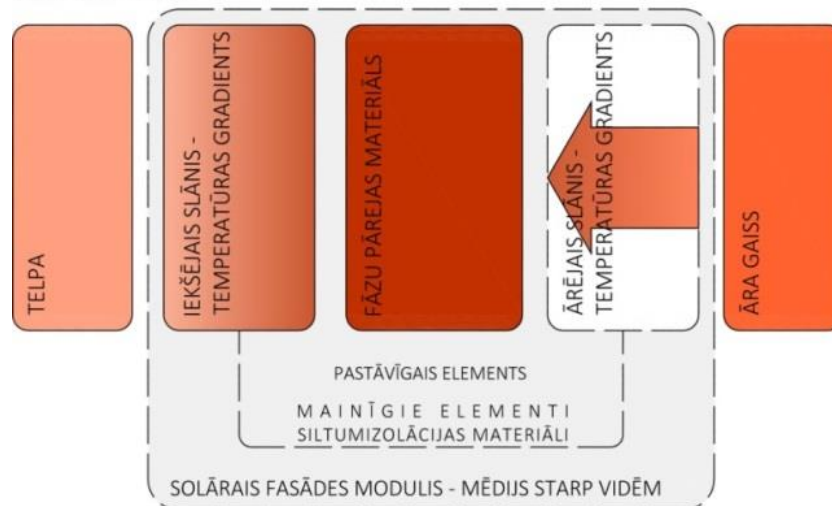
Izstrādātais solārās fasādes modulis būs medijs starp iekštelpu un ārtelpu. Iekštelpas temperatūra jāuztur stingri noteiktās komforta robežās, savukārt ārtelpas temperatūra ir svārstīga. Lai piešķirtu spēju reaģēt uz izmaiņām āra temperatūrā vai iekštelpas klimatā, modulī tiks iestrādāta pastāvīgā daļa – fāžu pārejas materiāls – un mainīgās daļas – divi siltumizolācijas slāņi ar ļoti augstām siltumtehniskajām īpašībām, viens no fāžu pārejas materiāla pret āra vidi (sauksim to par ārējo siltumizolācijas slāni) un otrs no FPM uz iekštelpas pusi (sauksim to par iekšējo siltumizolācijas slāni) (1.3. att.).



1.3. att. Konceptuāls inovatīva solārā fasādes moduļa priekšlikums.

Solārais fasādes modulis var tikt pakļauts trīs dažādām situācijām. Pirmkārt, apskatīsim situāciju, kad ir iespējama moduļa uzlāde vasaras sezonā intensīvos saules starojuma apstākļos (1.4. att.). Intensīvākais saules starojums vasarā pārsvarā ir dienas vidusdaļā, kad āra gaisa temperatūra pārsniedz iekštelpu komforta temperatūru un papildu saules siltuma ieguvumi nav vēlami, lai neradītu vajadzību telpu dzesēt. Šādos apstākļos ārējā mainīgā izolācija tiek noņemta, lai neapgrūtinātu saules siltuma iekļūšanu fāžu pārejas materiālā. FPM pamazām uzsilst līdz fāžu pārejai, fāžu pārejā materiāls, mainot agregātstāvokli no cieta uz šķidru, temperatūru nemaina (šajā brīdī notiek enerģijas akumulēšana), un, ja pietiek saules enerģijas pēc fāžu maiņas beigām, pāriet sajūtamā siltuma uztveršanas fāzē, un temperatūra FPM palielinās. Iekšējai siltuma ieguvumi nav nepieciešami, tāpēc iekšējais izolācijas slānis pilda savas funkcijas un neļauj siltumam no FPM nokļūt telpā.

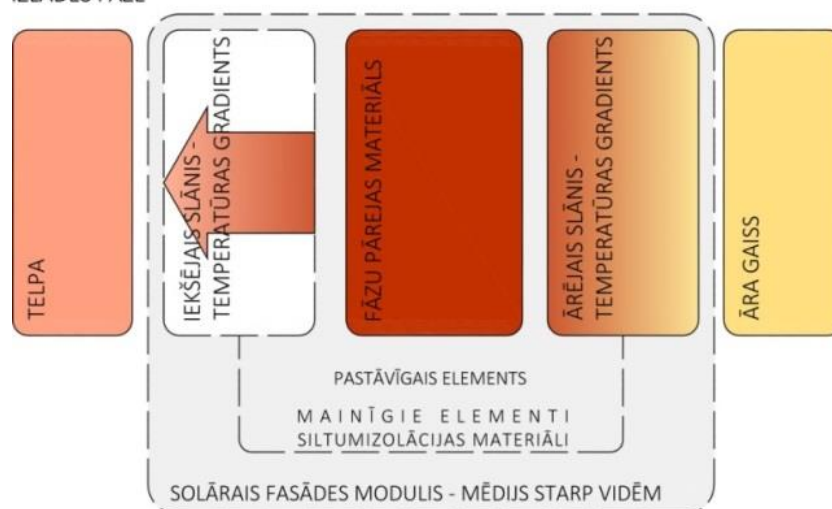
VASARAS PERIODS - IR PIEEJAMI INTENSĪVI SAULES SILTUMA IEGUVUMI.
UZKRĀŠANAS FĀZE



1.4. att. Konceptuāls inovatīva solārā fasādes moduļa priekšlikums – uzlādes fāze.

Kā nākamo situāciju apskatīsim vasaras vakara / nakts / agra rīta apstākļus, kad pietiekama saules radiācija dienvidu fasādei nav pieejama un āra gaisa temperatūra ir zemāka nekā telpas temperatūra, bet telpas temperatūra ir nokritisies zem pieļaujamajām komforta prasībām. Šādi apstākļi ir piemēroti izlādes fāzei. Ārējā siltumizolācija pasargā FPM no siltuma zudumiem uz āru. Iekšējā siltumizolācija tiek noņemta, un fāžu pārejas materiāls, kam tajā brīdī ir augstāka temperatūra nekā iekštelpai, nodod siltumu telpai (1.5. att.). Vispirms tiek atdots sajūtamais siltums virs fāžu pārejas, ja tāds ir radies, pēc tam notiek fāžu pāreja nemainīgā temperatūrā, bet, kad temperatūra fāžu pārejas materiālā sāk kristies zem iekštelpas komforta temperatūras, iekšējais siltumizolācijas slānis tiek pielikts atpakaļ, lai samazinātu kopējos siltuma zudumus no telpas pret āra vidi. Starpstāvoklī, t. i., brīdī, kad saules radiācija vairs nav pieejama, bet siltums telpai vēl nav nepieciešams, abi siltumizolācijas slāņi izolē fāžu pārejas materiālu gan no iekštelpas, gan no ārtelpas, nepieļaujot fāžu pārejas materiāla dzišanu.

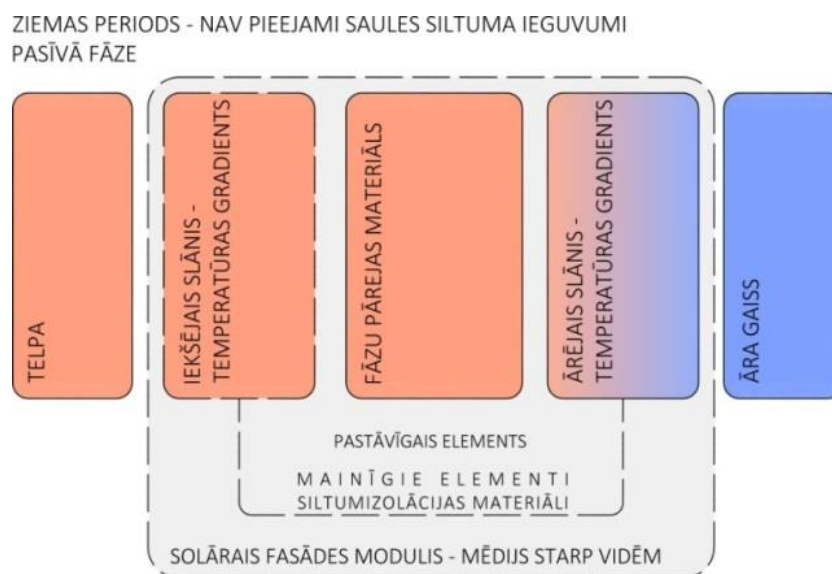
VASARAS PERIODS - NAV PIEEJAMI INTENSĪVI SAULES SILTUMA IEGUVUMI
IZLĀDES FĀZE



1.5. att. Konceptuāls inovatīva solārā fasādes moduļa priekšlikums – izlāde.

Pēdējā būtiskākā situācija ir ziemas apstākļi, kad saules radiācija ir pieejama ļoti ierobežotos apstākļos. Āra gaisa temperatūra ievērojami zemāka nekā vēlamā iekštelpu temperatūra neatkarīgi no diennakts laika – gan dienā, gan naktī. Šādi apstākļi ir solārās fasādes moduļa pasīvā fāze, kur iespējas uzlādēt fāžu pārejas materiālu ir minimālas un solārais fasādes modulis strādā kā siltuma izolators ar visiem slāņiem kopā, lai novērstu vadīšanas siltuma zudumus (1.6. att.).

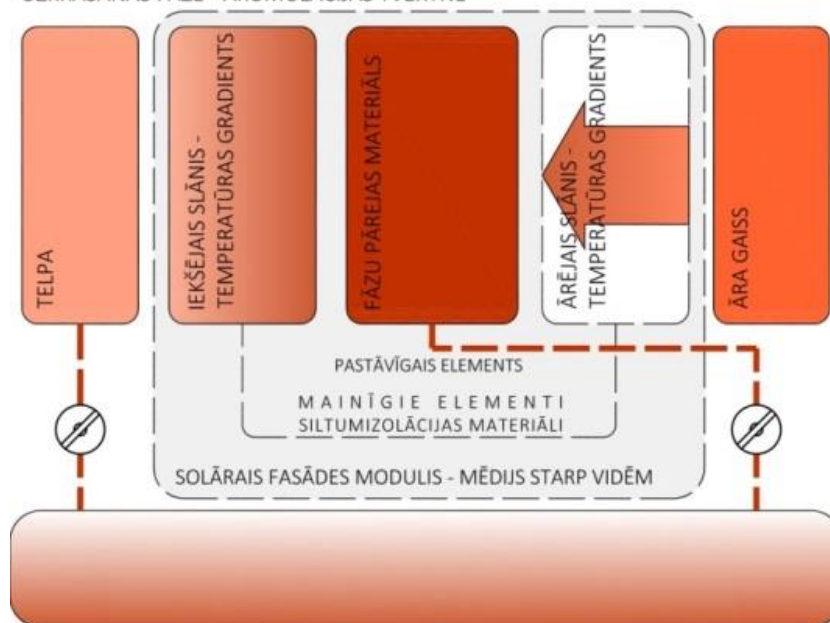
Siltumizolācijas biezumam pret āra telpu vajadzētu būt lielākam nekā pret iekštelpu, jo iespējamais temperatūras gradients starp fāžu pārejas materiālu un āra vidi būs ievērojami lielāks nekā gradients starp FPM un iekštelpu, īpaši kritiskajos aukstuma slodzes apstākļos – ziemas naktīs ar skaidrām debesīm.



1.6. att. Konceptuāls inovatīva solārā fasādes moduļa priekšlikums – pasīvā fāze.

Skatot termoregulācijas sistēmas dabā, jāsecina, ka ziemeļu klimata dzīvnieku un jūras zīdītāju tauku slāņa attiecība pret ķermeņa kodolu, ir ievērojami lielāka, lai nodrošinātu nepieciešamo enerģijas rezervi un siltumizolāciju. Ēkā norobežojošās konstrukcijas veido 5–10 % no kopējā ēkas būvtilpuma atkarībā no ēkas gabarītiem. Tādēļ iespējams izskatīt fāžu pārejas materiāla slāņa sabiezināšanas aspektus – ieguvumus enerģijas bilanci pret sadārdzinājuma izmaksām. Alternatīva būtu, iedvesmojoties no dabas, ieviest “asinsrites sistēmu” – cirkulācijas loku un akumulācijas tvertnes – sajūtamā siltuma novadīšanai no FPM pēc fāžu maiņas (1.7. att.). Šāda sistēma būtu jāaprīko ar vārstiem, kas pieļauj cirkulāciju, kad fāžu pārejas materiāls sasniedz noteiktu sajūtamā siltuma robežu un pārtrauc cirkulāciju, sasniedzot fāžu maiņas temperatūru. Precīzāks cirkulācijas aktivizēšanas un deaktivizēšanas temperatūru diapazons būtu nosakāms izpētē.

VASARAS PERIODS - IR PIEEJAMI INTENSĪVI SAULES SILTUMA IEGUVUMI.
UZKRĀŠANAS FĀZE - AKUMULĀCIJAS TVERTNE



1.7. att. Konceptuāls inovatīva solārā fasādes moduļa priekšlikums. Uzlādes fāze ar akumulācijas tvertni.

Lai straujāk notiktu saules enerģijas uztveršana fāžu pārejas materiālā, ārējā plaknē izvietota Freneļa lēca, kas atšķirībā no tradicionālās lēcas ir kompakta un ar mazu svaru, kas ir nozīmīgi faktori, veidojot jaunu būvkonstrukciju elementu.

Turpmākā pētījuma attīstības gaitā, izstrādājot fizisko solārās fasādes modeļa eksperimentālo stendu, veicami šādi pasākumi:

- 1) izvēlēties piemērotāko fāžu pārejas materiāla fāžu maiņas temperatūru;
- 2) izvēlēties piemērotākais fāžu pārejas materiālu;
- 3) izstrādāt *Bi-SES* risinājumu:
 - a) definēt solārā fasādes moduļa izmērus;
 - b) noteikt vēlamo FPM tilpumu;
 - c) izvēlēties siltumvadītspējas paātrinātājus;
 - d) izvēlēties piemērotāko Freneļa lēcu (fokusa attālums, izmēri);
 - e) izvēlēties piemērotāko siltumizolācijas risinājumu “iekšējam” un “ārējam” slānim;
- 4) *Bi-SES* prototipa eksperimentālo stenda izveide:
 - a) izstrādāt eksperimentālā stenda dizainu, kas imitē iekštelpu un ārsienu;
 - b) izvēlēties eksperimenta novietni;
 - c) definēt nepieciešamos mērījumus;
 - d) izvietot mērinstrumentus.

