

Jānis Narbutis

SILTUMENERĢIJU UZKRĀJOŠAS ADAPTĪVĀS FASĀŽU SISTĒMAS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Jānis Narbutis

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorants

SILTUMENERĢIJU UZKRĀJOŠAS ADAPTĪVĀS FASĀŽU SISTĒMAS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji
profesore *Dr. sc. ing.*
RUTA VANAGA

tenūrprofesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Narbutis, J. Siltumenerģiju uzkrājošas adaptīvās fasāžu sistēmas. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. 42 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2026. gada 12. marta lēmumu Nr. 240.

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Zinātnes padomes Fundamentālo un lietišķo pētījumu projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskajās specializācijas jomās”, darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” specifiskā atbalsta mērķa 8.2.2. “Stiprināt augstākās izglītības iestāžu akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” ietvaros.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds



FLPP
FUNDAMENTAL AND
APPLIED RESEARCH
PROJECTS

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Vāka attēla autors Jānis Narbutis.

<https://doi.org/10.7250/9789934373060>
ISBN 978-9934-37-306-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 11. jūnijā plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes iela 12 k/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors Vladimirs Kirsanovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. sc. Peter D. Lund*,
Aalto Universitāte, Somija

Ph. D. Jurgis Zagorskas,
Viļņas Ģedimīna tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Jānis Narbutis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 127 attēli, 37 tabulas, kopā 311 lappušu. Literatūras sarakstā ir 195 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
Darba aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Darba hipotēze	6
Zinātniskā novitāte	6
Praktiskā nozīme	7
Zinātniskā darba aprobācija	8
Darba aprobācija zinātniskajās konferencēs	9
Citas zinātniskās publikācijas	9
Darba struktūra	9
1. LITERATŪRAS ANALĪZE	12
2. METODOLOĢIJA	15
2.1. Pētījuma dizains un metodoloģiskais pamatojums	16
2.2. Materiāli un aprīkojums	17
3. REZULTĀTI	19
3.1. Divu FPM ar kušanas temperatūru 21 °C un 28 °C salīdzinājums, izmantojot karstās plātnes metodi (E1 – HP 21/28)	19
3.2. Divu FPM ar kušanas temperatūru 21 °C un 28 °C novērtējums dažādos gadalaikos stacionāros un dinamiskos laboratorijas apstākļos (E2 – FPM 21/28)	20
3.3. Modelēšana ANSYS Fluent vidē – S1 un S2	22
3.4. Regulējamās siltumizolācijas un siltuma pārnese elementu ietekme – gaisa sprauga, aerogels, siltuma pārnese pastiprinātājs un Fresneļa lēca (E3 – ADJ ON/OFF)	23
3.5. Dinamiskās komponentes ietekmes izvērtējums (E4 – DYN-LAB ON/OFF un E5 – DYN-OUT ON/OFF)	25
3.6. Fokusa punkta attāluma un konusa diametra ietekme uz siltuma pārnesei mazizmēra fasādes modulī (E6 – FP-LAB 3/5/7)	26
3.7. Lielā mēroga moduļa āra testēšana (E7 – TEST A/P/H)	27
3.7.1. Eksperiments reālos klimata apstākļos	28
3.7.2. Siltumsūkņu elektroenerģijas patēriņš	29
3.7.3. Efektīvās siltuma caurlaidības (U vērtības) noteikšana	31
3.7.4. Enerģijas un komforta veiktspējas indeksa (ECPI) aprēķins	32
3.7.5. Secinājumi par iegūtajiem rezultātiem (E7 – TEST A/P/H)	36
SECINĀJUMI	39
ATSAUCES	42

IEVADS

Darba aktualitāte

Eiropas Savienības ilgtermiņa redzējums līdz 2050. gadam sasniegt klimatneitralitāti, kā noteikts Eiropas Zaļajā kursā [1], uzsvēr pārejas paātrināšanu uz tehnoloģijām, kas patērē mazāk enerģijas un rada mazāk CO₂ emisiju. Šis izaicinājums ir īpaši aktuāls ēku sektorā, kas Eiropas Savienībā patērē aptuveni 40 % no kopējās enerģijas un rada 36 % no CO₂ emisijām [2]. Tādēļ grozījumi Direktīvā 2010/31/ES par ēku energoefektivitāti un Direktīvā 2012/27/ES par energoefektivitāti [3] paredz jaunas paaudzes ēku attīstību – ēkas, kas spēj nodrošināt ievērojami augstāku energoefektivitāti, integrēt atjaunojamās enerģijas sistēmas un intelīģenti reaģēt uz apkārtējās vides apstākļiem. Līdz ar to uz vietas ražotas atjaunojamās enerģijas izmantošanas palielināšana tiek uzsvēta kā būtisks dekarbonizācijas ceļš [4].

Starptautiskie klimata politikas dokumenti – tostarp Starpvaldību klimata pārmaiņu padomes (IPCC) novērtējuma ziņojumi, UNFCCC protokoli un globālie klimata nolīgumi – atkārtoti uzsvēr, ka enerģijas pieprasījuma samazināšana un energoefektivitātes uzlabošana ir vieni no efektīvākajiem pasākumiem globālās sasilšanas ierobežošanai [5]. Tomēr, neraugoties uz šo atziņu, ēku sektors joprojām saskaras ar būtisku neefektivitāti, un ievērojama daļa potenciālo enerģijas ietaupījumu vēl nav realizēta [6]. Pašreizējās prognozes liecina, ka nākamajā desmitgadē globālais enerģijas patēriņš var pieaugt par 53 %, ko veicinās demogrāfiskā izaugsme, pieaugošās komforta prasības, digitalizācija un urbanizācija, tādējādi vēl vairāk palielinot siltumnīcefekta gāzu emisijas, ja netiks veikti korektīvi pasākumi [7].

Tradicionālie ēku projektēšanas principi, kas lielākoties ir statiski, vairs nav pietiekami, lai sasniegtu klimatneitralitātes mērķus. Lielākā daļa ēku norobežojošo konstrukciju tiek veidotas, izmantojot tradicionālos siltumizolācijas materiālus un fasāžu elementus ar nemainīgu veiktspēju, kas nespēj dinamiski reaģēt uz mainīgajiem āra apstākļiem. Tā rezultātā pastāv ievērojams neizmantots potenciāls fasādes elementos uzkrātajai enerģijai, kas varētu palīdzēt līdzsvarot iekšējo termālo komfortu gan apkures, gan dzesēšanas periodos, tādējādi uzlabojot ēkas kopējo energoefektivitāti. Lai pārvarētu šos ierobežojumus, arvien izteiktāk attīstās pāreja uz adaptīviem arhitektūras risinājumiem. Dinamiskas un kinētiskas fasāžu sistēmas, kas spēj reaģēt uz saules starojuma, temperatūras, vēja, mitruma un gaismas izmaiņām [8], tiek uzskatītas par daudzpusīgu virzienu nākamās paaudzes energoefektīvām ēkām.

Plašākā politikas un tehnoloģiju kontekstā Eiropas Zaļais kurss uzsvēr nepieciešamību apvienot atjaunojamās energoresursus (RES) ar viedām vadības un enerģijas pārvaldības sistēmām ēkās [1], [4], [9]. Gandrīz nulles enerģijas ēkas (nZEB) un jaunākais koncepts – bezemisiju ēkas (ZEB) – pašlaik ir galvenie Eiropas dekarbonizācijas stratēģiju elementi. Tomēr to praktiskā ieviešana joprojām ir sarežģīta, jo atjaunojamās enerģijas pieejamība reti sakrīt ar ēkas faktisko enerģijas pieprasījumu. Atšķirībā no fosilajiem energoresursiem atjaunojamās enerģijas ražošana svārstās gan diennakts, gan sezonālā griezumā, radot gan pārprodukcijas periodus, gan laikposmus, kad enerģijas piegāde ir nepietiekama. Šīs neatbilstības aprūstina stabilas un efektīvas ēku darbības nodrošināšanu neatkarīgi no sezonas. Tāpēc inovatīvas pieejas ēku termālajām norobežojošajām konstrukcijām – īpaši risinājumi,

kas spēj uzkrāt un vēlāk atbrīvot saules siltumenerģiju, – piedāvā perspektīvu iespēju uzlabot līdzsvaru starp atjaunojamās enerģijas piegādi un ēkas enerģijas vajadzībām.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba galvenais mērķis ir izstrādāt inovatīvu adaptīvas fasādes sistēmu, kas integrē siltumenerģijas uzkrāšanu, izmantojot fāžu pārejas materiālus (FPM), un novērtēt tās efektivitāti ēku energoefektivitātes uzlabošanā. Šī mērķa sasniegšanai nepieciešams visaptverošs pētījums, kas aptver konceptuālo izstrādi, eksperimentālo validāciju un skaitlisko modelēšanu. Lai sasniegtu mērķi, ir noteikti vairāki pētījuma uzdevumi.

- 1) Veikt sistemātisku literatūras analīzi par siltumenerģijas uzkrāšanas (*TES*) principiem, FPM tehnoloģijām, mūsdienīgiem siltumizolācijas materiāliem, adaptīvo fasāžu koncepcijām, kā arī par esošajām eksperimentālajām un skaitliskajām testēšanas metodoloģijām, kas attiecas uz dinamiskām ēku norobežojošajām konstrukcijām.
- 2) Iteratīvā izstrādes procesā projektēt un izveidot eksperimentālos prototipus, tostarp maza mēroga fasādes moduli kontrolētiem laboratorijas pētījumiem un pilna mēroga saules fasādes moduli, kas integrēts āra testēšanas standos veikspējas novērtēšanai reālos vides apstākļos.
- 3) Plānot un veikt eksperimentus, nodrošinot kontrolētu parametru variāciju, precīzu mēraparatūru un uzticamu datu iegūšanu gan stacionāros laboratorijas apstākļos, gan dinamiskos āra laikapstākļos.
- 4) Izstrādāt un validēt skaitliskās simulācijas modeļus maza mēroga fasādes prototipiem, nodrošinot detalizētu siltuma pārneses analīzi, veikspējas prognozēšanu un salīdzinošu novērtējumu ar eksperimentālajiem datiem.
- 5) Apkopot, apstrādāt un analizēt mērījumu datus, lai kvantitatīvi novērtētu piedāvātā adaptīvās fasādes risinājuma termisko veikspēju, energoefektivitātes ieguvumus un ekspluatācijas potenciālu, kā arī noteiktu tā ieguldījumu apkures un dzesēšanas enerģijas patēriņa samazināšanā.

Darba hipotēze

Fāžu pārejas materiālu integrēšana adaptīvā fasādes sistēmā uzlabos ēkas energoefektivitāti, nodrošinot kontrolētu siltumenerģijas uzkrāšanu un izkliedēšanu, tādējādi samazinot iekštelņu temperatūras svārstības un apkures un dzesēšanas pieprasījumu dažādos klimatiskajos apstākļos.

Zinātniskā novitāte

Pētījuma zinātniskā novitāte balstās paradigmas maiņā ēkas norobežojošo konstrukciju izpratnē, interpretējot tās ne tikai kā pasīvu siltumizolācijas barjeru, bet arī kā aktīvu saules siltumenerģijas uzkrāšanas sistēmu. Lai gan dinamisko un adaptīvo fasāžu koncepcijas pēdējos gados ir guvušas ievērojamu uzmanību, to integrācija ar fāžu pārejas materiāliem sezonālai un

diennakts siltumenerģijas uzkrāšanai joprojām ir nepietiekami izpētīta, īpaši reālos laika apstākļos, kas raksturīgi Ziemeļeiropas klimatam.