2. KLIMATAM ADAPTĪVĀS FASĀDES MODUĻA *BI-SES* EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE

Pētījumā veikti divi eksperimenti. Pirmā eksperimenta mērķis ir izvēlēties vispiemērotāko fāžu maiņas materiālu *Bi-SES* elementu. Otrā eksperimenta mērķis ir salīdzināt *Bi-SES* prototipu ar atskaites sienu.

2.1. Pirmais eksperiments. Fāžu pārejas materiāla izvēle. Parafīns, sāļi, taukskābes

Būvniecības komponentiem piemērotāki ir fāžu pārejas materiāli, kas maina agregātstāvokli no šķidra uz cietu, jo fāžu maiņas procesā tiem ir salīdzinoši nelielas tilpuma izmaiņas, salīdzinot ar fāžu maiņu šķidr – gāzveida, gāzveida – šķidr. Plašāk lietotie fāžu pārejas materiāli būvniecības izstrādājumos ir parafīni un taukskābes no organiskajiem FPM un sāļu hidratī no neorganiskajiem savienojumiem. Eksperimenta pirmās daļas mērķis ir noteikt piemērotāko fāžu pārejas materiālu enerģijas uzglabāšanai inovatīvajā solārajā fasādes modulī. Pētījumā apskatītas visas trīs grupas – parafīni, taukskābes, sāļu hidratī un izvēlēti konkrēti produkti iestrādāšanai *Bi-SES* modulī.

2.1.1. Siltuma pārnese paātrināšana fāžu pārejas materiālos

Lielākajai daļai fāžu pārejas materiālu ir zema siltumvadītspēja. Tas apgrūtina siltuma uztveršanas un atbrīvošanas procesus. Tādēļ kompozītmateriāli, kuros izmantoti fāžu pārejas materiāli latentā siltuma uzkrāšanai, tiek papildināti ar paaugstinātas siltumvadītspējas elementiem, lai paātrinātu siltuma pārnesei un nodrošinātu ātrāku fāžu maiņu. Plašāk lietotos siltumvadītspējas paātrinātājus fāžu pārejas materiālos var iedalīt divas konceptuāli pretējās grupās. Pirmā paredz ietvert FPM mikrokapsulas augstākas siltumvadītspējas materiālos. Otra pieeja ir fāžu pārejas materiālā izvietot augstākas un ļoti augstas siltumvadītspējas materiālus – metālus, grafitu, oglekļa materiālus.

2.1.2. Eksperimentā lietotie fāžu pārejas materiāli

Viens no pētījuma uzdevumiem ir izvēlēties *Bi-SES* modulim piemērotāko fāžu pārejas materiālu. Šajā pētījumā definēts, ka fasādes modulim nepieciešams fāžu pārejas materiāls ar kušanas temperatūru $\pm 22^{\circ}$. No parafīniem izvēlēts RT21HC, no sāls hidratīem – SP21E (*Rubitherm*). Sāls hidratī pirms lietošanas jātur 0°C temperatūrā 24 stundas. Šajā eksperimentā sāls hidratī tika turēti *JEIOtech TH-G* temperatūras un mitruma kamerā.

Lai iegūtu taukskābi ar nepieciešamajām īpašībām, izgatavots eitektisks maisījums (palmitīnskābe ($\geq 98,0\%$) un karpīnskābe ($\geq 98\%$) (*Labochema*)) un veikta procedūra, lai pārliecinātos par iegūtā materiāla siltumtehnikajām īpašībām. Maisījumam jābūt sagatavotam no šķidrām bāzēm [16], [17]. Kušanas temperatūra palmitīnskābei ir $59,4^{\circ}\text{C}$, karpīnskābei – $32,14^{\circ}\text{C}$. Abas taukskābes tika izkausētas šķidrā fāzē un samaisītas masas attiecībā 76,5 : 23,5. Kušanas temperatūra noskaidrota ūdens vannā, kurā ir temperatūras sensori. Kad temperatūra nemainās, FPM sāk akumulēt siltumu. 2.1. attēlā parādīts eksperimentālais iestats ar kolbu, kas ir piepildīta ar maisījumu, un tai pievienoti divi

termopāri. Viens termopāris atrodas centrā, otrs ir tuvāk kolbas malai. Trešais termopāris mēra ūdens temperatūru. Termopāri iezīmēti ar sarkanām bultām.



2.1. att. Eitektiskais maisījums konstantā temperatūrā ūdens vannā ar termopāriem.

2.1. tabula atspoguļo eitektiskajam maisījumam izmantoto taukskābju siltumtehnikās īpašības.

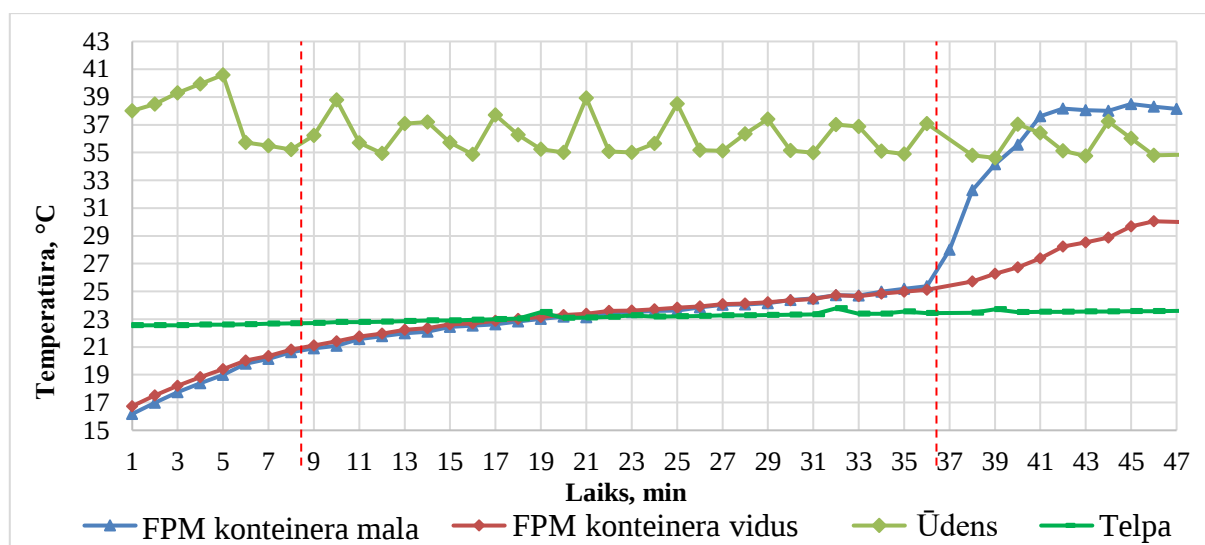
2.1. tabula

Īpašības izmantotajām taukskābēm un sagatavotajai masas proporcijai [18]

Taukskābe	PS	KS	Mērvienība
Īpatnējā siltumietilpība	1,9	1,9	kJ/(kg K)
Īpatnējā siltumietilpība	2,1	2,8	kJ/(kg K)
Cietvielas blīvums	989	1004	kg/m ³
wt%	23,5	76,5	%
m_e	600		g
m_{fi}	141,0	459,0	g

Pirms eksperimenta eitektiskais maisījums tika atdzesēts līdz 0 °C. Noteiktā ūdens temperatūra bija 40 °C, faktiskā temperatūra bija zemāka ap kolbu tā iemesla dēļ, ka ūdens vannai nebija vāka vai jebkāda cita veida izolācijas, kas novērstu siltuma zudumus. Šis eksperiments ļauj pamanīt tipisko FPM uzvedību. 2.2. attēlā vidējā zona, kas iekrāsota ar sarkanām raustītām līnijām, ir latentā siltuma fāze, kad maisījums kūst.

Rezultāti rāda, ka līdz kušanas brīdim un kušanas laikā temperatūras amplitūda abiem termopāriem ir gandrīz identiska. Pēc fāzes maiņas, pārejot uz sajūtamā siltuma uzkrāšanu, redzamas ievērojamas atšķirības temperatūras zonās pie kolbas malas un vidū, kas skaidrojams ar zemo materiāla siltumvadītspēju (2.2. att.).



2.2. att. Kušanas punkts kaprīnskābes un palmitīnskābju eitektiskajam maisījumam.

Eitektiskais maisījums tika novērots abās fāzēs, tilpuma maiņas netika konstatētas. Blīvuma aprēķins $\rho = m / V = 911,64 \text{ kg/m}^3$. Kušanas temperatūras amplitūdā 21–25,4 °C (2.2. att.), temperatūras ar termopāriem tika mērītas ik piecas sekundes, un vidējā temperatūra tika mērīta ik minūti. Rezultāti rāda, ka šim maisījumam ir tādas pašas īpašības kā literatūrā aprakstītajiem [19]. Īpatnējā siltumietilpība eitektiskajam maisījumam – šķidrā fāzē $c_{eu} = 1,9 \text{ kJ/(kg K)}$ un cietai vielai $c_{eu} = 2,64 \text{ kJ/(kg K)}$.

Tabulā 2.2. apkopotas eksperimentā izmantoto FPM īpašības.

2.2. tabula

Īpašības eksperimentā izmantotajiem FPM. RT21HC un SP21E ir no datu lapām [20]

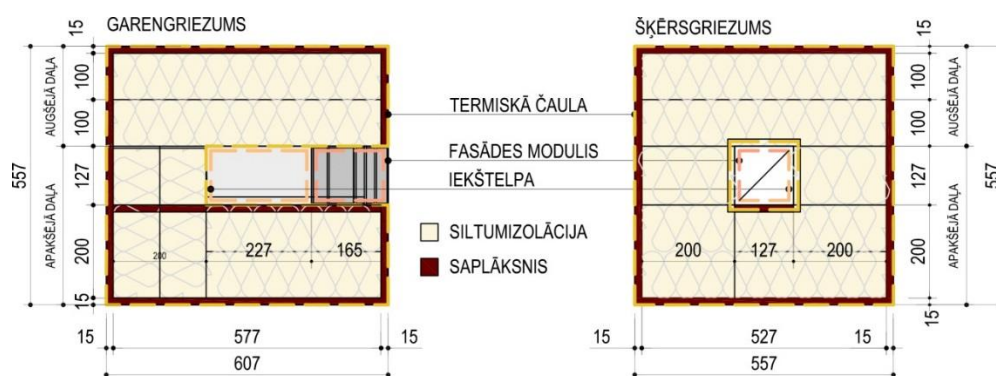
Īpašība	Fāzu pārejas materiāls			Mērvienība
	RT21HC	SP21E	KS:PS	
Kušanas temperatūra	20–23	22–23	23,12	°C
Sacietēšanas temperatūra	21–19	21–19	22,15	°C
Siltuma akumulācijas ietilpība $\pm 7,5 \%$	190	160	–	kJ/kg
Latentā siltuma akumulācija kušanas procesā	–	–	156,44	kJ/kg
Latentā siltuma akumulācija sasalšanas procesā	–	–	150,29	kJ/kg
Latentā un sajūtāmā siltuma kombinācija temperatūrās no 13 °C līdz 28 °C	53	44	–	Wh/kg
Īpatnējā siltuma ietilpība	2	2	–	kJ/(kg K)
Blīvums cietai vielai 15 °C	0,88	1,5	–	kg/l
Blīvums šķidrumam 25 °C	0,77	1,4	–	kg/l
Siltumvadītspēja (abās fāzēs)	0,2	0,6	–	W/(m K)
Tilpuma izplešanās	14	3–4	1	%
Uzliesmošanas punkts (FPM)	140	–	–	°C
Maksimālā ekspluatācijas temperatūra	45	45	–	°C

2.1.3. Eksperimentālā stenda uzbūve

Lai salīdzinātu trīs dažādus fāzu pārejas materiālus, eksperimentālajā stendā tiek veidotas trīs izmēģinājumu kastes – katram FPM sava. Katra kaste veidota no trīs daļām. 1. daļa – “termiskā čaula” – ir saplākšņa kaste, kas pildīta ar 20 cm minerālvati (2.3. att.). Kastes ārējie izmēri 55,7 cm × 55,7 cm × 60,7 cm. 2. daļa ir telpa kastes vidū, kas imitē labi izolētu iekštelpu, kas pakļauta klimatisko apstākļu ietekmei. Telpa izklāta ar tvaika izolācijas loksni.

3. daļa eksperimentālajā standā ir “solārais fasādes modulis *Bi-SES*”, kas ir veidots no komerciāli pieejamiem materiāliem un sastāv no dažādām komponentēm. Visi izmantotie materiāli tika izvēlēti, lai izturētu augstas siltuma slodzes, ņemot vērā, ka koncentrētā saules enerģija spēj uzsildīt paneli līdz pat 200 °C. Izmantotie materiāli:

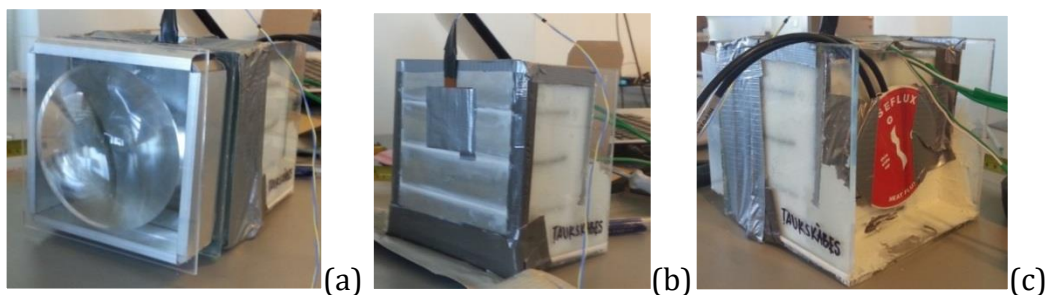
- 4 mm stikls FPM konteinera izgatavošanai;
- alumīnija uzstūri konteinera ģeometriskās noturības nodrošināšanai;
- blīvēšanas materiāls – silikons; tam jānodrošina augsta temperatūras izturība, un materiāla ķīmiskajam sastāvam jābūt rezistentam pret katra FPM iedarbību;
- fāžu pārejas materiāls – RT21HC, SP21E, KS:PS;
- vara plāksne 1,5 mm biezumā, vara stieņi Ø 5 mm, lodalva;
- izlocīta alumīnija loksne;
- eksperimentā izgatavota trīs stiklu pakete;
- minerālvate.



2.3. att. Eksperimenta izmēģinājuma kastes šķērsgriezums ar fasādes moduli (izmēri doti milimetros).

Pēc tam, kad izveidota un uz blīvumu pārbaudīta FPM kamera, to var piepildīt ar šķidrājiem FPM. Pildīšanas procesā jāpārbauda, lai neveidojas gaisa kabatas cietajā vielā, FPM jābūt viendabīgam.

Moduļa ārējā slānī izvietota punktveida fokusa Freneļa lēca. Tās fokusa attālums ir 7,1 cm, lēcas efektīvais diametrs – 101,6 mm, fokālā punkta laukums – 9,6 mm², gaismas caurlaidības koeficients – 0,92. Tā izgatavota no polimetilmetakrilāta plāksnes [21].

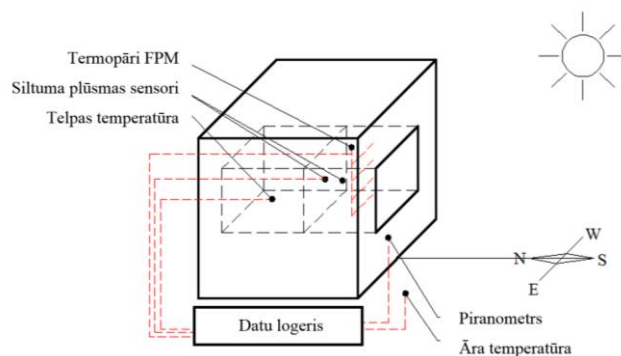


2.4. att. Fasādes modulī integrēta lēca (a), siltumplūsmas mērītāji (b, c).

Lai palielinātu siltuma pārvadi fāžu pārejas materiālā, tiek izmantoti metāla siltumvadītspējas paātrinātāji. Sāls hidratam un parafīnam tiek lietota vara plāksne (119 mm ×

Lai kontrolētu procesus FPM kameras iekšpusē un telpā, ierīkoti mēraparāti. Izvēlētie mērinstrumenti un vienkāršota eksperimenta shēma ir attēlota 2.6. attēlā un aprakstīta tālāk tekstā.

1. Termopāri ar datu reģistrēšanas iekārtām CR1000 $\pm$ (0,06 % nolasīšana + nobīde) tiek izmantoti iekštelpu un āra temperatūras mērījumiem. Laika solis 30 sekundes.
2. Saules radiācijas plūsmas blīvums tiek mērīts ar *Kipp & Zonen CMP3* piranometru.
3. Termopāri ar datu reģistrēšanas iekārtām CR1000 $\pm$ (0,06 % nolasīšana + nobīde). Katrai FPM kamerai ir trīs termopāri.
4. Siltuma plūsmas mērītājs *Sequoia SHF* izvietots uz FPM kameras virsmas pret ārtelpu, *Hukseflux HFP01* izvietots uz FPM kameras virsmas pret iekštelpu.



2.1.4. Trīs fāžu pārejas materiālu snieguma salīdzināšana

26

vara plāksni un vara stienšiem, siltuma avots telpā (+22 °C); (3) 3. kaste (K3) – sāls hidrāts, ar vara plāksni, siltuma avots telpā (+22 °C), sākums (2.7. att.).

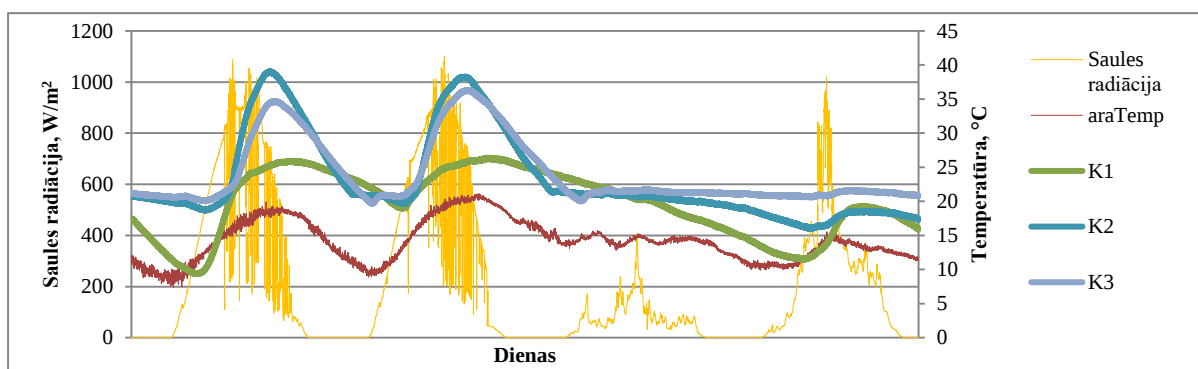


2.7. att. KAFS kameras klimatiskajās slodzēs.

2.1.5. Fāžu pārejas materiālu izvēles eksperimenta rezultāti

2.8. attēlā atspoguļo eksperimenta mērījumu rezultātus četrām pilnām diennaktīm no 24.05.2015. plkst. 0.00 līdz 27.05.2015. plkst. 23.59. Grafikā atspoguļota āra gaisa temperatūra, saules radiācija un temperatūra katrā no FPM. K1, K2, K3 apzīmējumi atbilst eksperimentālajiem stendiem.

Pirms 24.05.2015. visas kastes atradušās āra apstākļos. Pirmās divas dienas bijušas izteikti saulainas, saules radiācijai pārsniedzot 1000 W/m². Trešā diena bijusi izteikti mākoņaina, maksimālajai saules radiācijai nepārsniedzot 400 W/m². Ceturtā diena bijusi vidēji mākoņaina – radiācijas līmenis 250–400 W/m². Āra gaisa temperatūra saulainajās dienās 7–10 °C naktī līdz 18–21 °C dienā. Mākoņainajās dienās – no 10 °C grādiem naktī līdz 15 °C dienā.

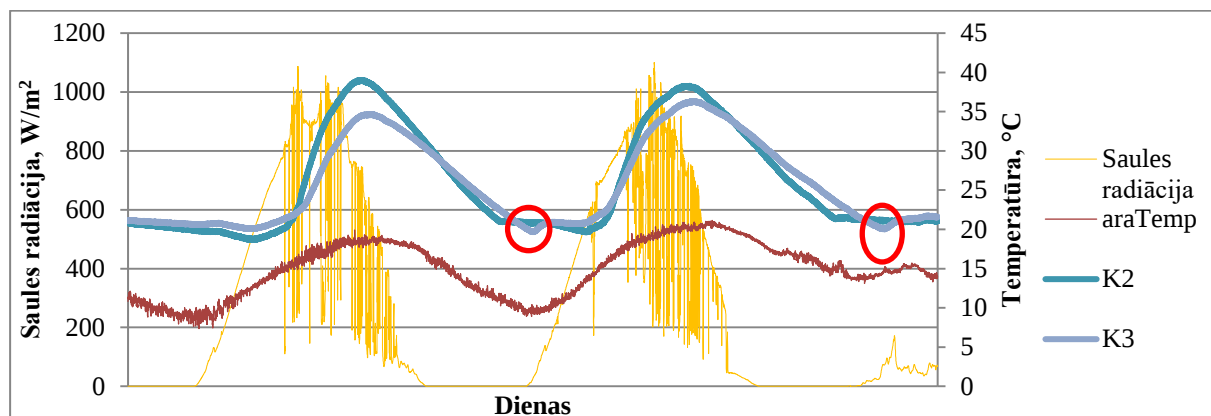


2.8. att. Eksperimenta pirmā daļa – fāžu pārejas materiāla izvēle. 24.05.–27.05.

K2 – RT21HC un K3 – SP21E kastēs ar sildelementiem, temperatūra, palielinoties saules radiācijai, abos FPM ar laika nobīdi paaugstinās. K2 – RT21HC sasniedz 3–5 °C lielāku temperatūru. Abos FPM strauji notiek pāreja no latentās siltuma fāzes uz sajūtamā siltuma fāzi. Saules radiācijai samazinoties, ar laika nobīdi temperatūra FPM konteineros samazinās. Trešajā, mākoņainajā dienā sildelements FPM uztur vienmērīgu temperatūru. Ceturtajā, daļēji mākoņainajā dienā redzams, ka temperatūra FPM nedaudz paaugstinās.

Aplūkojot tuvāk laika posmu no 24.05.2015 plkst. 0.00 līdz 25.05.2015 plkst. 23.59, redzami divi pilni uzlādes/izlādes cikli (2.9. att.), sākotnēji strauji pārejot sajūtamā siltuma fāzē un nakts laikā pakāpeniski atdodot sajūtamo siltumu un pārejot latentā siltuma izlādes

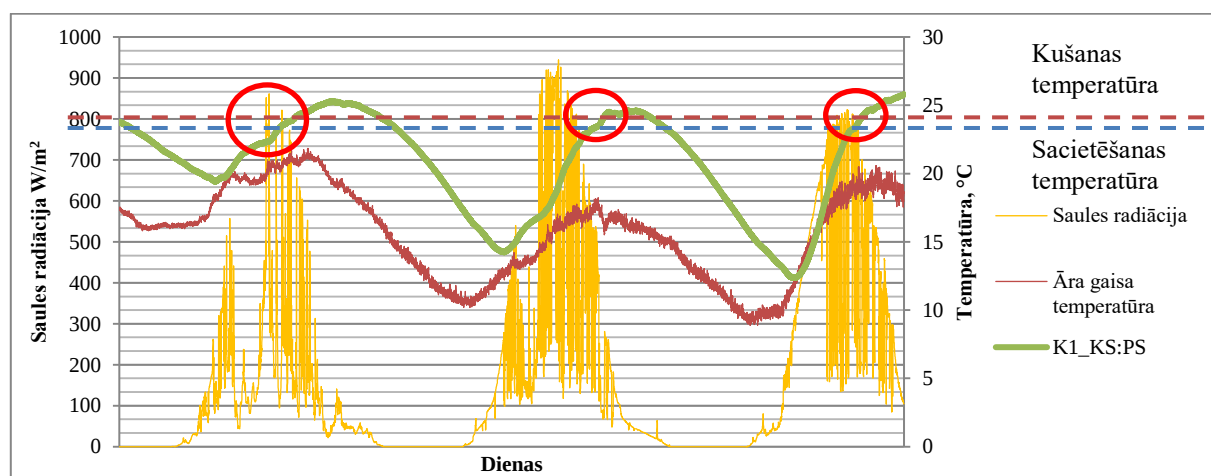
fāzē. Salīdzinot parafīna un sāls hidrāta uzvedību, var secināt, ka parafīnā ir sasniegtas augstākas temperatūras, bet sāls hidrāts lēnāk atdod siltumu.



2.9. att. Parafīna un sāls hidrātu uzlādes/izlādes cikli.

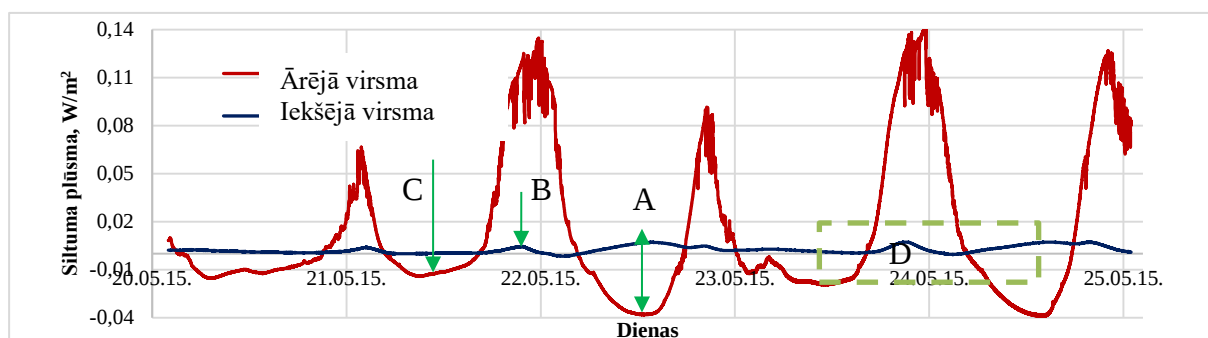
2.9. attēls atspoguļo pārdzesēšanas fenomenu sāls hidrātā (sarkans), kur pirms sacietēšanas fāžu pārejas materiālā temperatūra pazeminās zem noteiktās sacietēšanas temperatūras. Materiāla specifikācijā uzrādīta sacietēšanas temperatūra 19–21 °C. Vispirms temperatūra sāls hidrātā samazinās līdz ~19,5 °C un pēc tam nostabilizējas uz ~21 °C. Parafīnā šādas svārstības nenotiek.

No 3.06.2015 plkst. 0.00 līdz 05.06.2015. plkst. 17.33 K1 – KS:PS vērojami divi enerģijas uzkrāšanas un atdošanas cikli. 03.06. diennakts pirmajās stundās notiek FPM atdzišana. Saules radiācija aktivizējas plkst. 4.23. FPM temperatūra pieaug ar 2 h nobīdi. Laikā no plkst. 9.13 līdz 11.45 saules radiācija samazinās, seko straujš saules radiācijas pieaugums, un latentā siltuma fāze strauji pāriet sajūtamajā siltumā un grafikā nav pamanāma. 4.06. un 5.06. redzama īslaicīga vienmērīga temperatūra taukskābju maisījuma kušanas temperatūras zonā. Bet atdzišanas fāzē nevienā no cikliem sacietēšanas fāze nav novērojama. Tas var būt saistīts ar FPM tilpuma attiecību pret siltumvadītspējas paātrinātājiem, kas FPM sacietēšanas fāzē ir liels siltuma zudumu avots.



2.10. att. Uzlādes/izlādes cikli taukskābju maisījumā K1-KS:PS.