Promocijas darbs papildina līdzšinējo zinātnisko izpratni, jo:

- 1) fasāde tiek pārveidota par saules enerģijas uztveršanas un uzkrāšanas sistēmu, kas spēj absorbēt, uzkrāt un atbrīvot siltumenerģiju, izmantojot FPM fāžu pārejas procesus;
- 2) tiek risināta viena no būtiskākajām atjaunojamo energoresursu problēmām – to nevienmērīgā pieejamība, integrējot siltumenerģijas uzkrāšanas kapacitāti tieši ēkas norobežojošajā konstrukcijā;
- 3) eksperimentāli analizēta FPM integrētu saules fasāžu darbība dinamiski, tostarp veicot āra eksperimentus reālos klimatiskajos apstākļos, tādējādi nodrošinot datus, kuru pašreiz zinātniskajā literatūrā ir salīdzinoši maz;
- 4) izvērtēts, kā šādas sistēmas spēj samazināt apkures un dzesēšanas slodzes, vienlaikus palielinot uz vietas saražotās atjaunojamās enerģijas izmantošanu un veicinot pāreju uz klimatneitrālām ēkām, samazinot ekspluatācijas laikā radītās siltumnīcefekta gāzu emisijas;
- 5) sniegts jauns ieskats FPM dinamisko norobežojošo konstrukciju darbības režīmos, ietekmē uz vidi un adaptīvajā potenciālā, veicinot nākamās paaudzes augstas energoefektivitātes klimatneitrālu ēku projektēšanu.

Apvienojot eksperimentālo un praktisko pieeju, promocijas darbs piedāvā jaunu risinājumu, kā mazināt plaisu starp uz vietas pieejamo atjaunojamo enerģiju un enerģijas pieprasījumu ēkas norobežojošo konstrukciju līmenī – uzdevumu, ko pašreizējās statistiskās ēku sistēmas nespēj pilnvērtīgi nodrošināt.

Praktiskā nozīme

Pētījuma praktiskā nozīme izpaužas tā ciešajā sasaistē ar notiekošajiem Eiropas Savienības dekarbonizācijas procesiem, attīstītajām ēku energoefektivitātes regulācijām un jaunajām arhitektūras tendencēm, kas uzsver adaptīvu un enerģijas plūsmām reaģējošu projektēšanu. Eiropas Savienības dalībvalstīm virzoties uz ēku fonda pārveidi par gandrīz nulles enerģijas ēkām vai pat pozitīvas enerģijas ēkām, arvien pieaug nepieciešamība pēc fasāžu sistēmām, kas spēj dinamiski reaģēt uz vides apstākļiem un būtiski samazināt enerģijas patēriņu. Promocijas darbā pētītā saules fasādes koncepcija ar integrētiem FPM tieši risina šo nepieciešamību, piedāvājot daudzfunkcionālu ēkas norobežojošo konstrukciju, kas spēj uztvert, uzkrāt un atkārtoti sadalīt saules siltumenerģiju.

Šādas sistēmas var būtiski samazināt apkures un dzesēšanas enerģijas slodzi, ļaujot ēkām izpildīt stingrās Ēku energoefektivitātes direktīvas (*EPBD*) prasības, vienlaikus samazinot ekspluatācijas izmaksas ēku lietotājiem. Integrējot siltumenerģijas uzkrāšanu tieši fasādē, ēkas spēj efektīvāk izmantot uz vietas ražoto atjaunojamo enerģiju tās pieejamības periodos, tādējādi samazinot atkarību no fosilajiem energoresursiem un elektroenerģijas tīkla pīķa slodzes stundās.

Piedāvātajai pieejai ir arī augsta mērogojamība – to iespējams izmantot gan jaunbūvēs, gan ēku renovācijas projektos, kas ir īpaši svarīgi Eiropas novecojošā ēku fonda modernizācijai.

Turklāt ēkas ar fasādē integrētu siltumenerģijas uzkrāšanu var darboties kā enerģētiski elastīgi elementi plašākās rajonu enerģētikas sistēmās, palīdzot mazināt atjaunojamo energoresursu ražošanas svārstības un veicinot elektroenerģijas tīkla stabilitāti.

Pētījums ir īpaši nozīmīgs Ziemeļeiropas klimatiskajos apstākļos, kur apkures pieprasījums ir augsts un tradicionālās saules enerģijas tehnoloģijas bieži nodrošina ierobežotus ieguvumus. Darbā iegūtie rezultāti sniedz klimatam specifiskas atziņas par to, kā dinamiskas saules termālās fasādes var efektīvi izmantot arī zemas saules intensitātes apstākļos. Tādējādi šis pētījums paplašina gan zinātnisko izpratni, gan adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģiju praktiskās lietošanas iespējas, piedāvājot reālu ceļu uz enerģētiski pozitīvām un klimatneitrālām ēkām, vienlaikus atbalstot Eiropas Zaļā kursa ilgtermiņa mērķu sasniegšanu.

Zinātniskā darba aprobācija

1. Narbutis, J., Vanaga R., Freimanis, R., Blumberga, A. Laboratory and outdoor testing of small-scale active solar facade module. *Environmental and Climate Technologies* 2021, vol. 25, no. 1, pp. 455–466. Pieejams: doi: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0033>.
2. Vanaga R., Narbutis, J., Freimanis, R., Blumberga, A. Laboratory testing of small-scale solar facade module with phase change material and adjustable insulation layer. *Energies*. 2022, 15, 1158. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/en15031158>.
3. Narbutis, J., Blumberga, A., Zundāns, Z., Freimanis, R., Bāliņš, R., Vanaga, R. The Effect of Fresnel Lens Focal Point Location on Heat Transfer in Phase Change Material (PCM) Enhanced Dynamic Solar Facade. *Environmental and Climate Technologies*, 2022, vol. 26, no. 1, 1268.–1278. lpp. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuect-2022-0096.
4. Vanaga R., Narbutis, J., Zundāns, Z., Blumberga, A. On-site Testing of Dynamic Facade System with the Solar Energy Storage, *Energy*, 2023, vol. 283, 128257, ISSN 0360-5442. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128257>.
5. Vanaga R., Narbutis J., Freimanis R., Zundāns Z., Blumberga A. Performance Assessment of Two Different Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Building Envelopes, *Energies*, 2023, vol. 16, no. 13, 5236. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/en16135236>.
6. Narbutis J., Vanaga R. Revolutionizing the Building Envelope: A Comprehensive Scientific Review of Innovative Technologies for Reduced Emissions. *Environmental and Climate Technologies* 2023, vol. 27, no. 1, pp. 724–737. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0053>.
7. Vanaga R., Narbutis J., Zundāns, Z., Gušča J. Systematic literature review of software tools for modeling heat transfer in phase change materials for building applications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024, 1372 012017. Pieejams: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012017>.

Darba aprobācija zinātniskajās konferencēs

1. Vanaga R., Narbutis, J., Freimanis, R., Blumberga, A. Laboratory testing of different melting temperature phase change materials under four season conditions for thermal energy storage in building envelope. *International Conference on Applied Energy 2021*, 29. nov.–2. dec. 2, 2021, Bangkokā, Taizemē.
2. Narbutis, J., Blumberga, A., Zundāns, Z., Freimanis, R., Bāliņš, R., Vanaga, R. The effect of Fresnel lens focal point location on heat transfer in phase change material (FPM) enhanced dynamic solar facade. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies Conect 2022*, May 11–13, 2022, Rīgā, Latvijā.
3. Narbutis J., Vanaga R. Revolutionizing the Building Envelope: Innovative Technologies for Reduced Emissions. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies Conect 2023*, May 10–12, 2023, Rīgā, Latvijā.
4. Narbutis J., Vanaga R., Zundāns, Z. Validating ANSYS Heat Transfer Models with Two Phase Change Materials. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies Conect 2024*, May 15–17, 2024, Rīgā, Latvijā.

Citas zinātniskās publikācijas

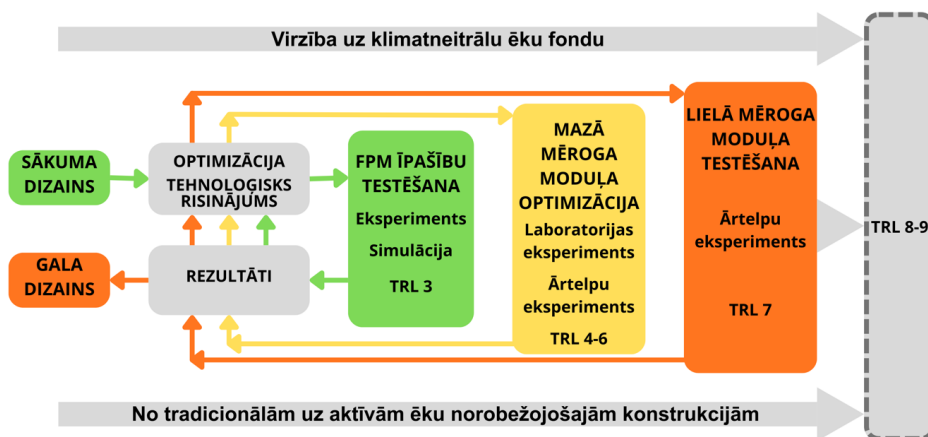
1. Narbutis J., Vanaga, R. Comparative Study of the Thermal Properties of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials for Building Envelope Applications. (2025). CONECT. *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 40. Pieejams: <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2025.017>.
2. Narbutis J., Vanaga R. Nano-Enhanced Phase Change Materials for Building Envelopes: A Systematic Review of Thermal Performance and Applications. *Environmental and Climate Technologies 2023*, vol. 29, no. 1, pp. 359–389. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2025-0025>.

Darba struktūra

Promocijas darba struktūra balstās paradigmas maiņā no tradicionālām uz adaptīvām ēku norobežojošajām konstrukcijām, ko nosaka nepieciešamība dekarbonizēt esošo un nākotnes ēku fondu. Šī pāreja tiek īstenota trīs savstarpēji saistītos izstrādes ciklos (1. att.), kas kopumā veido pētījuma metodoloģisko un konceptuālo pamatu.

- 1) Sākotnējā tehnoloģiskā risinājuma optimizācija un FPM īpašību testēšana datorsimulācijām. Šī procesa rezultātā tiek izstrādāta tehnoloģiskā koncepcija un sākotnējais maza mēroga prototips. Paralēli tiek izstrādāts sistēmas matemātiskais modelis, lai padziļināti izprastu siltuma pārnesei procesus un identificētu potenciālos energoefektivitātes uzlabojumus.
- 2) Mazā mēroga moduļa laboratorijas un āra testēšana, kurā izstrādātais prototips tiek novērtēts gan kontrolētos laboratorijas apstākļos, gan reālos vides apstākļos.

- 3) Lielā mēroga saules fasādes moduļa izstrāde, kurā prototips tiek pārņemts uz pilna mēroga funkcionējošu sistēmu turpmākai testēšanai āra apstākļos.



1. att. Promocijas darba struktūra.

Promocijas darbā ir septiņas galvenajās nodaļas: (1) Ievads; (2) Literatūras apskats; (3) Metodoloģija; (4) FPM īpašību testēšana ANSYS simulācijām; (5) Mazā mēroga moduļa optimizācija; (6) Lielā mēroga moduļa testēšana; (7) Secinājumi.

Ievadā izklāstīta pētījuma aktualitāte, mērķis un uzdevumi, hipotēze, darba zinātniskā novitāte, praktiskā nozīme, kā arī pētījuma rezultātu aprobācija.