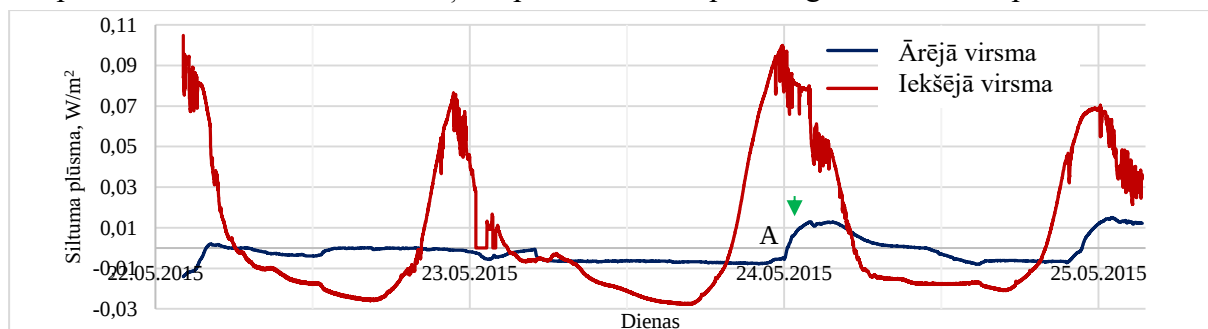
Sarkanās līknes pozitīvās vērtībās atspoguļo virzienu no saules radiācijas uz FPM; negatīvās vērtības parāda siltuma zudumus no FPM uz āru. Siltuma plūsmai uz FPM konteineru iekšējās virsmas, pozitīvās vērtības zilajai līknei ir siltuma plūsma no fāžu pārejas materiāla uz telpu, negatīvās vērtības ir siltuma plūsma no telpas uz FPM, telpas gaiss silda FPM (2.11. att.). Zilās līknes posms ar vērtību 0 (C) atspoguļo situāciju pēc mākoņainas dienas, kad temperatūra fāžu pārejas materiālā ir vienāda ar temperatūru iekštelpā un siltuma plūsma nenotiek. Siltuma plūsma fāžu pārejas materiālā notiek abos virzienos (A). Siltuma plūsma A apgabalā notiek nakts laikā. Siltuma zudumi, kas plūst uz āru, ir negatīvās vērtības uz sarkanās līnijas. Lai gan zilā līnija rāda, ka noteikts siltums plūst uz telpu. Arī dienas laikā siltums plūst uz telpu B.



2.11. att. Siltuma plūsma 1. kamerai K1 – KS:PS.

Zona D atbilst saulainai diennaktij (24.05.2015.). Sarkanā līkne atspoguļo siltuma ieguvumus no dienas laikā un siltuma zudumus nakts laikā. Bet zilajai līknei ir divi pozitīvo vērtību maksimumi. Pirmais, kad saules radiācijas ietekmē FPM materiāls ir uzsilis, bet iekštelpas temperatūra ir zemāka nekā FPM temperatūra (FPM siltumu nodod telpai). Otrs – diennakts tumšajā daļā, kad saules radiācija nav pieejama. Iekštelpa sāk dzist, bet FPM temperatūra ir augstāka nekā iekštelpas temperatūra, un siltums no FPM tiek nodots telpai.

K2 un K3 mērījumi nevar tikt tieši salīdzināti ar K1, jo notikuši dažādos apstākļos. Siltuma plūsma uz FPM ārējās virsmas ir līdzīga situācijai testa kastē K1, kur sarkanās līknes pozitīvās vērtības atspoguļo FPM uzsilšanu, bet negatīvās vērtības atspoguļo siltuma zudumus (2.12. att.). Atšķirības ir siltuma plūsmā uz FPM konteineru iekšējās virsmas. Zilās līknes negatīvās vērtības rāda FPM sildīšanu no telpas sildelementa iedarbībā, kas neļauj temperatūrai krist zem 22 °C, tādēļ temperatūra iekštelpā ir augstāka nekā temperatūra FPM.



2.12. att. Siltuma plūsmas K2 – RT21HC.

Neskatoties uz FPM sildīšanu no iekšējās puses, novērojama arī siltuma atdošana telpai pēc intensīvas saules radiācijas uztveršanas (apzīmēts ar A, 2.12. att.).

2.1.6. Fāžu pārejas materiālu izvēles eksperimenta secinājumi

Aplūkojot eksperimenta pirmās daļas rezultātus, secināts, ka no apskatītajiem efektīvākais ir parafīns K2 – RT21HC, jo, pirmkārt, novērota visaugstākā temperatūra sajūtamā siltuma zonā, otrkārt, nav novērojams pārdzesēšanas fenomens, treškārt, vislabākā saderība ar citiem izmantotajiem materiāliem – siltumvadītspējas paātrinātāju, plastikāta daļām, izmantotajām saistvielām. Tādēļ eksperimenta otrajā daļā, kur apskatīts solārā fasādes moduļa sniegums un tas salīdzināts ar references sienu, izmantots parafīns RT21HC (*Rubitherm*).

Papildus secinājumiem par piemērotākā fāžu pārejas materiāla izvēli novērots, ka nepieciešams veikt solārā fasādes moduļa uzlabošanu, lai samazinātu siltuma zudumus pret āru, kas rodas, pateicoties eksponētajai metāla loksnei, kas nodrošina nepieciešamo siltumvadītspējas uzlabojumu pieejamas saules radiācijas apstākļos, bet nakts laikā caur šo elementu pretējā virzienā notiek strauji siltuma zudumi.

2.2. Otrais eksperiments – *Bi-SES* un atsauces sienas salīdzinājums

2.2.1. *Bi-SES-II* izstrāde

Eksperimenta 2. daļā veikts fasādes moduļa un references sienas salīdzinājums. Ģeogrāfiskais novietojums analogs eksperimenta pirmajai daļai. Izmēģinājumu kastes ir veidotas analogi pirmajai eksperimenta daļai (skat. 2.1.3. nodaļu). Pirms eksperimenta sākšanas optimizēts sākotnējais fasādes modulis, samazinot siltuma zudumus pret ārpusi. Trīs stiklu paketes vietā lēcas fokusa attāluma telpā no pašsacietējoša modelēšanas māla DAS izveidots konuss atbilstoši lēcas fokusēšanas ģeometrijai (2.13. att.). Konusa nodalījumā ir nekustīgs gaiss. Pārējā fokusa telpa pildīta ar aerogēla granulām (ar zemu siltumvadītspēju, augstu saules enerģijas caurlaidību) LA1000 (*Cabot*), lai samazinātu siltuma zudumus no vara plāksnes. Izmantoti komerciāli pieejami materiāli: FPM – RT21HC parafīns (*Rubitherm Technologies GmbH*); DAS modelēšanas mastika; aerogēls.

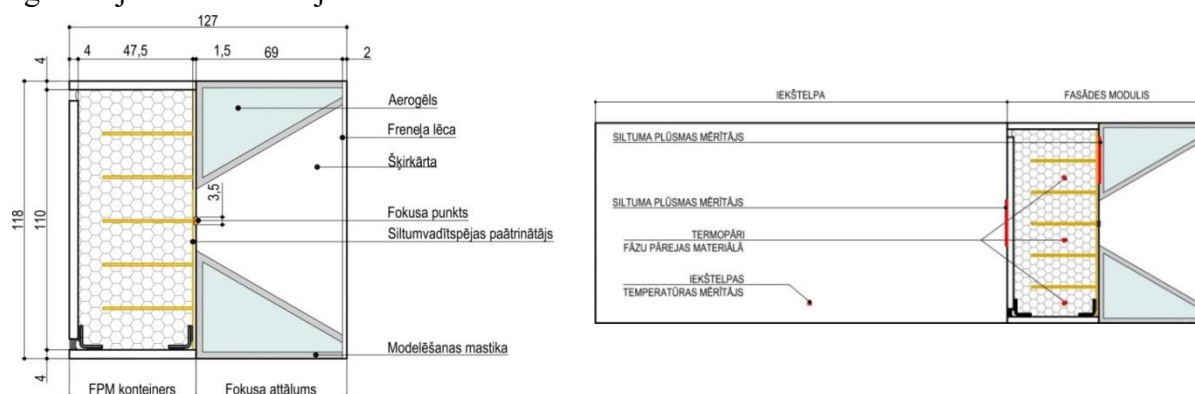
FPM pildīts konteinerā, kas atbilst lēcas ārējiem izmēriem (119 mm × 110 mm × 47,5 mm). Parafīna īpašības skatīt 2.3. tabula. FPM materiāls konteinerā netiek pildīts 100 % tilpumā, novērtējot materiāla tilpuma maiņas dažādiem agregātstāvokļiem. Pret ārpusi vērstā konteinerā siena ir vara plāksne ar metāla stieņiem, pārējās konteinerā sienas veidotas no 4 mm stikla. Kopējā U vērtība solārajam fasādes moduļim 0,22 W/(m²K), references sienai 0,28 W/(m²K).

Parafīna termofizikālās īpašības [22]

Parametrs	Vērtība	Parametrs	Vērtība
Īpatnējā siltumietilpība šķidr/ciets, kJ/(kg K)	2	Siltumvadītspēja šķidr/ciets, W/(m K)	0,2
Kušanas temperatūra, °C	20–23	Blīvums šķidr/ciets, kg/m ³	0,88/0,77
Sacietēšanas temperatūra, °C	21–19	Tilpuma izplešanās, %	14
Latentais kušanas siltums, kJ/kg	190		

2.2.2. Mēriekārtas

2.13. att. Moduļa šķērsgriezums (pa kreisi); mēriekārtu izvietoējums monitoringam atspoguļo moduļa griezumam un shematisku mēriekārtu izvietoējumu. Tiek uzraudzīti šādi parametri: iekšējās temperatūra, āra temperatūra, saules radiācija, temperatūra FPM trīs līmeņos, siltuma plūsma uz vara plāksnes ārējās virsmas un siltuma plūsma uz FPM konteineru iekšējās virsmas. Saules radiācijas plūsma tiek mērīta ar piranometru ar precizitāti $\pm 10 \text{ W/m}^2$ vai 5 % no nolasījuma. Āra un iekšējās temperatūras tiek mērītas ar K tipa termopāriem ar precizitāti $\pm 1,1 \text{ °C}$ vai $\pm 4 \text{ %}$ no nolasījuma intervālā 0–1250°C, un $\pm 2,2 \text{ °C}$ vai $\pm 2 \text{ %}$ no nolasījuma intervālā –200–0 °C. Siltuma plūsma tiek mērīta ar *Sequoia* siltuma plūsmas plāksnēm. Visi mērījumu dati tiek saglabāti *Campbell Scientific CR1000* datu reģistrētājā. Visiem mērījumiem uzstādīts vienas minūtes laika solis.



2.13. att. Moduļa šķērsgriezums (pa kreisi); mēriekārtu izvietoējums monitoringam (pa labi).

2.2.3. Eksperimenta veikšana

Eksperimentā 2017. gada septembrī tika novērotas divas viena otrai blakus novietotas izmēģinājumu kastes – viena ar moduli, otra bez tā. Abas izmēģinājumu kastes tika novietotas uz ēkas jumta un pakļautas vienādiem robežapstākļiem. Izmēģinājuma kastes tika vērstas pret dienvidiem un noēnotas no pārējām pusēm (2.14. att.). Sekošana saulei tika veikta manuāli, grozot platformu zem kastēm.

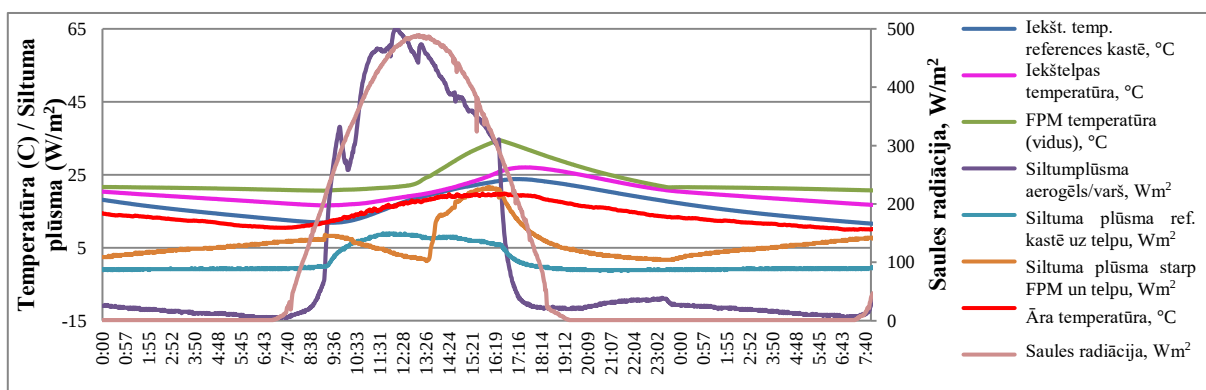


2.14. att. Eksperimenta izmēģinājuma kaste ar fasādes moduli pa kreisi un references sienas kaste bez fasādes moduļa (pa labi).

Abās kastēs tika izvietoti mēraparāti, lai fiksētu āra klimata datus (saules enerģija, vējš, relatīvais mitrums), iekštelpas temperatūru, siltuma pārvadi caur norobežojošo čaulu un temperatūrām fāžu pārejas materiālā. Mērījumu periodā apkopotie dati tika analizēti un izmantoti, lai verificētu un kalibrētu simulācijas modeli.

2.2.4. Eksperimenta rezultāti un to analīze

2.15. attēls atspoguļo vienas dienas (25.09.2017.) siltuma plūsmu un temperatūras datus moduļa iekštelpas un ārtelpas pusēs, kā arī references kastes mērījumu datus. Grafika sākums ir pusnakts, kad FPM sacietēšana rada latentu siltumu, kas izraisa siltuma plūsmu gan iekštelpas, gan ārtelpas virzienā. Plūsma no FPM uz āru telpu ir straujāka nekā no FPM uz iekštelpu lielākas temperatūras starpības dēļ. Kad saule aust (plkst. 7.05), siltuma plūsma no FPM uz ārpusi maina virzienu un plkst. 9.05 kļūst pozitīva. Pa to laiku siltuma plūsma uz telpu krītas un atkal ceļas plkst. 13.30. Kad saules radiācija krītas (plkst. 13.22), krītas arī siltuma plūsma no ārtelpas uz FPM, līdz tā kļūst negatīva (plkst. 16.55), tātad sākas siltuma zudumi no moduļa uz ārtelpas pusi. Nakts laikā FPM sacietēšana sākas, kad latentais siltums ir atbrīvots (apmēram plkst. 23.40) un abas siltuma plūsmas no FPM uz iekštelpu un ārtelpu krītas. Temperatūra telpā samazinās, jo siltuma plūsma virzienā uz āru dominē pār siltuma plūsmu virzienā uz iekšu.



2.15. att. 2017. gada 25. septembrī izmērītās siltuma plūsmas, saules radiācija un temperatūras references kastē un kastē ar moduli.

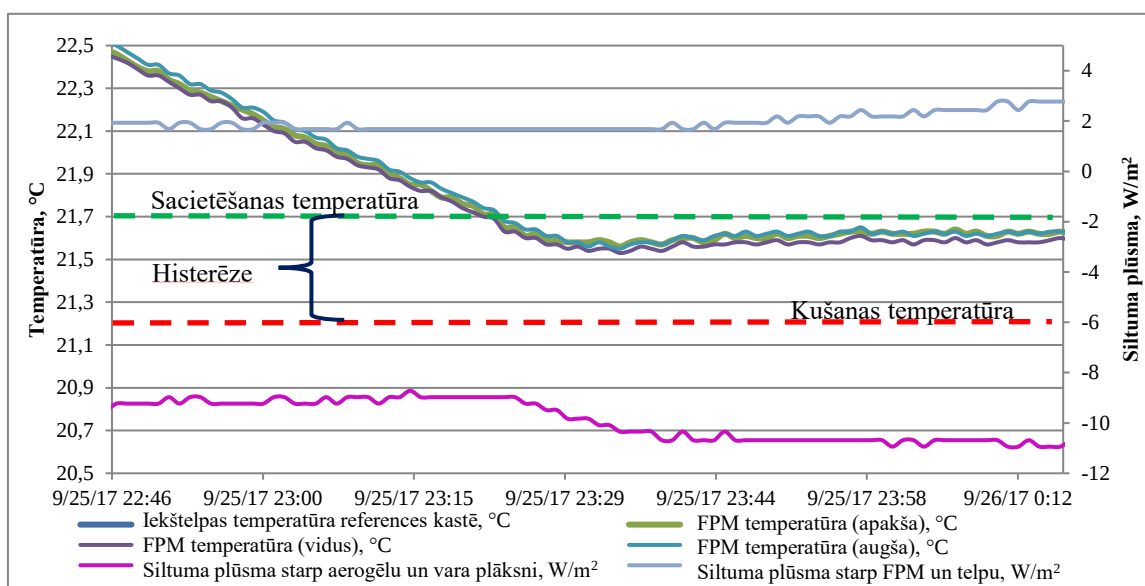
Galvenais dzinējspēks siltumplūsmas dinamikai starp FPM un telpu ir temperatūras atšķirība starp temperatūru FPM un iekštelpas temperatūru. Nakts laikā, kad sacietēšanas

procesā, kas sākas plkst. 23.40 un beidzas plkst. 7.55, tiek atbrīvots latentais siltums, temperatūra fāžu pārejas materiālā ir gandrīz nemainīga, savukārt telpas temperatūra samazinās, tādējādi palielinās temperatūras starpība. Siltuma plūsma no FPM uz telpu palielinās gan latentā siltuma, gan temperatūru atšķirības dēļ. FPM temperatūra sāk palielināties brīdī, kad saules radiācijas siltuma plūsma iekļūst FPM (plkst. 9.05) un sākas FPM kušana. Šī procesa sākumā temperatūru atšķirība samazinās, radot samazinātu siltuma plūsmu, bet pēc tam temperatūras starpība palielinās, pateicoties nobīdei, kas saistīta ar FPM kušanas procesu. Plkst. 13.30 siltuma plūsma sāk samazināties, jo telpas temperatūra tuvojas temperatūrai FPM. Nakts laikā sacietēšanas process sākas plkst. 23.40, kad FPM sasniedz sacietēšanas temperatūru.

Iekštelpas temperatūras dinamika un siltuma plūsma references kastē atšķiras no tiem pašiem moduļa kastē izmērītajiem parametriem. Siltuma plūsma references kastē sakrīt ar novēloto saules radiāciju, un tās maksimālais pīķis, kas sasniegts plkst. 11.50, ir apmēram četras reizes mazāks nekā modulī reģistrētā siltuma plūsma. Iekštelpas temperatūra references kastē atšķiras intervālā no 0,5 °C, dienas laikā sasniedzot šo vērtību plkst. 14.30, līdz 5 °C nakts periodā plkst. 7.50, kas parāda fāžu pārejas materiālā akumulētās enerģijas ietekmi.

Laika nobīde starp saules radiāciju un FPM temperatūru ir 3,5 stundas, starp FPM un iekštelpu temperatūru nobīde ir 45 minūtes. References kastē iekštelpas temperatūras pīķis no saules radiācijas pīķa ir nobīdīts par četrām stundām.

2.16. attēls atspoguļo FPM sacietēšanas procesu, kas sākas plkst. 23.40. Temperatūra nokrītas un tad sāk celties. To izraisa sacietēšanas process, kad FPM sāk atbrīvot latentu siltumu un siltuma plūsma palielinās. Siltumu nevar nekavējoties nodot, tādēļ FPM temperatūra samazinās zem kušanas temperatūras, izraisot pārdzesēšanas efektu. Siltuma plūsma palielinās straujāk uz ārtelpu nekā uz iekštelpu, pateicoties lielākai temperatūru starpībai starp FPM un āru. Kad siltuma plūsma uz telpu sāk palielināties, sacietēšanas temperatūra stabilizējas apmēram 21,6 °C. Sacietēšana nenotiek pie kušanas temperatūras, un to labi parāda fāžu pārejas materiāla histerēzes efekts.



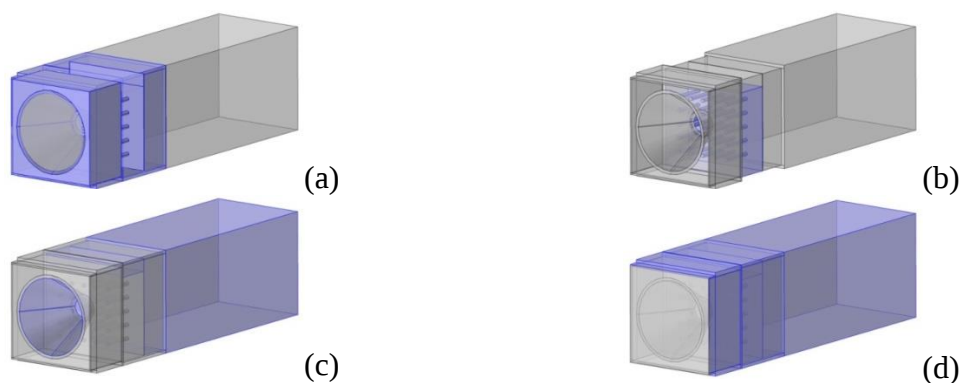
2.16. att. Fāžu pārejas materiāla sacietēšanas process.

3. KLIMATAM ADAPTĪVĀS FASĀDES MODUĻA BI-SES MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

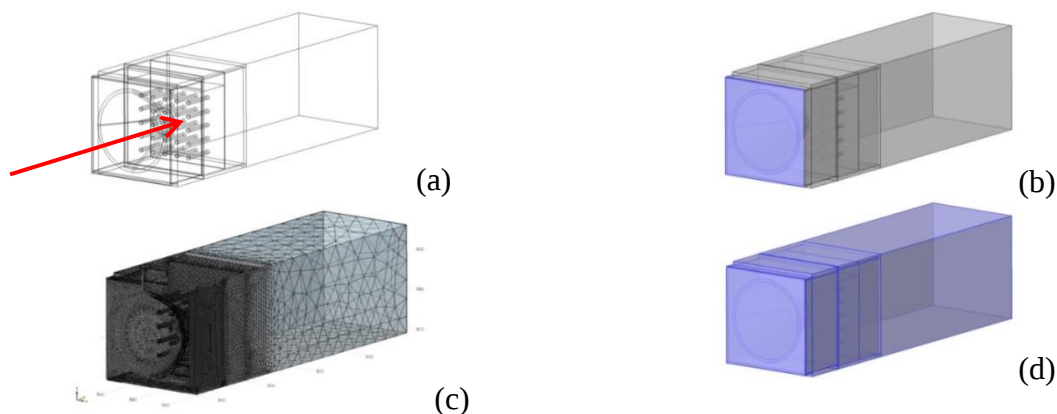
3.1. Matemātiskā modelēšana *COMSOL Multiphysics* vidē, siltuma pārnese procesu lietojums, lietotie robežnosacījumi

Fasādes modulis veidots kā trīsdimensiju objekts *COMSOL Multiphysics* 5.1 vidē, kas simulē siltumpārnesi, ņemot vērā siltumvadītspēju, konvekciju un radiāciju. [23]. Modelī ievadītas laikā mainīgo parametru īpašības, un matemātiskā modeļa aprēķins veikts laika nogrieznī. Modeļa veidošanai izvēlēti šādi robežnosacījumi (3.1. att., 3.2. att.):

- 1) siltumpārnese cietās vielās (3.1. att.) – attiecība starp siltuma plūsmas lauku q un temperatūras gradientu ∇T , kur $q = -k\nabla T$;
- 2) siltumpārnese ar fāžu pāreju (3.1. att.) – FPM, kas ir 50 mm plats;
- 3) siltumpārnese šķidrumos (3.1. att.) – gaisa apjomiem;
- 4) siltumizolācija (3.1. att.) – piešķir adiabatisko nosacījumu; siltuma pārnese no/uz šīm virsmām nenotiek;
- 5) siltuma avots (3.2. att.) – saules radiācija (W/m^2), imitējot Freneļa lēcas koncentrēšanu, sakopota vienā punktā; sarkanā bulta norāda uz $0,5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$ uz siltuma slodzes punktu; saules radiācijas dati – vidējie klimata dati Rīgā;
- 6) temperatūra (3.2. att.) – āra gaisa temperatūra (Rīga) modeļa ārējai virsmai.



3.1. att. Robežnosacījumi modelim; apjoms, uz kuru attiecas katrs aprakstītais siltumfizikas process, iekrāsots zils.



3.2. att. Robežnosacījumi modelim; apjoms, uz kuru attiecas katrs aprakstītais siltumfizikas process, iekrāsots zils. Turpinājums 3.1. attēlam.

Modeļa ārējā konstrukcijai, kas sastāv no saplākšņa un siltumizolācijas, COMSOL aprēķina programmā izmantota siltuma pārnese cietās vielās, tā ārējās virsmas robežojas ar āra apstākļiem un tas lietots atbilstoši programmatūras definētajiem aprēķina detalizācijas līmeņiem – smalko elementu tīklojums. Laika solis – 1 h. Sākotnējā temperatūra visiem modeļa elementiem lietota viena un izvēlēta katrai modelēšanas situācijai cita – raksturīgā sezonas temperatūra.

3.2. Izmantotie vienādojumi

Solārais fasādes modulis aprakstīts kā no laika atkarīgs trīsdimensionāls siltuma pārnese process, apvienots ar fāžu pāreju. Pārejas temperatūra FPM ir 3 °C, lai samazinātu simulācijas laiku. Ārējās gaisa šķirkārtas termiskā pretestība 65 (m²K)/W. Vispārīgā vienādojuma forma, kas regulē siltuma pārnese procesu moduļa cieto vielu un gaisa slāņos, ir aprakstīti šādi:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T - \nabla(k \nabla T) = Q, \quad (3.1.)$$

kur ρ – blīvums, kg/m³;

C_p – siltumietilpība, kJ/(kg K);

k – siltumvadītspēja, W/(m K);

T – absolūtā temperatūra, K;

t – neatkarīgais mainīgais laiks;

Q – siltuma avoti, kas nav viskozā sildīšana, W/m³.

Fāžu pārejas vienādojumi ir balstīti pieņēmumā, ka šķidrā fāzē sajaukšanās nenotiek un vadīšanas vienādojums cietajā fāzē ir tāds pats kā 3.1. vienādojums. Kad FPM sasniedz fāžu pārejas temperatūru, tiek pieņemts, ka tas notiek laika posmā starp $T_{FP} - \Delta T/2$ un $T_{FP} + \Delta T/2$ (ΔT ir FPM pārejas temperatūra). FPM fāzi šajā periodā definē funkcija θ , kas atspoguļo fāzes daļu pirms fāžu pārejas un ir vienāda ar 1 pirms $T_{FP} - \Delta T/2$ (FPM ir cietā agregātstāvoklī) un vienāds ar 0 pēc $T_{FP} + \Delta T/2$ (FPM ir šķidrā agregātstāvoklī). No temperatūras atkarīgais blīvums tiek aprēķināts šādi:

$$\rho = \theta \rho_{fāze1} + (1 - \theta) \rho_{fāze2}, \quad (3.2.)$$

kur indeksi fāze 1 un fāze 2 atspoguļo FPM cieto un šķidro fāzi.

Siltumietilpība C_p tiek aprēķināta ar formulu:

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{fāze1} C_{p,fāze1} + (1 - \theta) \rho_{fāze2} C_{p,fāze2}) + L \frac{\partial a_k}{\partial T}, \quad (3.3.)$$

kur L – latentais siltums (J/kg);

a_k – izkususi masas daļa:

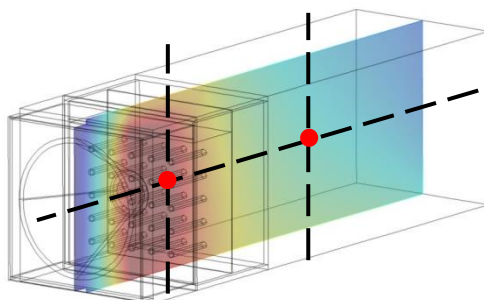
$$a_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - \theta) \rho_{fāze2} - \theta \rho_{fāze1}}{(1 - \theta) \rho_{fāze2} + \theta \rho_{fāze1}}. \quad (3.4.)$$

Siltumvadītspēja:

$$k = \theta k_{fāze1} + (1 - \theta) k_{fāze2}. \quad (3.5.)$$

3.3. Simulācijas modeļa izvadmērījumi

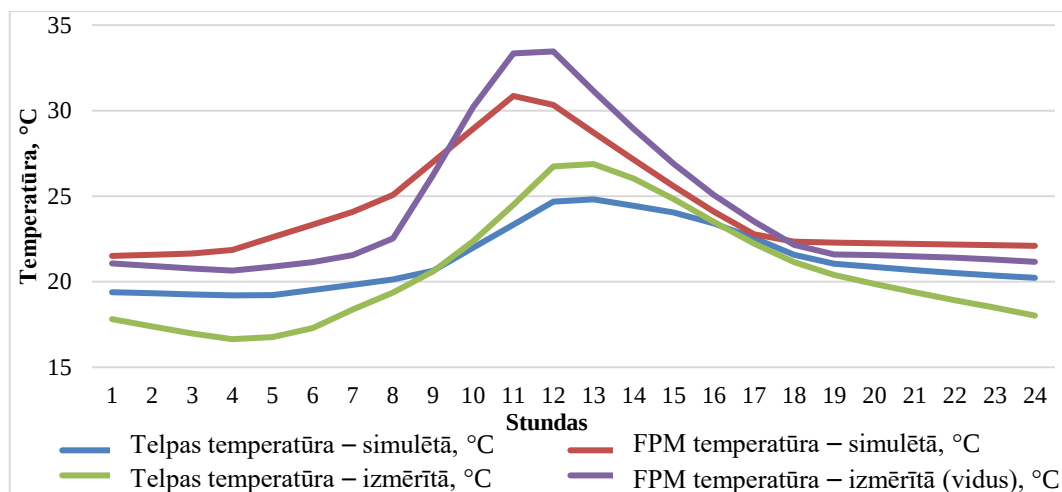
COMSOL Multiphysics 5.1. iespējams izvadmērījumus aprēķināt katram atkarīgajam mainīgajam. Lai varētu izdarīt secinājumus un salīdzināt eksperimentā iegūtos rezultātus ar simulācijas rezultātiem, par salīdzināmajiem izvadmērījumiem izvēlēta temperatūra fāžu pārejas materiālā un iekštelpas temperatūra (3.3. att.).