Literatūras apskata nodaļā sniegts visaptverošs esošo zināšanu apkopojums par siltumenerģijas uzkrāšanas sistēmām, FPM, mūsdienīgiem siltumizolācijas materiāliem, adaptīvajām fasāžu sistēmām un eksperimentālajām un skaitliskajām pētījumu metodēm.

Metodoloģijas nodaļā aprakstīta šajā promocijas darbā izmantoto eksperimentu, skaitlisko simulāciju, mērīšanas instrumentācijas un materiālu struktūra un secība.

4.–6. nodaļā izklāstīta metodoloģiskā pieeja kopā ar katra eksperimenta un simulācijas rezultātiem. Šajās nodaļās loģiskā secībā, kas atbilst tehnoloģijas izstrādes cikliem, aprakstīti laboratorijas testu, āra mērījumu un skaitlisko simulāciju rezultāti. Kopumā tās demonstrē skaidru un izsekojamu piedāvātās adaptīvās fasādes tehnoloģijas attīstību no konceptuālās izstrādes līdz pilna mēroga ieviešanai.

Secinājumu nodaļā apkopoti galvenie pētījuma rezultāti, apspriestas būtiskākās atziņas un iezīmēti turpmāko pētījumu virzieni.

1. tabulā apkopots pārskats par zinātniskajām publikācijām, kas veido promocijas darba zinātnisko pamatu konkrētās darba nodaļās.

Lai nodrošinātu precīzu teksta tulkojumu, skaidrību un plūstamību visā promocijas darbā, tika izmantots mākslīgā intelekta rīks (*DeepL*).

Promocijas darbā izmantotie zinātniskie raksti

Nodaļa	Zinātniskā raksta nosaukums
Literatūras apskats	<i>Revolutionizing the Building Envelope: A Comprehensive Scientific Review of Innovative Technologies for Reduced Emissions</i>
	<i>Systematic literature review of software tools for modelling heat transfer in phase change materials for building applications</i>
FPM īpašību testēšana ANSYS simulācijām	<i>Performance Assessment of Two Different Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Building Envelopes</i>
Mazā mēroga moduļa optimizācija	<i>Laboratory Testing of Small-Scale Solar Facade Module with Phase Change Material and Adjustable Insulation Layer</i>
	<i>Laboratory Testing of Small-Scale Active Solar Facade Module</i>
	<i>The Effect of Fresnel Lens Focal Point Location on Heat Transfer in Phase Change Material (FPM) Enhanced Dynamic Solar Facade</i>
Lielā mēroga moduļa testēšana	<i>On-site testing of dynamic facade system with the solar energy storage</i>

1. LITERATŪRAS ANALĪZE

Visaptverošais literatūras apskats, kas veikts šajā promocijas darbā, veido konsekventu zinātnisku, tehnoloģisku un politikas ietvaru adaptīvas saules fasādes sistēmas izstrādei, kas integrē fāžu pārejas materiālus (FPM) siltumenerģijas uzkrāšanai. Analīze aptver sešas savstarpēji saistītas jomas: ES ēku fonda politiku; siltumenerģijas uzkrāšanas principus; FPM tehnoloģijas; augstas veiktspējas siltumizolācijas materiālus; adaptīvas ēku norobežojošās konstrukcijas; eksperimentāli skaitliskās novērtēšanas metodoloģijas. Kopumā šīs jomas definē gan inovāciju nepieciešamību ēku norobežojošajās konstrukcijās, gan metodoloģisko pieeju to īstenošanai.

ES ēku fonda politikas analīze skaidri parāda, ka ēku sektora dekarbonizācija ir viens no centrālajiem Eiropas Zaļā kursa pilāriem un cieši saistīta ar attiecīgajiem normatīvajiem instrumentiem, tostarp Ēku energoefektivitātes direktīvu (*EPBD*), Energoefektivitātes direktīvu (*EED*) un Renovācijas viļņa stratēģiju (*Renovation Wave*). Šie politikas ietvari kopumā veicina pāreju uz bezemisiju ēkām (*ZEB*), renovācijas tempu palielināšanu, uz vietas ražoto atjaunojamo energoresursu integrāciju un viedu, adaptīvu ēku tehnoloģiju ieviešanu. Ņemot vērā to, ka ēkas veido būtisku daļu no Eiropas galapatēriņa enerģijas patēriņa un CO₂ emisijām, uzlabojumi ēku norobežojošajās konstrukcijās ir viens no efektīvākajiem veidiem, kā samazināt ekspluatācijas enerģijas pieprasījumu. Līdz ar to politikas konteksts tieši atbalsta adaptīvu, energoefektīvu un siltumenerģijas uzkrāšanu integrējošu fasāžu sistēmu izstrādi, apstiprinot šī promocijas darba zinātnisko un sabiedrisko nozīmīgumu.

Siltumenerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju izpēte uzsver uzkrāšanas sistēmu būtisko lomu atjaunojamo energoresursu, īpaši saules enerģijas, efektīvā izmantošanā. Latentās siltumenerģijas uzkrāšanas sistēmas (*LHTES*), kas balstās fāžu pārejas materiālos (FPM), nodrošina ievērojami augstāku enerģijas uzkrāšanas blīvumu nekā jutīgā siltuma sistēmas un ļauj uzkrāt un atbrīvot siltumenerģiju gandrīz nemainīgā temperatūrā. Šī īpašība padara FPM īpaši piemērotus integrācijai ēku norobežojošajās konstrukcijās, kur tie var stabilizēt iekšējās temperatūras svārstības, pārvietot slodzes maksimumus un palielināt saules enerģijas izmantošanas efektivitāti. Literatūra apstiprina, ka FPM integrācija ēku konstrukcijās var samazināt apkures un dzesēšanas enerģijas pieprasījumu, uzlabot iekšējās komfortu un veicināt gandrīz nulles enerģijas ēku attīstību. Tomēr, neskatoties uz plašiem laboratorijas pētījumiem un maza mēroga lietojumiem, liela mēroga un ilgtermiņa FPM integrētu fasāžu sistēmu validācija joprojām ir ierobežota, kas uzsver sistemātisku eksperimentālu un skaitlisku pētījumu nepieciešamību gan komponentu, gan ēkas līmenī.

FPM kategoriju analīze papildus precizē dažādu materiālu piemērotību integrācijai ēkās. Cietās-šķidrās fāzes pārejas materiāli, īpaši parafīna bāzes organiskie materiāli, demonstrē labvēlīgas termofizikālās īpašības, tostarp piemērotus kušanas temperatūras intervālus, stabilu ciklisko darbību, zemu pārkaršanās (*supercooling*) efektu un ķīmisko stabilitāti. Lai gan neorganiskajiem un eitektiskajiem FPM ir noteiktas priekšrocības, tādas problēmas kā fāžu segregācija un ilgtermiņa stabilitāte joprojām prasa papildu optimizāciju. Šie rezultāti pamato promocijas darbā izvēlēto materiālu atlases stratēģiju, kas koncentrējas uz FPM, kas piemēroti Ziemeļeiropas klimatiskajiem apstākļiem un sezonālajām veiktspējas svārstībām.

Augstas veiktspējas siltumizolācijas materiāli ir vēl viens būtisks progresīvu ēku norobežojošo konstrukciju elements. Literatūras apskatā identificēti silīcija aerogēli kā viena no perspektīvākajām superizolācijas tehnoloģijām to īpaši zemās siltumvadītspējas, vieglās nanoporainās struktūras un integrācijas potenciāla dēļ daudzfunkcionālās fasāžu sistēmās. Aerogēli ļauj ievērojami samazināt konstrukcijas biezumu, vienlaikus saglabājot augstu termisko pretestību, kas padara tos īpaši piemērotus dziļās renovācijas projektiem un telpiski ierobežotām konstrukcijām. Lai gan pašreizējās izmaksas un ilgtermiņa higrtermiskā izturība joprojām prasa papildu pētījumus, dzīves cikla novērtējumi liecina par būtisku siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu aerogēlu sistēmu izmantošanas gadījumā. To savietojamība ar FPM slāņiem un adaptīvo fasāžu koncepcijām vēl vairāk pastiprina hibrīdu norobežojošo konstrukciju risinājumu iespējamību, kas apvieno izolāciju, siltumenerģijas uzkrāšanu un saules enerģijas pārvaldību.

Adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģiju analīze demonstrē paradigmas maiņu no statiskām uz dinamiskām un daudzfunkcionālām sistēmām, kas spēj aktīvi regulēt siltuma un saules enerģijas plūsmas. Viedais stiklojums, kinētiskās ēnošanas sistēmas, ēkās integrēti fotoelementi (*BiPV*) un FPM integrētas fasādes ilustrē plašu adaptīvo risinājumu spektru, kas pašlaik tiek izstrādāts. Eksperimentālie un simulāciju pētījumi rāda izmērāmu dzesēšanas slodžu samazinājumu, uzlabotu fotoelementu efektivitāti un ievērojamus gada enerģijas ietaupījumus. Tomēr joprojām pastāv izaicinājumi saistībā ar ilgtermiņa izturību, izmaksu efektivitāti, modelēšanas precizitāti un sistēmu integrāciju. Šie ierobežojumi uzsver robustu validācijas metožu, kas spēj raksturot gan stacionāro, gan pārejas režīma termisko uzvedību reālos klimatiskajos apstākļos, nepieciešamību.

Šajā kontekstā eksperimentālo testēšanas metožu analīze apstiprina, ka tradicionālie stacionārie U vērtības mērījumi nav pietiekami adaptīvu un saules enerģijai reaģējošu fasāžu sistēmu raksturošanai. Dinamiskās veiktspējas novērtēšanai nepieciešama augstas izšķirtspējas temperatūras, siltuma plūsmas un saules starojuma monitorēšana reālos āra apstākļos. *PASLINK* metodoloģija, kas attīstījies no *PASSYS* projekta, nodrošina visaptverošu eksperimentālo ietvaru, balstītu pilna mēroga testēšanas kamerās ar plašu instrumentāciju. Apvienojot kontrolētu iekštelpu vidi ar dabisko klimatisko apstākļu ietekmi, *PASLINK* ļauj precīzi noteikt gan stacionāros, gan dinamiskos veiktspējas parametrus. Integrējot šo pieeju ar sistēmas identifikācijas metodēm, iespējams iegūt fizikāli interpretējamās termiskās pretestības, siltuma kapacitātes un saules ieguvumu rādītājus. Šī metodoloģija ir īpaši piemērota FPM integrētu adaptīvu saules fasāžu novērtēšanai, tāpēc tā veido vienu no centrālajiem eksperimentālās stratēģijas elementiem šajā promocijas darbā.