3.3. att. Simulācijas modeļa izvad dati. Temperatūra FPM un iekštelpas temperatūra.

3.4. Simulācijas modeļa validācija

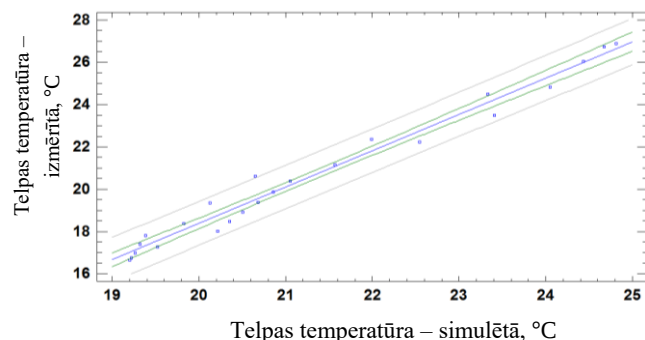
Eksperimentā reģistrētie dati tika salīdzināti ar modelēšanas rezultātiem atbilstoši 25.09.2017. apstākļiem. 3.4. attēls atspoguļo labu sakritību starp simulāciju un mērījumiem. Novērotā FPM temperatūra palielinās ar mazāku ātrumu kušanas procesā un straujāk pēc tam, kad kušanas process beidzies. Analoga tendence ir iekštelpas temperatūrai. Iespējams, šo atšķirību rada izmantotā FPM pārejas temperatūra, ārējās gaisa šķirkārtas slāņa pieņemtā siltuma pretestība vai pieņemtais iekštelpas relatīvais mitrums 70 %.



3.4. att. Izmērīto un simulēto rezultātu salīdzinājums atbilstoši 25.09.2017. apstākļiem.

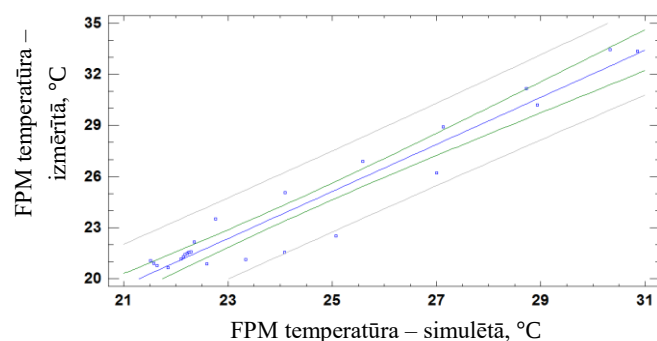
3.5. attēls ilustrē lineārā modeļa salīdzināšanas grafiku, kas apraksta attiecību starp izmērīto un simulēto iekštelpas temperatūru. P vērtība ir mazāka nekā 0,05, tāpēc statistiski nozīmīga ir saikne starp izmērīto telpas temperatūru un simulēto telpas temperatūru ar 95,0 % ticamības līmeni. R kvadrāta statistika norāda, ka modelis kā atbilstošas paskaidro 97,9296 % no izmērītās temperatūras vērtības izmaiņām. Korelācijas koeficients vienāds ar 0,989594,

kas norāda, ka ir relatīvi spēcīga sakarība starp mainīgajiem. Aprēķina standartklūda rāda nesaistes standartnovirzi 0,484235. Vidējā absolūtā kļūda 0,383805 ir nesaistes vidējā vērtība.



3.5. att. Izmērītās un simulētās iekštelpas temperatūras salīdzināšana.

Salīdzinot izmērīto un simulēto FPM temperatūru (3.6. attēls), P vērtība ir mazāka par 0,05, tādēļ ir statistiska sakarība starp izmērīto un simulēto FPM temperatūru 95,0 % ticamības līmenī. R kvadrāta statistika norāda, ka modelis kā atbilstošas paskaidro 93,3028 % no izmērītās temperatūras vērtības izmaiņām. Korelācijas koeficients ir vienāds ar 0,965934, kas norāda relatīvi spēcīgo attiecību starp mainīgajiem lielumiem. Aprēķina standartklūda rāda, ka nesaistes standartnovirze ir 1,12314. Vidējā absolūtā kļūda 0,810186 ir nesaistes vidējā vērtība.



3.6. attēls. Izmērītās un simulētās FPM temperatūras salīdzināšana.

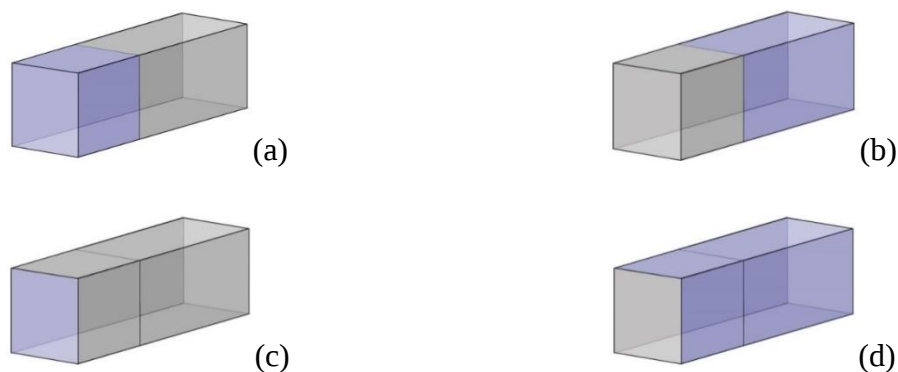
Validācijas rezultāti apstiprina, ka matemātiskās simulācijas dati tuvināti sakrīt ar reālos apstākļos veiktiem mērījumiem. Tātad aprēķina modelis derīgs turpmākai izpētei, lai salīdzinātu dažādas konstrukciju alternatīvas, un modelēšanai dažādos klimatiskajos apstākļos.

3.5. Modelēšanas rezultātu analīze

Lai novērtētu *Bi-SES* moduļa efektivitāti, tika salīdzinātas divas alternatīvas: aprakstītais solārais fasādes modulis (A1) un necaurspīdīga siena ar U vērtību 0,28 W/(m²K) (A2).

References modelī solārais fasāžu modulis aizstāts ar siltumizolāciju. Modelēšanas programmā lietoti fizikas procesi (3.7. att.) – siltuma pārnese cietās vielās siltumizolācijai (a) un siltuma pārnese šķidrums gaisa telpai (b). Ārējiem apstākļiem pakļauta ārēja plakne, ko sedz akrila stikls (t. sk. saules radiācijai) (c), pārējās plaknes robežojas ar siltumizolāciju (d). References sienas modeļa izvadattēliem lietotais parametrs – iekštelpu temperatūra. Katrā

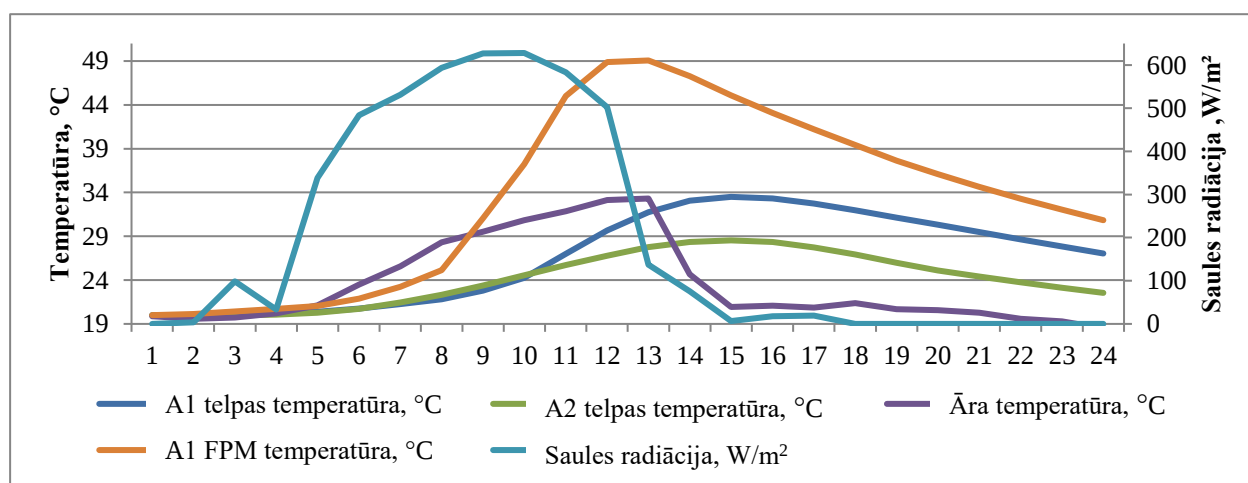
simulācijas uzstādījumā abām kastēm lietotas vienādas sākotnējās vērtības, visiem abu modeļu elementiem sākuma temperatūra piešķirta vienāda. Saules radiācija modulim A2 uz ārējās virsmas pievienota līdz ar pārējiem ārējiem klimata datiem. Modulī A1 saules radiācija kodolam norādīta koncentrētā punktā, analoga reālajiem klimatiskajiem datiem.



3.7. att. Robežnosacījumi modelim, apjoms, uz kuru attiecas katrs aprakstītais siltumfizikas, process iekrāsots zils.

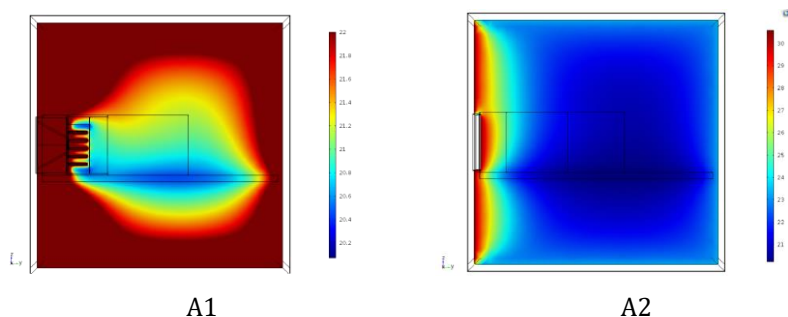
Lai salīdzinātu modeļu A1 un A2 siltumtehnisko sniegumu dinamikā, abas alternatīvas tika simulētas vienas saulainas dienas garumā katrā no četriem gadalaikiem un starpsezonā: vasarā, ziemā, agrā rudenī un vēlā rudenī. Agrā rudens dienas simulācija uzskatāma par analogu vēla pavasara dienai, bet vēlā rudens diena uzskatāma par analogu agrā pavasara dienai, jo āra gaisa vidējās temperatūras ir līdzīgas un saules radiācijas atšķirības šīs simulācijas ietvaros var uzskatīt par līdzīgām. Papildu siltuma avots iekštelpai netika pievienots.

Simulētās iekštelpas un FPM temperatūras, āra gaisa temperatūra un saules radiācija vasaras dienai ir parādīta 3.8. attēlā. Visas temperatūras simulācijas sākumā uzstādītas uz $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$, t. i., FPM ir cietā agregātstāvoklī. Temperatūras sāk pieaugt pēc saullēkta. Tomēr temperatūras palielināšanās ātrums katrai alternatīvai ir cits: lielākais ātrums ir A1, savukārt A2 temperatūra ceļas lēnāk. FPM temperatūra A1 strauji pieaug un maksimālajā punktā sasniedz $+49\text{ }^{\circ}\text{C}$.



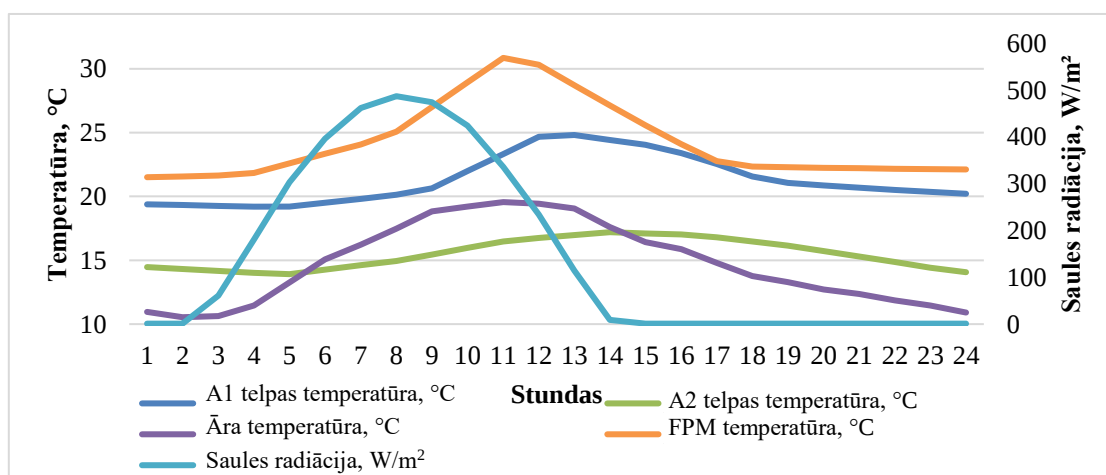
3.8. att. Simulētās iekštelpas un FPM temperatūras, āra gaisa temperatūra un saules radiācija vasaras dienai.

3.9. attēls parāda temperatūru sadalījumu saulainas dienas sestajā stundā abās alternatīvās. Zemāka temperatūra ir iekštelpas apakšējā plāknē, jo tur izvietots kastes konstrukcijas noturībai nepieciešamais saplākšņa balsts, kas strādā kā termiskais tilts ar paaugstinātu siltumvadītspēju.