Papildinot eksperimentālo validāciju, datortsimulācijām ir būtiska loma inovatīvu norobežojošo konstrukciju sistēmu izstrādē un optimizācijā. Literatūrā identificētā septiņu soļu simulācijas metodoloģija nodrošina strukturētu pieeju, kas savieno konceptuālo projektēšanu, veiktspējas rādītājus, modelēšanu, salīdzināšanu, optimizāciju un iteratīvu pilnveidošanu. Augstas precizitātes skaitliskie rīki, piemēram, *ANSYS Fluent*, *COMSOL*, *TRNSYS*, *MATLAB* un *EnergyPlus*, ļauj analizēt pārejas režīma siltuma pānesi, fāžu pārejas procesus un ēkas kopējo energoefektivitāti. Tomēr bibliometriskā analīze liecina, ka lielākā daļa FPM simulāciju tiek veikta mazā mērogā un īsos laika periodos, savukārt pētījumi par sezonālo vai gada

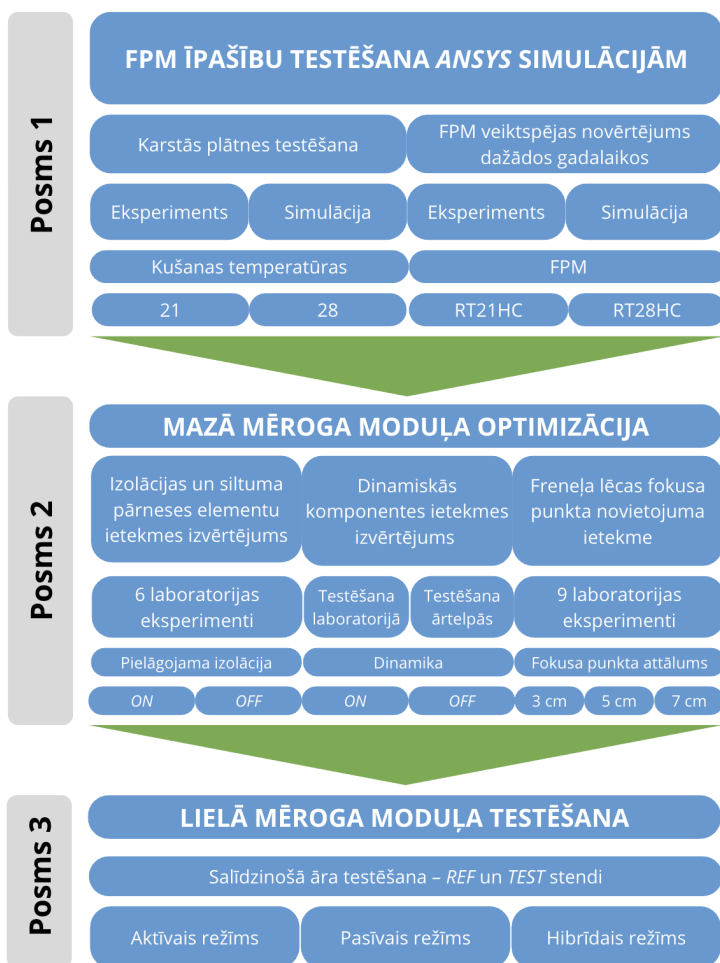
veiktspēju ēkas līmenī ir salīdzinoši reti. Šī nepilnība ir īpaši nozīmīga adaptīvām saules fasādēm, kurām jādarbojas Ziemeļeiropas mainīgajos klimatiskajos apstākļos. Tāpēc daudzņēmīga modelēšanas integrācija, apvienojot detalizētu CFD analīzi ar ilgtermiņa ēku enerģijas simulācijām, ir viens no būtiskākajiem metodoloģiskajiem uzlabojumiem, kas attīstīts šajā pētījumā.

Noslēgumā literatūras apskats apstiprina, ka ēku norobežojošo konstrukciju inovācijas ir būtiskas ES klimatneitralitātes mērķu sasniegšanai un ka FPM integrētas adaptīvās saules fasādes ir perspektīvs risinājums energoefektivitātes uzlabošanai un atjaunojamās enerģijas izmantošanai. Tajā pašā laikā joprojām pastāv būtiskas nepilnības ilgtermiņa validācijā, daudzņēmīga modelēšanā un pilnas sistēmas integrācijā. Apvienojot materiālzinātni, pilna mēroga eksperimentālo testēšanu un progresīvas skaitliskās simulācijas strukturētā metodoloģiskā ietvarā, promocijas darbs palīdz aizpildīt šīs nepilnības un veicina adaptīvu, siltumenerģiju uzkrājošu saules fasāžu sistēmu attīstību, kas piemērotas Ziemeļeiropas klimatiskajiem apstākļiem.

2. METODOLOĢIJA

Pētījuma metodoloģiskais ietvars balstās sistemātiskā, daudzpakāpju dinamiskas saules fasādes sistēmas izpētē, kas integrē siltumenerģijas uzkrāšanu, izmantojot FPM. Lai novērtētu piedāvātās fasādes koncepcijas realizējamību, veiktspēju un pielāgošanās spēju, metodoloģija ietver trīs galvenos posmus (2.1. att.).

- 1) FPM īpašību testēšana ANSYS simulācijām – materiāla līmeņa eksperimentāla un matemātiska FPM uzvedības izpēte kontrolētas termiskās slodzes apstākļos.
- 2) Mazā mēroga modeļa optimizācija – komponenta līmeņa testēšana maza mēroga fasādes moduļiem, izmantojot PASLINK tipa laboratorijas un āra eksperimentālās iekārtas ar simulētām un reālām saules starojuma slodzēm.
- 3) Lielā mēroga modeļa āra testēšana – sistēmas līmeņa salīdzinošā pilna mēroga fasādes moduļa testēšana reālā vidē atbilstošos klimatiskajos apstākļos.



2.1. attēls. Pētījuma metodoloģija.

Kopumā šie posmi veido iteratīvu projektēšanas, testēšanas un validācijas darba plūsmu, kas nodrošina tehnoloģijas attīstību no konceptuālā risinājuma līdz demonstrācijai atbilstošos vides apstākļos. Nākamajā nodaļā aprakstītas metodoloģiskās izvēles, eksperimentālās iekārtas, datu iegūšanas sistēmas, analītiskie rīki un simulācijas pieejas, kas izmantotas visā pētījuma gaitā.

2.1. Pētījuma dizains un metodoloģiskais pamatojums

Pētījumā tika izvēlēta kvantitatīva metodoloģiskā pieeja, jo pētījums prasīja precīzu un reproducējamu vairāku būtisku termisko parametru novērtējumu, tostarp siltuma plūsmas dinamiku, FPM uzlādes un izlādes uzvedību, fasādes moduļa veiktspēju pārejas režīma āra un simulētu laikapstākļu apstākļos, iekštelņu temperatūras reakciju un ar to saistīto ietekmi uz apkures un dzesēšanas enerģijas patēriņu. Visu eksperimentālo pētījumu laikā tika iegūti augstas izšķirtspējas laika rindas dati, kas ietvēra temperatūras, siltuma plūsmas, saules starojuma un enerģijas patēriņa mērījumus. Šīs datu kopas nodrošināja iespēju veikt uzticamu statistisko analīzi, precīzu parametru identifikāciju, kā arī izstrādāto skaitlisko modeļu kalibrēšanu un validāciju vēlākajos pētījuma posmos.

PASLINK tipa testēšanai šajā metodoloģijā ir būtiska nozīme, jo FPM balstītu dinamisku fasāžu uzvedību nav iespējams pilnvērtīgi novērtēt, izmantojot tikai stacionārās analīzes metodes. FPM raksturo histerēze, ātrumam atkarīgas fāžu pārejas un mainīga siltumenerģijas uzkrāšanas efektivitāte, kas ir atkarīga no iekštelņu un āra temperatūras gradientu mijiedarbības ar saules starojumu. *PASLINK* eksperimentālās iekārtas nodrošina kontrolētus iekštelņu robežnosacījumus, vienlaikus ļaujot fasādei pilnībā pakļauties dinamiskajiem āra apstākļiem, tādējādi radot mērījumu vidi, kas precīzi atspoguļo FPM uzvedības pārejas raksturu. Turklāt *PASLINK* pieeja nodrošina ilgtermiņa monitoringu, kas ir būtiski vairāku dienu uzlādes un izlādes ciklu, diennakts režīmu un sezonālo efektu analīzei, kas ietekmē FPM integrētu fasādes sistēmu ekspluatācijas potenciālu.

Eksperimentālais pētījums (2.1. tab.) ietvēra septiņus fiziskus eksperimentus un divus skaitlisko simulāciju pētījumus. Tie ietvēra FPM īpašību testēšanu ar karstās plātnes metodi, FPM sezonālās uzvedības simulācijas, izmantojot maza mēroga *PASLINK* tipa eksperimentālās iekārtas, dinamisko optisko komponentu laboratorijas un āra novērtēšanu, Freneļa lēcas fokusa punkta novietojuma optimizāciju, kā arī liela mēroga fasādes moduļa novērtēšanu, izmantojot *PASLINK* āra testēšanas standus. Skaitliskās simulācijas papildināja eksperimentālos pētījumus, modelējot FPM fāžu pārejas procesus, saules starojuma koncentrācijas efektus un siltuma pārnesi dažādos klimatiskajos apstākļos.

2.1. tabula

Eksperimentālo pētījumu pārskats

Posms	Apzīmējums	Eksperiments / Simulācija	Tips	Iegūtie dati	Mērķis
1	E1 – HP 21/28	Karstās plātnes eksperiments	Mazā mēroga laboratorijas eksperiments	Temperatūras, siltuma plūsmas	Kušanas temp. salīdzināšana – 21°C vs. 28°C

2.1. tabulas turpinājums					
	E2 – FPM 21/28	Eksperiments – FPM veikspējas novērtējums dažādos gadalaikos	Mazā mēroga salīdzinošs <i>PASLINK</i> tipa laboratorijas eksperiments	Temperatūras, saules starojums	FPM performances izvērtējums – RT21HC vs. RT28HC
	S1 – HP 21/28	Karstās plātnes simulācija	Mazā mēroga simulācija	Temperatūras, kušana/sacietēšana	FPM kalibrācija simulācijas S2 modelim
	S2 – FPM 21/28	Simulācija – FPM veikspēja dažādās klimatiskajās zonās	Mazā mēroga simulācija	Temperatūras, kušana/sacietēšana	FPM performances izvērtējums – RT21HC vs. RT28HC
2	E3 – ADJ <i>ON/OFF</i>	Eksperiments – regulējama siltumizolācijas slāņa ietekme	Mazā mēroga salīdzinošs <i>PASLINK</i> tipa laboratorijas eksperiments	Temperatūras, siltuma plūsmas	Pielāgojamās izolācijas izvērtējums – <i>ON/OFF</i>
	E4 – DYN-LAB <i>ON/OFF</i>	Eksperiments – dinamiskās komponentes ietekme	Mazā mēroga salīdzinošs laboratorijas eksperiments	Temperatūras, siltuma plūsmas	Dinamiskās komponentes izvērtējums – <i>ON/OFF</i>
	E5 – DYN-OUT <i>ON/OFF</i>	Eksperiments – dinamiskā komponenta ietekme (āra apstākļos)	Mazā mēroga salīdzinošs āra eksperiments	Temperatūras, siltuma plūsmas, saules starojums	Dinamiskās komponentes izvērtējums – <i>ON/OFF</i>
	E6 – FP-LAB 3/5/7	Eksperiments – Freneļa lēcas fokusa punkta optimizācija	Mazā mēroga salīdzinošs laboratorijas eksperiments	Temperatūras, saules starojums	Fokusa punkta attāluma izvērtējums – 3/5/7 cm
3	E7 – TEST <i>A/P/H</i>	Eksperiments – dinamiskas fasādes sistēmas ar saules enerģijas uzkrāšanu testēšana	Lielā mēroga salīdzinošs āra eksperiments	Temperatūras, siltuma plūsmas, saules starojums, enerģijas patēriņš	Performances izvērtējums – <i>Active/Passive/Hybrid mode</i>

2.2. Materiāli un aprīkojums

Šajā pētījumā tika izmantotas dažādas laboratorijas iekārtas, speciāli izstrādāti testēšanas stendi un vairāku līmeņu fasādes moduļu prototipi, lai eksperimentāli novērtētu FPM integrētu adaptīvu solāro fasāžu termisko veikspēju. Šajā apakšnodalā aprakstītie materiāli un aprīkojums ietver gan pašu fasādes moduļu fiziskās sastāvdaļas, gan vides kontroles sistēmas, kas tika izmantotas skaidri definētu un atkārtojamu robežnosacījumu nodrošināšanai. Tādējādi šīs apakšnodalās mērķis ir raksturot konstrukcijas materiālus, FPM, saules starojuma koncentrācijas elementus, siltumizolācijas komponentes un eksperimentālos testēšanas standus, kas veidoja visu pētījuma eksperimentu pamatu.