3.9. att. Temperatūras sadalījums vasaras dienas sestajā stundā abās alternatīvās.

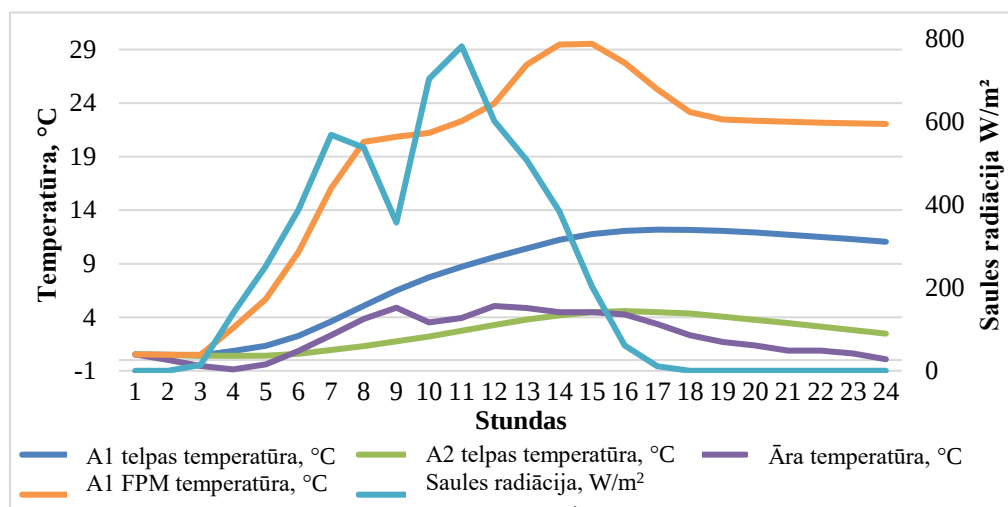
3.10. attēls ilustrē simulētās telpas temperatūras dinamiku abām alternatīvām, FPM temperatūru A1, āra gaisa temperatūru un saules radiāciju agra rudens dienai. Augstākā iekštelpas temperatūra tiek sasniegta, lietojot solāro fasādes moduli (A1), necaurspīdīgajā konstrukcijā temperatūra ir zemāka. Dinamiskā tendence abām alternatīvām ir līdzīga, ieskaitot nobīdi attiecībā pret saules radiāciju. FPM temperatūra A1 pieaug un sasniedz +30,8 °C, pateicoties saules radiācijai. Salīdzinot ar vasaras dienu, FPM temperatūra ir par ~ 18 °C zemāka. Šādas atšķirības galvenais cēlonis ir siltuma zudumi pret āra gaisu, ko rada lielāka temperatūras atšķirība starp FPM un āra gaisa temperatūru. Zudumi šajā brīdī ir lielāki nekā siltuma plūsma, ko saules radiācija piegādā fāžu pārejas materiālam.



3.10. att. Simulētās iekštelpas un FPM temperatūras, āra gaisa temperatūra un saules radiācija agra rudens dienai.

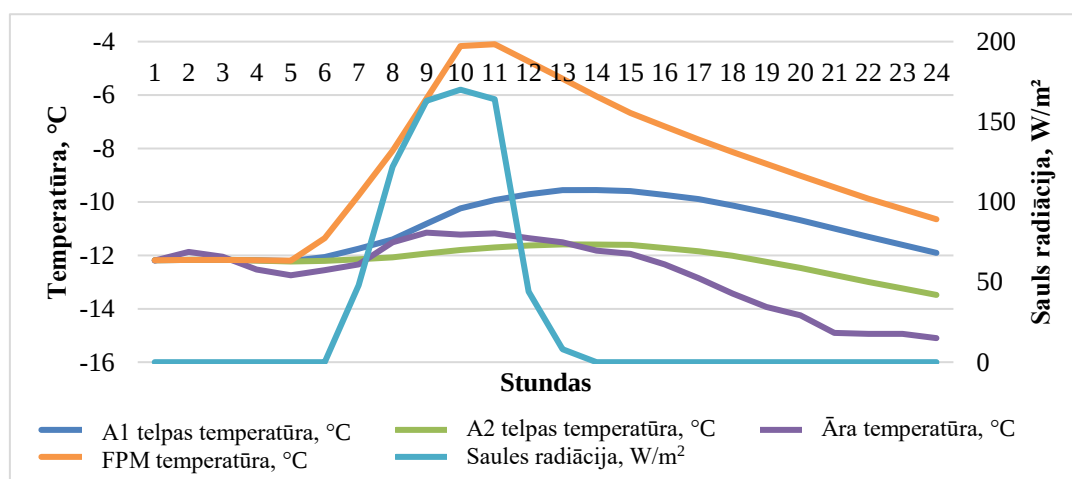
Simulētās iekštelpas un FPM temperatūras, āra gaisa temperatūra un saules radiācija vēla rudens dienai ir parādītas 3.11. attēlā. Neskatoties uz to, ka saules radiācijas līmenis ir līdzīgs agra rudens dienas saules radiācijai (3.10. att.), āra gaisa temperatūras ir daudz zemākas, un tam ir ietekme uz siltuma plūsmas dinamiku. Dienas sākumā visas temperatūras uzstādītas uz 0 °C. Iekštelpas temperatūra abās alternatīvās pieaug ar līdzīgu tendenci. Lielāka temperatūra tiek sasniegta A1, savukārt A2 temperatūra ir zemāka. Siltuma zudumi, salīdzinot

ar agri rudens dienu, ir lielāki, pateicoties lielākai temperatūru starpībai starp FPM un āra gaisa temperatūru.



3.11. att. Simulētās iekštelpas un FPM temperatūras, āra gaisa temperatūra un saules radiācija vēla rudens dienai.

Ziemas periodā āra gaisa temperatūra nokrīt zem 0 °C, saules enerģija ir pieejama mazākā intensitātē un mazāk stundas dienā (3.12. att.). Simulācija sākas pie āra gaisa temperatūras – 12 °C. Saules enerģija, kas savākta A1, var palielināt iekštelpas temperatūru maksimāli līdz – 9,5 °C, bet A2 iekštelpas maksimums simulētajā ziemas dienā –11,5 °C. Iekštelpu temperatūras krītas lēnāk nekā āra gaisa temperatūra.



3.12. att. Simulētās iekštelpas un FPM temperatūras, āra gaisa temperatūra un saules radiācija ziemas dienai.

Izveidotais solārais fasādes modulis piemērots izvietošanai uz dienvidiem vērstajās fasādēs un jumtos. Modulim jāatrodas tiešos krītošās gaismas staros. Apkārtējās vides noēnojums samazinās moduļa efektivitāti un iespēju uzkrāt solāro enerģiju.

4. KLIMATAM ADAPTĪVĀ FASĀDES MODUĻA *BI-SES* LIETOJUMS ĒKĀ

Kā piemērs solārā fasādes moduļa *Bi-SES* lietošanai jaunbūvēs izvēlēta Latvijas Laikmetīgās mākslas muzeja (LLMM) ēka. Šīs ēkas projektēšanā nav iespējams ievērot visus ZEP ēku projektēšanas principus, saskaroties ar funkcionāliem ierobežojumiem. Turpmākajās nodaļās tiks apskatītas iespējas integrēt ēkas norobežojošās konstrukcijās izstrādāto solāro fasādes moduli.

Ēkas novietne, funkcija. Latvijas Laikmetīgās mākslas muzeja ēkas projektēšana pēc uzvaras arhitektūras metu konkursā uzticēta arhitektam seram Deividam Adžejam (*David Adjaye* “*Adjaye Associates*”). Muzeja ēka izvietota Rīgā, jaunattīstāmajā kvartālā *New Hansa City*. Austrumu un rietumu virzienos pieguļošajos kvartālos izvietosies līdz 14 stāvu augstas dzīvojamās un administratīvās ēkas, dienvidu pusē pieguļošā kvartāla ēku pieļaujamais stāvu skaits – septiņi. Ziemeļu pusē ēka robežojas ar parku.

Vispārīgie rādītāji. Gruntsgabals lielā mērā ir ietekmējis ēkas formu – pieļaujamā apbūve taisnstūrveida apbūves gabalā. Ēkas ārējam veidolam ir atturīga, no taisnstūra paralēlskaldņa atvasināta forma ar ekspresīvām trijstūra formas jumta plaknēm ar dažādiem jumta slīpumiem un vērsumiem pret debespusēm. Ēkai ir viens pazemes stāvs un divi virszemes stāvi. Kopējais ēkas augstums virs zemes – 20 m. Pazemes stāvs iedziļināts 3,5 m no ielas atzīmes.

***Bi-SES* elementa iespējas LLMM mikroklimata uzturēšanai nepieciešamās enerģijas samazināšanai.** Dienvidu fasāde ir maz stiklota. LLMM ēka gruntsgabalā novietota tā, ka tās garenvirziena fasādes ir orientētas D–Z virzienos. Lai veidotu optimālus mākslas darbu vizuālās uztveres apstākļus un nodrošinātu to uzglabāšanas prasības, ēkās ar muzeja funkciju ir specifiskas mākslīgā un dabīgā apgaismojuma prasības, tādēļ stikloto konstrukciju izvietojumu nevar pakārtot siltumtehnikajiem ieguvumiem, gaisma caurlaidīgo plakņu izvietojumu nosaka apgaismojuma prasības. Katram mākslas darbam / darbu grupai var būt noteiktas specifiskas apgaismojuma prasības dažādā intensitātē – no 100 % dabīgā apgaismojuma līdz pilnīgi aptumšotai telpai. Dabīgajam apgaismojumam mākslas darbu apskatei vispiemērotākā ir ziemeļu gaismas intensitāte. 4.1. attēlā atspoguļotas vienas galerijas apgaismojuma iespējas, izmantojot uz ziemeļiem vērstos stiklojumus.



4.1. att. LLMM ēkas galerijas apgaismojuma analīzes piemērs.

Pretēji tipiskās zema enerģijas patēriņa ēkas uzbūves principiem LLMM ēkas ziemeļu fasādē izvietoti plaši stiklojumi nepieciešamās funkcijas un saiknes ar parku nodrošināšanai, bet ēkas dienvidu fasādē ir tikai neliels stiklotu plakņu īpatsvars. 4.2. attēlā ar gaiši zilu toni iekrāsotas stiklotās plaknes. Tas paver iespēju dienvidu fasādē izvietot promocijas darbā

izstrādāto elementu *Bi-SES* ēkas enerģijas patēriņa samazināšanai un mikroklimata uzturēšanai. Pieejamā platība dienvidu fasādē ir 1097,4 m².



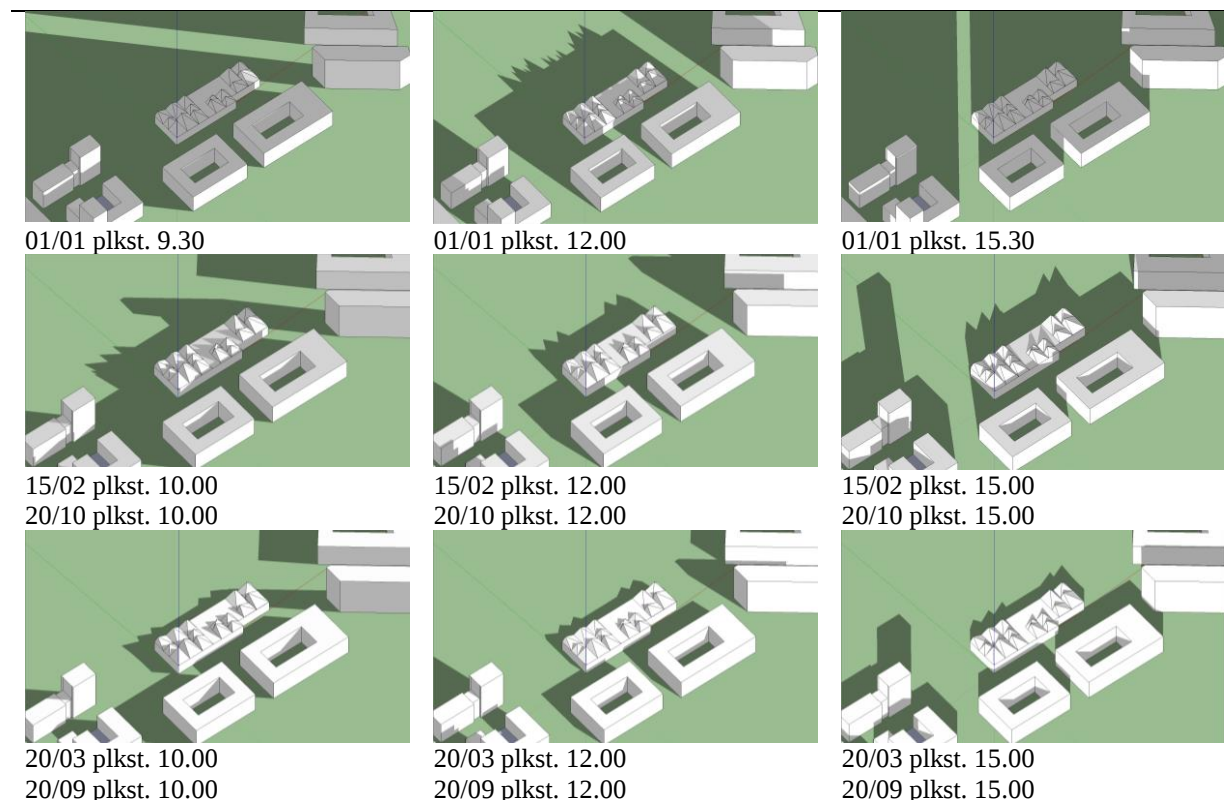
4.2. att. Ēkas dienvidu fasāde.



4.3. att. Ēkas ziemeļu fasāde.

Ēkas pirmā stāvā fasādes apdarei plānots izveidot dekoratīvu kārtās lieta betona virsmu, bet otrā stāva fasāde un jumta plaknes tiek veidotas kā vēdināmas konstrukcijas ar izvirzītu vertikālu postu dalījumu. Otrajā stāvā un jumta plaknēs fasādes apdarei izmantoti dolomīta akmeņi. Sekojot arhitekta iecerei par dalītu apdari ēkas stāvos, *Bi-SES* elementus tiek piedāvāts izvietot ar vertikālajiem postiem dalītajās plaknēs.