Visa pētījuma gaitā tika izmantoti divi komerciāli pieejami parafīna bāzes FPM – RT21HC un RT28HC. Tie tika izvēlēti, jo to kušanas temperatūras atbilst iekštelpu termiskā komforta diapazonam un ir īpaši piemērotas fasādēs integrētām latentās siltumenerģijas uzkrāšanas

sistēmām. RT21HC kušanas temperatūra ir aptuveni 21 °C, un tas raksturojas ar augstu latentās siltuma uzkrāšanas kapacitāti un šauru fāžu pārejas temperatūras intervālu, kas nodrošina efektīvu termisko amortizāciju diennakts uzlādes un izlādes ciklu laikā. RT28HC, kura kušanas temperatūra ir aptuveni 28 °C, tika izmantots, lai novērtētu augstākas fāžu pārejas temperatūras ietekmi gan aukstās sezonas, gan siltās sezonas āra apstākļos.

Abi FPM tika ievietoti taisnstūrveida stikla konteineros, kuru ārējie izmēri dažādos eksperimentos atšķīrās, taču katra eksperimenta ietvaros iekšējā ģeometrija tika saglabāta nemainīga, lai nodrošinātu rezultātu salīdzināmību. Dažās fasādes moduļu versijās FPM konteineros tika integrētas vara plāksnes vai stieņi, lai uzlabotu iekšējo siltuma pānesi un samazinātu termisko slāņošanas fāžu pārejas procesa laikā.

Tika testētas vairākas siltumizolācijas stratēģijas. Silīcija aerogēla izolācija tika plaši izmantota kā augstas veiktspējas, caurspīdīgs un zema blīvuma siltumizolācijas slānis. Aerogēls tika izmantots pilnā apjomā, daļēji vai arī integrēts dinamiskos komponentos, piemēram, atstarojošās lāpstiņās vai konusveida optiskajos elementos. Gaisa spraugas (plakanas un koniskas) tika izmantotas konvekcijas siltuma pāneses regulēšanai un saules starojuma koncentrācijas trajektorijas ietekmēšanai. Konusveida gaisa spraugas ar *PMMA* vai Freneļa lēcām ārējā virsmā bija būtisks elements eksperimentos, kuros tika pētīta konusa ģeometrijas un fokusa punkta novietojuma ietekme uz FPM uzlādes efektivitāti. Turklāt dažos laboratorijas eksperimentos FPM izlādes laikā naktī tika izmantots regulējams siltumizolācijas slānis, lai samazinātu siltuma zudumus, vienlaikus netraucējot uzlādes procesu dienas laikā.

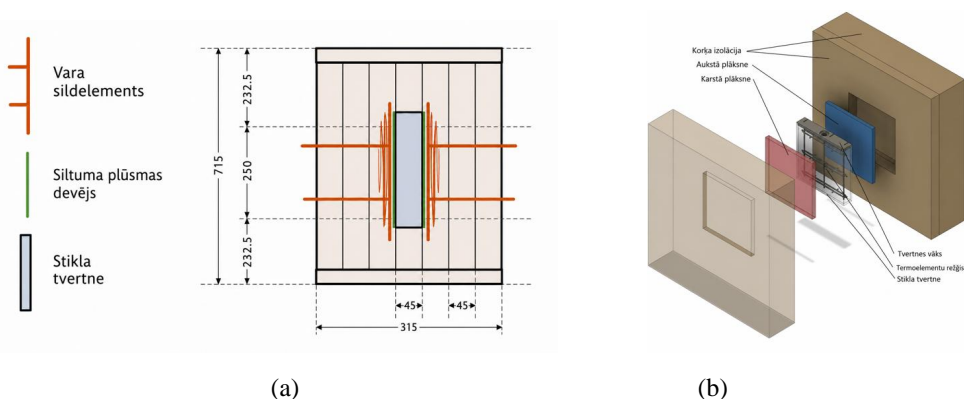
Optiskajām komponentēm bija galvenā nozīme dinamisko fasādes moduļu darbībā. *PMMA* pārklājumi kalpoja kā caurspīdīgi aizsargslāņi konfigurācijās bez starojuma koncentrācijas, ļaujot saules starojumam netraucēti sasniegt FPM, vienlaikus nodrošinot konstrukcijas mehānisko stabilitāti. Freneļa lēcas, kas arī izgatavotas no *PMMA*, tika izmantotas konfigurācijās ar starojuma koncentrāciju, lai pastiprinātu saules starojumu uz FPM konteineru un būtiski palielinātu uzlādes temperatūru. To novietojums attiecībā pret FPM virsmu tika mainīts, lai noteiktu optimālo fokusa punkta pozīciju.

Visi laboratorijas eksperimenti tika veikti manuāli izgatavotos testēšanas standos kontrolētās klimata kamerās, kas spēj reproducēt gan stacionārus, gan dinamiskus sezonālos apstākļus. Āra eksperimenti tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes teritorijā (Rīga, Latvija), uz ēkas jumta, izmantojot speciāli konstruētus testēšanas standus, kas orientēti tieši uz dienvidiem. Metodoloģiskā pieeja, testēšanas standu konstrukcija, konkrētās eksperimentālās procedūras un katra pētījuma rezultāti detalizēti aprakstīti turpmākajās nodaļās.

3. REZULTĀTI

3.1. Divu FPM ar kušanas temperatūru 21 °C un 28 °C salīdzinājums, izmantojot karstās plātnes metodi (E1 – HP 21/28)

Eksperimentālais stends karstās plātnes testam redzams 3.1. attēlā.



3.1. att. Eksperimentālais stends karstās plātnes testam: (a) iekārtas šķērsriezums; (b) komponentu izvietojuma shēma.

Tika veikts 12 kārtu eksperiments atbilstoši 3.3. tabulā norādītajiem iestatījumiem. Pirmās četras kārtas tika veiktas stacionāros apstākļos, lai noteiktu FPM siltumvadītspēju (λ). No 5. līdz 12. kārtai tika veikti dinamiskie eksperimenti, izmantojot karstās plātnes iekārtu. Aprēķinātie šo stacionāro mērījumu rezultāti apkopoti 3.1. tabulā. Rezultātā iegūtās reprezentatīvās siltumvadītspējas vērtības ir 0,255 W/(m·K) RT21HC un 0,3 W/(m·K) RT28HC.

3.1. tabula

Eksperimentāli noteiktās vērtības un aprēķinātā siltumvadītspēja

Kārta	FPM	Stabilizācijas laiks, h	q – izmērītā siltumpl., W/m ²	Karstās plātnes temp., T _{HP} [°C]	Aukstās plātnes temp., T _{CP} [°C]	L – parauga biezums, m	λ – siltumvadītsp., W/(m·K)
1	RT21HC	15	82,12	28,27	9,68	0,056	0,25
2		22	91,46	29,57	9,67	0,056	0,26
3	RT28HC	10	94,5	34,74	17,69	0,056	0,31
4		53	89,80	34,90	17,71	0,056	0,29

Divu FPM eksperimentāla izpēte, izmantojot karstās plātnes iekārtu 12 eksperimenta kārtās, sniedza visaptverošu ieskatu to termiskajās īpašībās un uzvedībā kontrolētu sildīšanas un dzesēšanas ciklu laikā. Galvenie šī pētījuma posma secinājumi ir šādi.

- 1) Sākotnējie verifikācijas testi ar atsaucē materiāliem – XPS un fibrolītu – apstiprināja karstās plātnes iekārtas precizitāti un uzticamību. Eksperimentāli iegūtās

siltumvadītspējas vērtības sakrīta ar materiālu tehniskajās datu lapās norādītajām vērtībām, tādējādi validējot kalibrācijas procedūru un atbilstību standartizētiem mērījumu protokolliem.

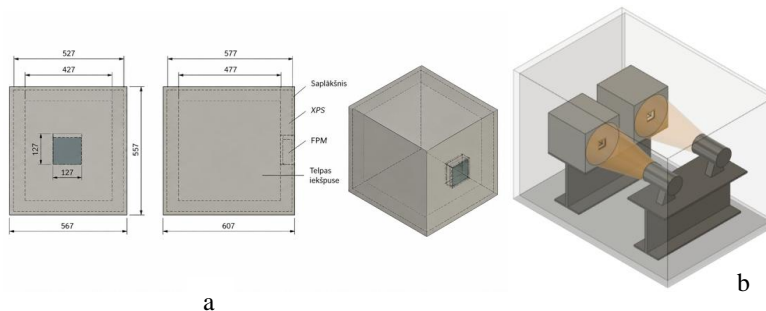
- 2) Siltuma plūsmas mērīšanas (*HFM*) metode ļāva eksperimentāli noteikt RT21HC un RT28HC efektīvo siltumvadītspēju visā to fāžu pārejas ciklā (kušanas un sacietēšanas laikā). Šīs eksperimentāli noteiktās λ vērtības kalpo kā būtiski ievades parametri turpmākajai FPM uzvedības skaitliskajai modelēšanai.
- 3) RT21HC demonstrēja relatīvi stabilu termisko reakciju gan sildīšanas, gan dzesēšanas fāzēs. Tomēr vairākās eksperimenta kārtās tika novērota mērena plātņu temperatūru un siltuma plūsmas asimetrija, galvenokārt nepietiekamas 2. plāksnes dzesēšanas dēļ. Temperatūras un siltuma plūsmas stabilizācija parasti tika sasniegta pēc 15–31 stundas, kas atbilst latentā siltuma uzkrāšanas un atbrīvošanas procesiem.
- 4) RT28HC uzrādīja līdzīgu siltuma absorbcijas dinamiku, taču demonstrēja nedaudz lielāku jutību pret robežnosacījumu izmaiņām. 10. eksperimenta kārtā tika panākta visstabilākā termiskā vide visā testēšanas laikā ar gandrīz identisku plāksņu temperatūru un siltuma plūsmas profilu, kas uzsver līdzsvarotu termisko robežnosacījumu nozīmi precīzai FPM raksturošanai.
- 5) Atkārtota problēma vairākās eksperimenta kārtās bija nepietiekama 2. plātnes dzesēšana, kas neļāva sistēmai sasniegt vēlamās iestatītās temperatūras (piemēram, 2 °C) dzesēšanas ciklu laikā. Šī nelīdzsvarotība radīja nevienmērīgus temperatūras laukus un nepilnīgu FPM sacietēšanu, kas ietekmēja fāžu pārejas novērtējuma precizitāti.
- 6) Rezultāti uzsver precīzas temperatūras kontroles un simetrisku robežnosacījumu kritisko nozīmi FPM testēšanā. Pat nelielas plātņu temperatūru atšķirības radīja izmērāmas novirzes siltuma plūsmā un pagarināja stabilizācijas periodu, kas var ietekmēt noteikto termisko īpašību precizitāti.
- 7) Neskatoties uz konstatētajiem darbības ierobežojumiem, karstās plātnes iekārta izrādījās efektīvs instruments FPM termiskās uzvedības novērtēšanai ēku norobežojošo konstrukciju lietojumos. Tā ļāva detalizēti novērot kušanas un sacietēšanas procesus, siltuma plūsmas attīstību un stabilizācijas laikus kontrolētos termiskos apstākļos.

Plašais datu kopums, kas tika iegūts 12 eksperimenta kārtās, nodrošina stabilu pamatu skaitlisko modeļu izstrādei un validācijai, lai būtu iespējams simulēt FPM integrētu sistēmu darbību dinamiskas termiskās slodzes apstākļos.

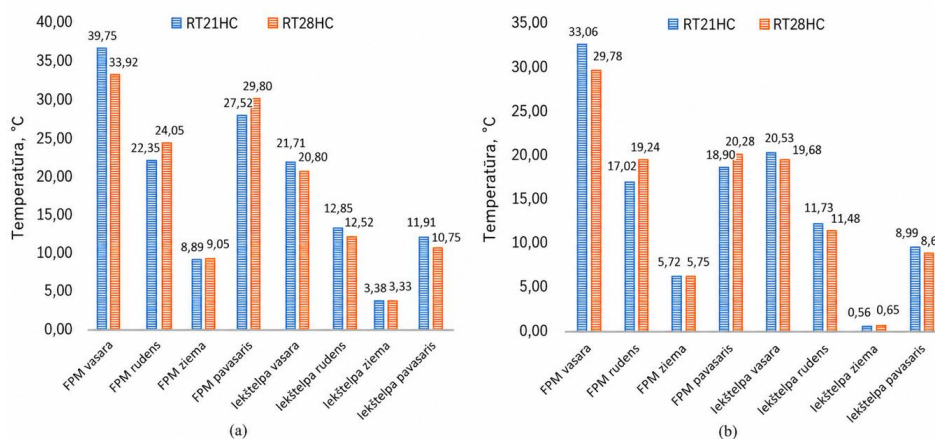
3.2. Divu FPM ar kušanas temperatūru 21 °C un 28 °C novērtējums dažādos gadalaikos stacionāros un dinamiskos laboratorijas apstākļos (E2 – FPM 21/28)

Šī eksperimenta galvenais mērķis bija novērtēt katra FPM veiktspēju dažādos gadalaikos. Salīdzinošie testi tika veikti, izmantojot speciāli izveidotu eksperimentālo stendu, kas balstīts *PASLINK* testēšanas metodē (3.2. att.).

3.3. attēlā redzams abu FPM sasniegto maksimālo vidējo temperatūru, kā arī atbilstošo iekštelpu gaisa temperatūru salīdzinājums stacionāros un dinamiskos testēšanas apstākļos. Lai gan kopējās temperatūras tendences abos eksperimentālajos režīmos ir līdzīgas, stacionārajos testos reģistrētās absolūtās temperatūras vērtības ir augstākas, un tas galvenokārt ir tāpēc, ka šo testu laikā netika novēroti starojuma pārtraukumi.



3.2. att. Mazā mēroga *PASLINK* tipa testēšanas kamera (a) un eksperimentālā iekārta (b).



3.3. att. RT21HC un RT28HC sasniegto maksimālo temperatūru salīdzinājums: (a) stacionārā testā; (b) dinamiskā testā.

Rudens, ziemas un pavasara apstākļos RT28HC konsekventi sasniedz augstākas maksimālās FPM temperatūras. Tomēr, neskatoties uz šiem augstākajiem FPM temperatūras maksimumiem, RT21HC visos gadalaikos un abos eksperimentālajos režīmos sistemātiski nodrošina augstāku iekštelpu gaisa temperatūru. Tas norāda, ka RT21HC efektīvāk uzkrāj siltumenerģiju FPM slānī un pēc tam to atbrīvo iekštelpu vidē, tādējādi nodrošinot labāku termisko veiktspēju.

Detalizētāka analīze liecina, ka RT21HC uztur augstāku iekštelpu temperatūru ar ievērojami lēzenāku temperatūras samazināšanos izlādes fāzē, kas demonstrē stabilāku uzkrātā siltuma atdevi. Savukārt RT28HC uzrāda augstākus temperatūras maksimumus uzlādes fāzē, taču pēc saules simulatora izslēgšanas temperatūra samazinās straujāk. Šāda uzvedība liecina,

ka testētajos apstākļos RT28HC dominē jutīgā siltuma uzkrāšana, nevis latentā siltuma uzkrāšana.

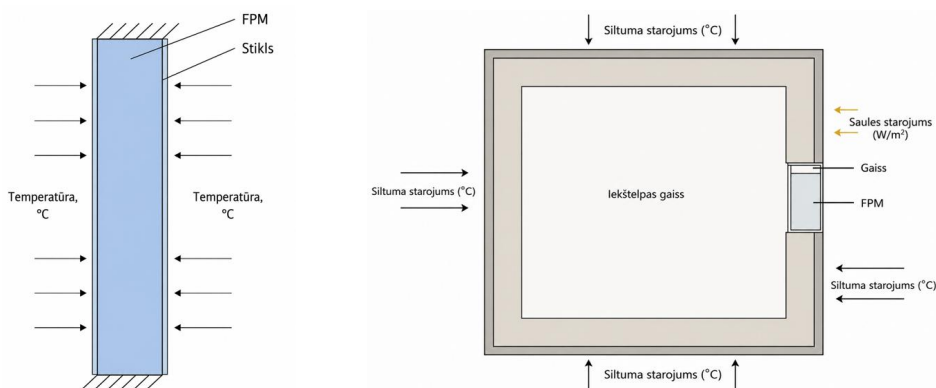
Temperatūras mērījumi atsevišķos slāņos apstiprina šos novērojumus – lielākajā daļā gadījumu visi RT21HC slāņi sasniedz kušanas temperatūras diapazonu un piedalās latentā siltuma uzkrāšanā, savukārt nevienā RT28HC slānī salīdzināmos apstākļos netiek sasniegta kušanas temperatūra, un tiek novērotas tikai temperatūras svārstības starp minimālajām un maksimālajām vērtībām uzlādes cikla laikā.

Vasaras eksperimentālajā konfigurācijā abi FPM sasniedz kušanas temperatūru, tomēr temperatūras atfīstības raksturs saglabājas atšķirīgs. RT21HC demonstrē pakāpeniskāku temperatūras pieaugumu un uztur augstāku temperatūru nakts laikā, savukārt RT28HC raksturojas ar straujākām temperatūras svārstībām, kas saistītas ar daļēju kušanu un jutīgā siltuma dominanci.

Kopumā eksperimentālie rezultāti parāda, ka testētajos klimatiskajos apstākļos RT21HC nodrošina efektīvāku siltumenerģijas uzkrāšanu un labvēlīgāku ietekmi uz iekštelpu temperatūru nekā RT28HC, īpaši pārejas sezonās, kur daļēja kušana būtiski ietekmē sistēmas veiktspēju.

3.3. Modelēšana ANSYS Fluent vidē – S1 un S2

3.4. attēlā redzamas S1 un S2 simulācijas modeļu shēmas ANSYS Fluent programmā.



3.4. att. S1 (pa kreisi) un S2 (pa labi) simulācijas modeļu shēma.

ANSYS Fluent modelis, kas izstrādāts S1 simulācijā, veiksmīgi reproducēja abu FPM – RT21HC un RT28HC – kopējo termisko uzvedību kontrolētos karstās plātnes apstākļos un tika validēts, izmantojot astoņas eksperimenta kārtas. Salīdzinājums parādīja, ka skaitliskais modelis darbojas ar augstu precizitāti gadījumos, kad robežnosacījumi ir stabili un mēreni, īpaši zemas intensitātes sildīšanas un dzesēšanas režīmos abiem materiāliem. Šādos apstākļos *RMSE* un *RRMSE* vērtības saglabājas zemas un korelācija starp simulētajām un izmērītajām temperatūrām ir augsta (piemēram, $R^2 = 0,87$ RT21HC sildīšanas gadījumā).

Preteji tam būtiskas novirzes rodas ekstrēmu termisko pāreju laikā (dzesēšana līdz 2 °C vai sildīšana virs 45 °C), kad eksperimentālajās iekārtās plātņu temperatūras ne vienmēr varēja sasniegt vai uzturēt noteiktos iestatījumus. Šādas robežnosacījumu neatbilstības aizkavē vai nomāc fāžu pāreju fiziskajā FPM materiālā un rada sistemātiskas novirzes simulācijā, kurā reakcija ir ideāla un tādēļ tiek prognozēta ātrāka kušana vai sacietēšana. Neskatoties uz šiem ierobežojumiem, ilgtermiņa temperatūras tendences un līdzsvara temperatūras starp simulāciju un eksperimentu ļoti sakrīt, kas apliecina, ka kalibrētās materiāla īpašības un izmantotā skaitliskā pieeja nodrošina fiziski uzticamu FPM uzvedības aprakstu.

S1 simulācija izveido validētu modelēšanas ietvaru, kas apraksta dominējošos siltuma pārnese mehānismus un fāžu pārejas dinamiku, vienlaikus identificējot FPM uzvedības jutību pret nepilnīgu robežnosacījumu kontroli. Šīs atziņas tieši veicina pāreju uz S2 simulāciju, kurā tiek izstrādāts maza mēroga FPM testēšanas kastes modelis, lai novērtētu RT21HC un RT28HC darbību reālos klimatiskajos apstākļos.

Tā kā S2 simulācija ietver telpiski sadalītus saules starojuma ieguvumus, diennakts temperatūras ciklus un no klimata atkarīgu uzlādes un izlādes uzvedību, validētie S1 materiāla parametri un siltuma pārnese iestatījumi nodrošina stabilu pamatu modelēšanai. S1 simulācijā novērotās atšķirības starp simulētajiem un eksperimentālajiem fāžu pārejas ātrumiem motivē S2 modeli iekļaut klimatam specifiskus pārejas robežnosacījumus, kas ļauj precīzāk salīdzināt abu FPM darbību dažādos laikapstākļu scenārijos un gadalaikos.

S2 maza mēroga FPM testēšanas kastes simulācija parāda, ka FPM veikspēja ir cieši saistīta ar klimatisko zonu, sezonālajiem temperatūras profiliem un saules starojuma intensitāti. Visos simulētajos klimatiskajos apstākļos RT28HC nodrošina stabilāku termisko uzvedību nekā RT21HC, pateicoties augstākai kušanas temperatūrai un lielākai latentā siltuma kapacitātei.

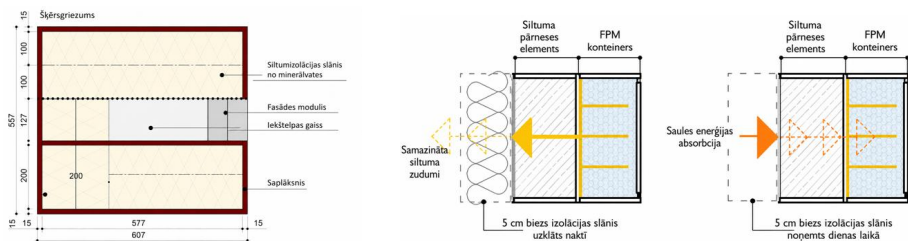
Mērenos klimatiskajos apstākļos (pavasaris/rudens Helsinkos) abi FPM daļēji kūst, tomēr RT21HC efektīvāk saglabā siltumu izlādes fāzē. Augstas saules starojuma intensitātes apstākļos (pavasaris Seviljā) RT21HC izraisa pārkaršanu, savukārt RT28HC uztur iekšēlu temperatūru komforta diapazonā. Seviljā ziemas apstākļos abu FPM siltuma uzkrāšanas kapacitāte ir līdzīga, taču RT28HC darbojas nedaudz labāk. Helsinkos vasarā abi FPM sasniedz kušanas temperatūru, tomēr RT28HC efektīvāk ierobežo pārkaršanu.