LLMM ēkas noēnojuma studijas. *Bi-SES* elements veidots kā saules enerģijas uztvērējs, tādēļ efektīvi ir to izvietot plaknēs, kas saņem visvairāk saules radiāciju. 4.4. attēlā atspoguļotas LLMM ēkas noēnojuma studijas apkārtējā vidē (*Sketchup*).



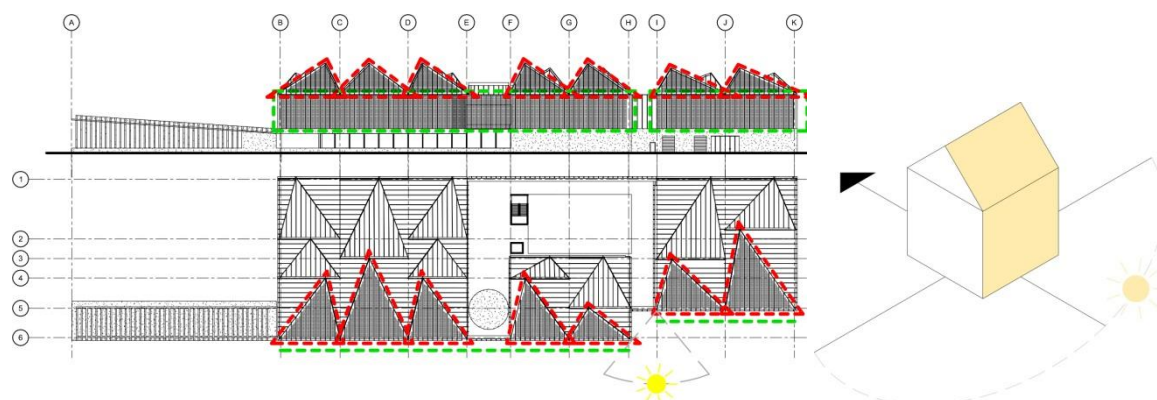
4.4. attēls. Noēnojuma studijas.

Redzams, ka janvārī, laikā ar viszemāko saules azimuta leņķi, ēka visas dienas garumā ir gandrīz 100 % noēnota. Sākot no 15. februāra līdz 20. oktobrim, pirmajā pret dienvidiem orientētajā joslā izvietotās jumta plaknes ir nenoēnotas visas dienas garumā. Otrā stāva dienvidu fasādes daļa nenoēnota ir laika posmā no 20. marta līdz 22. septembrim. Jumta plaknes, kas neatrodas pirmajā pret dienvidiem vērstajā rindā, noēno priekšā esošās plaknes, tādēļ *Bi-SES* izvietošana šajās plaknēs netiek apskatīta.

Bi-SES elements aktivizējas, kad, saulei esot noteiktā leņķī attiecībā pret *Bi-SES* virsmu, lēcas fokuss pārvietojas uz savācošās plaknes. Tādēļ fasādes noēnojums, kas rodas saulei atrodoties leņķī, kas nerada fokusu uz savācošās plaknes (gan horizontālā, gan vertikālā virzienā), netiek ņemts vērā (4.4. attēlā norādīts diennakts laiks).

Ēkas noēnojuma studijas rāda, ka ēkas dienvidu fasāde nenoēnota ir laika posmā no aprīļa līdz septembra sākumam. Savukārt pirmajā joslā izvietotās uz dienvidiem vērstās jumtu plaknes nenoēnotas ir garāku laika posmu – no februāra vidus līdz oktobra sākumam.

***Bi-SES* elementu iestrāde LLMM norobežojošās konstrukcijās enerģijas patēriņa samazināšanai ēkas apkurei un dzesēšanai.** Apskatīti trīs *Bi-SES* izvietošanas scenāriji (4.5. att.): (I) ēkas dienvidu fasādes otrā stāva daļā (zaļš); (II) ēkas uz dienvidiem orientētajās pirmās joslas jumta plaknēs (sarkans); (III) kombinēts 1. un 2. scenārijs – *Bi-SES* izvietoti gan fasādē, gan jumta plaknēs. Elementu skaits un iestrādājamais FPM tilpums atbilstoši aprakstītajiem scenārijiem redzams 4.1. tabulā.



4.5. att. *Bi-SES* izvietošanas 1. scenārijs – izvietošana D fasādē (zaļš). 2. scenārijs – izvietošana jumta plaknēs (sarkans).

4.1. tabula

Izvietoto *Bi-SES* elementu skaits atbilstoši scenārijiem

Nr.	Apraksts	Elementu skaits, gb	FPM tilpums, m ³
1.	Ēkas dienvidu fasādes otrā stāva daļā	10 400	5,98
2.	Ēkas uz dienvidiem orientētajās pirmās joslas jumta plaknēs	7200	4,14
3.	Kombinēts 1. un 2. scenārijs – <i>Bi-SES</i> izvietoti gan fasādē, gan jumta plaknēs	17 600	10,12

Minimālais izvietojamo elementu skaits ir 2. scenārijā, t. i., 7200 elementi jeb $\sim 4 \text{ m}^3$ fāžu pārejas materiāla, bet 3. scenārijā kopējais FPM tilpums sasniedz 10 m^3 .

SECINĀJUMI

1. Lai sasniegtu arvien jaunus ēku energoefektivitātes paaugstināšanas mērķus, nepieciešami inovatīvi risinājumi, kas piešķirtu ēku norobežojošajām konstrukcijām dinamiskas īpašības un ļautu aktīvi piedalīties ēkas enerģijas bilanci.
2. Pētījuma mērķis ir izstrādāt biomimikrijas metodikā balstītu, inovatīvu norobežojošo konstrukciju. Ar daudzkritēriju metodi salīdzinot dabā sastopamās termoregulācijas stratēģijas, par labāko piemēru atdarināšanai norobežojošajās konstrukcijās tika atzīts trāns – zemādas tauku slānis, kas sastopams arktisko ūdeņu zīdītājos.
3. Sekojot biomimikrijas pieejai, atdarinot termoregulācijas procesus zemādas tauku slānī un pievienojot jūraszvaigznes virsmā sastopamo risinājumu ar gaismas staru koncentrēšanu, tika izstrādāts solārais fasādes modulis, kas dienā uztver un akumulē saules enerģiju un naktī nodod telpai, samazinot apkures un dzesēšanas slodzes gandrīz nulles enerģijas ēkās. Darbā tika pētīta šī fasādes moduļa uzkrāšanas ietilpība un dinamiskā uzvedība. Izveidotais modulis sastāv no fāžu pārejas materiāla, aerogēla, Freneļa lēcas un vara siltuma pārejas paātrinātājiem.
4. Pētījums rāda, ka siltuma plūsmu dinamika, akumulācijas un izlādes procesi izstrādātajā solārajā fasādes modulī ir ļoti sarežģīti, ņemot vērā mainīgos āra un iekštelpas apstākļus. Eksperimenta rezultāti liecina, ka vienādos apstākļos telpas temperatūras un siltuma plūsmas dinamiskā uzvedība references sienā, kas izgatavota no minerālvates, ir atšķirīga no uzvedības solārā fasādes moduļa prototipā. Siltuma plūsma references sienā seko saules starojuma dinamikai ar novēlošanos, un tā maksimālā pīķa temperatūra ir aptuveni četras reizes mazāka nekā solārās fasādes moduļa prototipā. Telpas temperatūras atsaucēs kastē atšķiras no temperatūras moduļa kastē par 0,5 °C dienas laikā un par 5 °C naktī, pateicoties siltumenerģijas uzkrāšanās ietekmei fāžu pārejas materiālā. Laika nobīde starp saules starojumu un FPM temperatūru ir 3,5 h, bet starp FPM un iekštelpas temperatūru – 45 min. Iekštelpu temperatūras maksimums references kastē aizkavējas no saules radiācijas maksimuma par 4 h.
5. Matemātiskās simulācijas rezultāti rāda, ka četru saulaino dienu laikā, kad tiek salīdzinātas divas dažādas alternatīvas solārais fasādes modulis (A1) un necaurspīdīga references siena (A2), kas atspoguļo vasaru, ziemu, vēlu rudeni un agru rudeni, augstāku istabas temperatūru var panākt, ēkas sienā iebūvējot solāro fasādes moduli. Iekštelpu temperatūras starpība intervālā no 0,5 °C līdz 9 °C tiek novērota starp necaurspīdīgu references sienu un solāro fasādes moduli atkarībā no dienas un sezonas laika. Telpas temperatūras dinamiku abās alternatīvās ietekmē saules enerģijas pieplūdums modulī un temperatūras starpība starp FPM un āra temperatūru A1 gadījumā un iekštelpas un āra temperatūru A2 gadījumā. Simulācija arī parāda, ka FPM tilpuma maiņa var vai nu palielināt, vai samazināt uzkrāto latentu enerģiju.
6. Pētījuma rezultāti pierāda, ka Freneļa lēcas izmantošana saules starojuma koncentrēšanai apvienojumā ar siltumizolācijas materiālu ar zemu siltuma vadītspēju var palielināt iekštelpu temperatūru un samazināt ēkas enerģijas patēriņu apkurei,

salīdzinot ar tradicionālas uzbūves necaurspīdīgu sienu. Novērojumi saskan ar citu pētījumu rezultātiem [24]–[26].

7. Turpmākajos pētījumos ārējā slānī tiks izveidots kustīgs caurspīdīgo aerogela granulu slānis, lai samazinātu siltuma zudumus no elementa, kad nav pieejama saules enerģija. Tāpat nepieciešams pievienot saules sekošanas sistēmu, kas nodrošinās moduļa optimālu vērsumu pret sauli un automatizācijas kontroli, nodrošinot moduļa pielāgošanos apkārtējās vides temperatūras izmaiņām. Cits būtisks jautājums ir novērtēt vara plāksnes izmēra samazināšanu vai pat aizstāšanu ar kompaktu siltuma pārneses paātrinātāja formu, tā tilpuma attiecību pret FPM tilpumu vai saskares plakni ar citiem materiāliem modulī, lai samazinātu siltuma zudumus no FPM uz āra vidi. Modulī tiks novērtēta enerģijas sezonālā uzkrāšanas iespēja.

ATSAUCES

- [1] J. M. Benyus, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, HarperCollins Publishers Inc, 1997.
- [2] S. Gosztonyi, M. Brychta, P. Gruber, “Challenging the engineering view: comparative analysis of technological and biological functions targeting energy efficient facade systems,” %1 *Design and Nature V*, Pisa, Italy, 2010.
- [3] Neil A. Campbell, Jane B. Reece, Lawrence G. Mitchell, *Biology*, 5th edition, Benjamin/Cummings, 1999.
- [4] K. Schmidt-Nielsen, *Animal Physiology: Adaptation and Environment*, Cambridge University Press, 1997.
- [5] Richard W. Hill, Gordon A. Wyse, Margaret Anderson, *Animal Physiology*, Sinauer Associates, Inc, 2012.
- [6] E. S. E. Hafez (editor), W. Bianka, “Adaptation of Domestic Animals,” %1 *Termoregulation*, Philadelphia, Lea & Febiger, 1968, pp. 97–118.
- [7] D. M. Gates, *Biophysical Ecology*, New York: Springer – Verlag, 1980.
- [8] Bernd Würsig, William Perrin, Bernd Würsig, J. G. M. Thewissen, *Encyclopedia of Marine Mammals*, 2nd Edition, London: Academic Press, Elsevier, Inc, 2008.
- [9] C. A. DiMarzio, *Optics for Engineers*, Boca Raton: CRC Press; Taylor & Francis Group, LLC, 2012.
- [10] Annalisa Berta, James L. Sumich, Kit M. Kovacs, *Marine Mammals: Evolutionary Biology*, London: Academic Press, Elsevier, Inc., 2005.
- [11] Struntz D. J., McLellan W. A., Dillaman R. M., Blum J. E., Kucklick J. R., Pabst D. A., “Blubber development in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*),” *Journal of Morphology*, sēj. 259, nr. 1, pp. 7–20, 2004.
- [12] Paul Ehrlich, David S. Dobkin, Darryl Wheye, *Birder's Handbook: A Field Guide to the Natural History of North American Birds*, New York: Touchstone, Simon & Schuster, Inc., 1988.
- [13] E. M. a. M. Pereyra-Rojas, “Understanding the Analytic Hierarchy,” %1 *Practical Decision Making*, SpringerBriefs, 2017, pp. 7–17.
- [14] M. Majumder, *Impact of Urbanization on Water Shortage in Face of Climatic Aberrations*, Springer, 2015.
- [15] Pat Willmer, Graham Stone, Ian Johnston, *Environmental physiology of animals*, Blackwell Science, Ltd., 2005.
- [16] Sari A., “Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications: Thermal properties and thermal reliability,” *Applied Thermal Engineering*, sēj. 25, pp. 2100–2107, 2005.
- [17] Sari A., Karaipekli A., “Preparation and thermal properties of capric acid/palmitic acid

- eutectic mixture as a phase change energy storage material,” *Materials Letters*, sēj. 62, pp. 903–906, 2008.
- [18] Yuan Y. et al., “Fatty acids as phase change materials: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr. 29, pp. 482–498, 2014.
- [19] Karaipekli A., Sari A., “Preparation, thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of fatty acids/expanded vermiculite as novel form-stable composites for energy storage,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, sēj. 16, pp. 767–773, 2010.
- [20] “Rubitherm,” 28.03.2015. [Tiešsaiste]. Available: <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>
- [21] 10.11.2017. [Tiešsaiste]. Available: <https://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/5.0quot-x-5.0quot-2.8quot-focal-length-fresnel-lens/#downloads>
- [22] “Rubitherm Technologies GmbH,” 10.11.2017. [Tiešsaiste]. Available: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT21HC_EN_29062016.PDF
- [23] “Comsol,” Comsol, 21.05.2018. [Tiešsaiste]. Available: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>. [Piekļūts 5.21.2018.].
- [24] Karunesh Kant, A. Shukla, Atul Sharma, “Advancement in phase change materials for thermal energy storage applications,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, sēj. 172, pp. 82–92, 2017.
- [25] Mohammad H. Baghban, Per J. Hovde, Arild Gustavsen, “Numerical Simulation of a Building Envelope with High,” %1 *COMSOL conference*, Paris, 2010.
- [26] Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Yinying Zhang, “Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings,” *Energy and Buildings*, sēj. 67, pp. 56–69, 2013.