Šie rezultāti apstiprina, ka RT21HC ir labāk piemērots aukstākiem Ziemeļeiropas klimatiskajiem apstākļiem, kur pārkaršanas risks ir minimāls, savukārt RT28HC nodrošina labāku veikspēju siltākos vai augstas saules starojuma intensitātes reģionos. Tomēr jāatzīmē, ka maza mēroga testēšanas kastes ierobežotais iekšējais tilpums ir būtisks ierobežojums pilnīgai ēku norobežojošo konstrukciju uzvedības novērtēšanai reālos ekspluatācijas apstākļos.

3.4. Regulējamās siltumizolācijas un siltuma pārnese elementu ietekme – gaisa sprauga, aerogels, siltuma pārnese pastiprinātājs un Fresneļa lēca (E3 – ADJ ON/OFF)

3.5. attēlā redzams E3 eksperimenta testēšanas stenda šķērsriezums un fasādes modulis.

Rezultāti liecina, ka regulējamā siltumizolācijas slāņa izmantošana palielināja vidējo temperatūru gan FPM slānī, gan kastes iekšējā visās eksperimentālajās konfigurācijās. Tomēr visizteiktākā ietekme tika novērota moduļos ar gaisa spraugas slāni, kur papildu izolācija visefektīvāk samazināja siltuma zudumus izlādes fāzē. Šie moduļi demonstrēja labāku veiktspēju, salīdzinot ar konfigurācijām ar lielāku fiksēto siltumizolācijas apjomu, jo to temperatūras līknes pēc sacietēšanas konverģēja ciešāk, kas liecina par lēnāku siltuma izkliedi un labāku siltuma saglabāšanu.



3.5. att. Mazā mēroga *PASLINK* tipa testēšanas stends (pa kreisi) un fasādes moduļa elements (pa labi).

Kopumā, analizējot pilnu termisko ciklu (uzlādi un izlādi), moduļi ar gaisa spraugas slāni uzkrāja un atbrīvoja vairāk enerģijas nekā pārējās konfigurācijas. Savukārt moduļi ar augstāku fiksētās siltumizolācijas līmeni parādīja priekšrocības galvenokārt latentā siltuma uzkrāšanā, demonstrējot stabilākus temperatūras plato fāžu pārejas laikā.

Jāatzīmē, ka testēšanas stenda relatīvi nelielais izmērs veicināja paaugstinātas FPM un iekšējā temperatūras visās konfigurācijās. Tādēļ nākamais pētījuma posms koncentrējas uz sistēmas mērogošanu līdz lielākam izmēram un tās uzvedības validāciju reālos vides apstākļos.

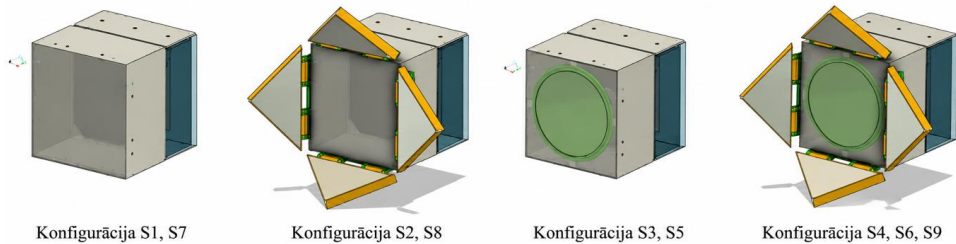
Saldzinošais novērtējums, kas balstīts vairākos atsaucēs rādītājos, piemēram, iekšējā temperatūrā un vidējā FPM temperatūrā pēc 24 un 48 stundām, gan ar regulējamo izolāciju, gan bez tās, apstiprināja, ka konfigurācijas izvēle ir atkarīga no saules fasādes paredzētās funkcijas. Piemēram, konfigurācijas ar gaisa spraugas slāni demonstrēja visātrāko kušanas ātrumu un augstākās temperatūras testētajos apstākļos, kas padara tās piemērotas vietām ar īsu saules starojuma iedarbības periodu. Savukārt konfigurācijas ar lielāku siltumizolācijas līmeni var būt piemērotākas orientācijām ar augstu saules starojuma slodzi, kur svarīgi ir kontrolēt pārmērīgu jutīgā siltuma pieaugumu.

Šīs atziņas tieši ietekmē turpmākos pētījuma posmus. E4 un E5 eksperimentos uzmanība tiek pievērsta dinamiskās komponentes ietekmes novērtēšanai – gan laboratorijas apstākļos, gan ārā testos. Šajā eksperimentā iegūtie rezultāti atklāj dažādu FPM–izolācijas konfigurāciju termisko jutību un enerģijas uzkrāšanas dinamiku, kas ir būtiski dinamiskā fasādes moduļa uzvedības interpretācijai. Pārejot no pasīvas FPM–izolācijas optimizācijas (šis eksperiments) uz aktīvu saules starojuma koncentrāciju un sistēmas darbību ārā apstākļos (E4–E5), identificētie termiskie modeļi, fāžu pārejas raksturlielumi un sistēmas jutības faktori nodrošina pamatu, lai novērtētu, kā dinamiska saules starojuma koncentrācija, lāpstiņu kustība un reālie laikapstākļi var vēl vairāk uzlabot vai mainīt FPM veiktspēju.

3.5. Dinamiskās komponentes ietekmes izvērtējums (E4 – DYN-LAB ON/OFF un E5 – DYN-OUT ON/OFF)

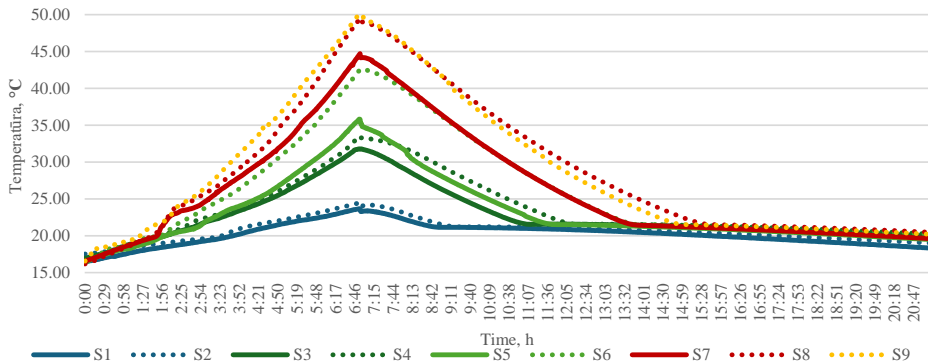
Galvenais uzlabojums, salīdzinot ar iepriekšējo pētījumu, ir dinamiskās komponentes integrācija, kas sastāv no rotējošām lāpstiņām. Šī komponente pilda divas galvenās funkcijas:

- gaismas koncentrēšanu, novirzot krītošo saules starojumu uz siltuma pārnesei elementu, lai palielinātu FPM pievadīto enerģiju;
- siltumizolāciju, jo lāpstiņu iekšpuse ir papildīta ar aerogelu, kas samazina siltuma zudumus no moduļa izlādes fāzes laikā (regulējamā izolācija).



3.6. att. Saules fasādes moduļa rasējumi dažādās konfigurācijās.

Lai noteiktu optimālo materiālu un ģeometrisko parametru kombināciju, modulis tika testēts vairākās konfigurācijās (3.6. att.). 3.7. attēlā parādīts visu deviņu eksperimentālo konfigurāciju vidējās FPM temperatūras salīdzinājums.



3.7. att. Vidējās FPM temperatūras salīdzinājums starp konfigurācijām.

Laboratorijas pētījuma (E4) un āra testu (E5) apvienotie rezultāti parāda konsekventu un izmērāmu dinamiskās komponentes priekšrocību piedāvātajā saules fasādes modulī. Kontrolētos laboratorijas apstākļos dinamiskā komponente būtiski palielināja siltumenerģijas absorbciju FPM uzlādes fāzē un uzlaboja siltuma saglabāšanu izlādes fāzē. Šis uzlabojums bija

īpaši izteikts konfigurācijās, kur konuss, aerogela slānis un regulējamā izolācija tika optimizēti, lai veicinātu siltuma pārnesei no Fresneļa lēcas uz FPM.

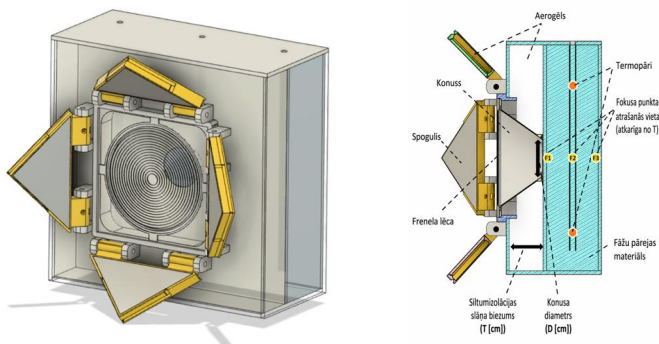
Fresneļa lēcas ieviešana vēl vairāk palielināja saules enerģijas koncentrāciju un intensitāti, radot dinamiskāku FPM termisko reakciju. Atstarojošo lāpstiņu un Fresneļa lēcas kopējā darbība samazināja siltuma zudumus, paātrināja FPM kušanu augšējos un apakšējos slāņos un pagarināja efektīvas siltuma izlādes ilgumu. Laboratorijas pētījumu rezultāti apstiprina, ka gan ģeometriskai konfigurācijai, gan komponentu savstarpējai mijiedarbībai ir būtiska nozīme saules fasādes moduļa kopējās termiskās efektivitātes noteikšanā.

Āra eksperimenti šos secinājumus apstiprināja reālos klimatiskajos apstākļos. Pat mainīga saules starojuma, dažādu saules krišanas leņķu un periodiskas mākoņainības apstākļos fasādes modulis ar dinamisko komponenti (10. konfigurācija) uzrādīja labāku veiktspēju nekā statiskā versija (11. konfigurācija). Dinamiskā konfigurācija nodrošināja augstāku FPM temperatūru, vienmērīgākas siltuma plūsmas līknes un efektīvāku siltuma uzkrāšanu dienas vēlajās stundās, kad saules azimuta leņķis pārvietojās uz rietumiem, tādējādi uzsverot lāpstiņu kustības operatīvo priekšrocību. Uzlabotā veiktspēja izlādes periodā papildus apstiprināja to, ka stratēģiski izvietoti koncentrācijas un izolācijas elementi samazina siltuma zudumu ātrumu un pagarina izmantojamās siltuma uzkrāšanas periodu.

Kopumā E4 un E5 rezultāti parāda, ka fasādes moduļa veiktspēja ir ļoti jutīga pret to, cik efektīvi optiskās un termiskās komponentes – atstarojošās lāpstiņas, konuss, aerogela izolācija un Fresneļa lēca – sadarbojas, lai novirzītu un saglabātu saules enerģiju. Lai gan Fresneļa lēcas pozitīvā ietekme tika skaidri novērota, eksperimenti parādīja arī to, ka tās efektivitāte lielā mērā ir atkarīga no fokusa punkta precīzas atrašanās vietas attiecībā pret aerogela slāni, konusa ģeometriju un FPM konteineru. Šie secinājumi kalpoja par pamatu nākamajam izstrādes posmam – eksperimentam E6, kurā sistemātiski tiek izvērtēta Fresneļa lēcas fokusa punkta pozīcija.

3.6. Fokusa punkta attāluma un konusa diametra ietekme uz siltuma pārnesei mazizmēra fasādes modulī (E6 – FP-LAB 3/5/7)

Noslēdzošais komponentu līmeņa laboratorijas eksperiments, kas tika veikts, lai pabeigtu mazizmēra moduļa izstrādi integrācijai pilna mēroga fasādes sistēmā, bija vērsts uz optimālās fokusa punkta pozīcijas un konusa diametra noteikšanu. Šim nolūkam izstrādātais mazizmēra saules fasādes modulis sastāv no vairākām galvenajām komponentēm (3.8. att.): dinamiskās komponentes ar kustīgām atstarojošām lāpstiņām, kas pildītas ar aerogela izolāciju; Fresneļa lēcas; koncentrējoša konusa; puscaurspīdīga aerogela izolācijas slāņa; FPM konteineru; caurspīdīga stikla apvalka, kas aptver aerogela slāni.



3.8. att. Mazizmēra saules fasādes moduļa konstrukcija un tā šķērs griezum.

Iegūtie FPM temperatūras rezultāti ļauj definēt vairākus secinājumus.

- Visaugstākā siltuma pāreše dienas laikā tiek sasniegta konfigurācijā F1 D4, kur maksimālā FPM temperatūra dienas cikla laikā sasniedz 19,52 °C.
- Augstākā cikla beigu FPM temperatūra tiek novērota konfigurācijā ar šaurāko konusa diametru, kas par 7,5 % atšķiras no zemākās veiktspējas konfigurācijas. Tas liecina par viszemākajiem siltuma zudumiem nakts laikā konfigurācijā F3 D2.
- Pārvietojot fokusa punktu dziļāk FPM konteinerā, efektīva siltuma pāreše tiek nodrošināta arī ar šaurākiem konusa diametriem. Salīdzinot konfigurācijas F1 D4 un F3 D2, vidējās FPM temperatūras starpība ir tikai aptuveni 3 %.
- Siltuma pārešes pastiprināšanos uzlādes fāzē var panākt ar platu konusu un plānu aerogela slāni (F3), tomēr palielinātie siltuma zudumi nakts cikla laikā var samazināt kopējo ieguvumu. Piemēram, konfigurācijā F3 D3 otrā augstākā dienas temperatūra (19,16 °C) samazinās līdz otrajai zemākajai cikla beigu vērtībai (16,45 °C).
- Gan fokusa punkta novietojums, gan konusa diametrs būtiski ietekmē siltuma pārešes efektivitāti. Salīdzinot konfigurācijas F1 D2 un F1 D4, vidējā FPM temperatūra palielinās par 7,2 %. Līdzīgi, salīdzinot F3 D4 un F1 D4, novērojams 5,4 % pieaugums.

Eksperimentu rezultāti liecina, ka konfigurācija F1 D4 nodrošina vislabāko kopējo veiktspēju. Tomēr, integrējot moduli dinamiskajā saules fasādes sistēmā, galīgais fokusa punkta attālums jānosaka, ņemot vērā arī aerogela izolācijas slāņa biezumu, jo šis slānis tieši ietekmē siltuma zudumus nakts laikā. Iegūtie rezultāti rāda, ka lielāks konusa diametrs uzlabo siltuma pāreši, tādēļ izstrādātajai saules fasādei vispiemērotākā konfigurācija ir 7 cm biezs aerogela izolācijas slānis kombinācijā ar fokusa punkta novietojumu F1.

3.7. Lielā mēroga moduļa āra testēšana (E7 – TEST A/P/H)

Šajā apakšnodaļā aprakstīts un analizēts eksperimentālās testēšanas noslēdzošais metodoloģiskās attīstības posms. Šis testēšanas posms ietver sistēmas līmeņa āra salīdzinošo eksperimentu, kurā pilna mēroga fasādes modulis tiek pārbaudīts reālos klimatiskajos apstākļos. Galvenais eksperimenta mērķis ir novērtēt iekšstelpu temperatūras svārstības un

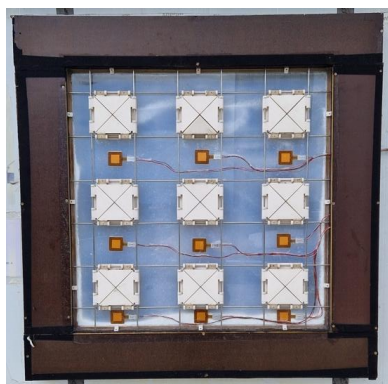
enerģijas patēriņu dažādos gadalaikos, lai iegūtu secinājumus par piedāvātā tehnoloģiskā risinājuma – dinamiskās saules fasādes – energoefektivitāti.

Liela mēroga āra eksperimentālās testēšanas stendi redzami 3.9. attēlā.

Liela mēroga saules fasādes moduļa koncepcija balstās konfigurācijā, kas tika izstrādāta mazizmēra eksperimentos, apvienojot deviņas mazizmēra vienības vienotā ēkas norobežojošās konstrukcijas elementā. Veiktspējas salīdzināšanai kā references tehnoloģija tika izvēlēts trīskāršais stikla pakešu logs. Šāda izvēle atbilst piedāvātās sistēmas galvenajiem funkcionālajiem mērķiem – gaismas caurlaidībai un siltuma saglabāšanai.



(a)



(b)



(c)

3.9. att. Testēšanas (pa kreisi) un references (pa labi) stendi (a); saules fasādes sistēma ar deviņiem mazizmēra dinamiskajiem moduļiem no ārpuses (b) un no testēšanas kabīnes iekšpuses (c).

3.7.1. Eksperiments reālos klimata apstākļos

Lai visaptveroši izvērtētu eksperimentālos datus un definētu pamatotus secinājumus par testēšanas stenda veiktspēju, tika izstrādāts salīdzināšanas kritēriju kopums, kas ļauj novērtēt atšķirības starp testēšanas un references stendiem.

- Laika salīdzinājums – eksperimentālie rezultāti tika analizēti 24 stundu periodos, lai aptvertu pilnu diennakts ciklu (diena un nakts).
- Termiskā veiktspēja – novērtējums balstīts tajā, cik efektīvi iekštelpu temperatūra tiek uzturēta komforta diapazonā 15–25 °C.
- Energoefektivitāte – novērtēšana veikta, analizējot siltumsūkņu elektroenerģijas patēriņu visos darbības režīmos.

Pamatojoties uz šiem kritērijiem, tika izvēlēti reprezentatīvi 24 stundu periodi, lai nodrošinātu pamatotu un salīdzināmu veiktspējas analīzi. Izvēlētās dienas aptver visus dinamiskās saules fasādes darbības režīmus un dažādus klimatiskos apstākļus, tostarp gan saulainas, gan apmākušās dienas visos četros gadalaikos.

Dienu izvēle tika balstīta vietējās meteoroloģiskās stacijas datos, īpaši ņemot vērā mērīto saules starojuma intensitāti un āra gaisa temperatūru. Pilns detalizētai analīzei izvēlēto dienu saraksts sniegts 3.2. tabulā.

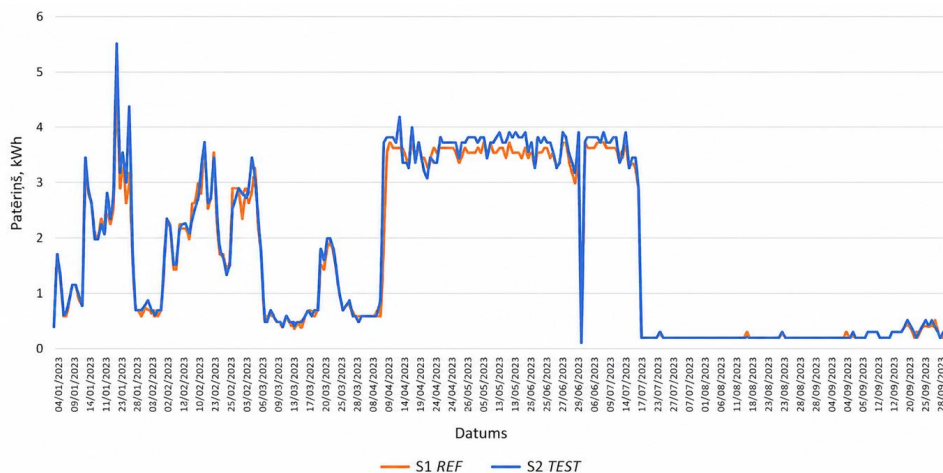
3.2. tabula

Eksperimentālo datu izvērtēšanai atlasīto dienu saraksts, pamatojoties uz laikapstākļiem, gadalaiku un darbības režīmu

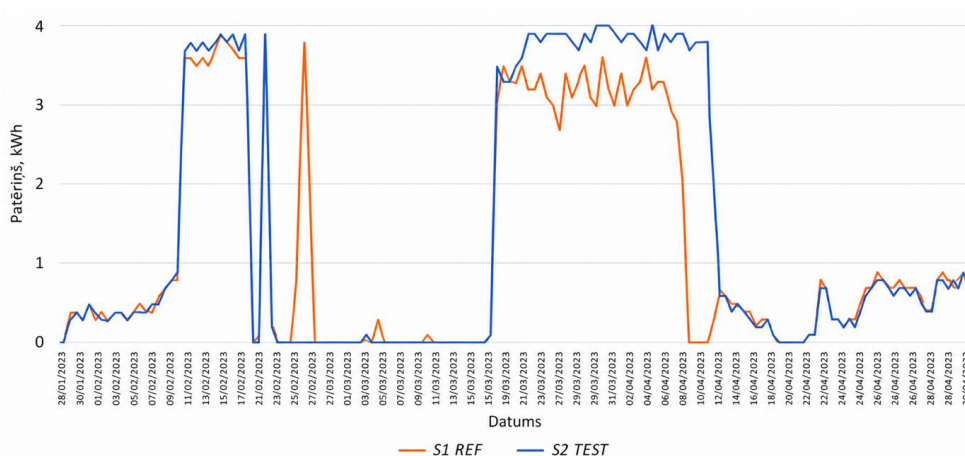
Ziema	Saulains laiks	Mākoņains laiks
Pasīvs	X	X
Aktīvs	X	15/02/2023
Pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī)	14/02/2023	22/02/2025
Pavasaris	Saulains laiks	Mākoņains laiks
Pasīvs	19/04/2025	14/03/2023
Aktīvs	14/05/2023	16/05/2023
Pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī)	5/05/2025	6/05/2025
Vasara	Saulains laiks	Mākoņains laiks
Pasīvs	8/07/2024	5/07/2024
Aktīvs	22/08/2024	23/08/2024
Pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī)	26/06/2025	24/06/2025
Rudens	Saulains laiks	Mākoņains laiks
Pasīvs	22/09/2023	23/09/2023
Pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī)	16/10/2024	14/10/2024
Pasīvs (naktī)–aktīvs (dienā)	7/09/2024.	X

3.7.2. Siltumsūkņu elektroenerģijas patēriņš

Elektroenerģijas patēriņa dati par 2023. un 2024. gadu grafiski attēloti 3.10. un 3.11. attēlā.



3.10. att. Siltumsūkņu elektroenerģijas patēriņš no 2023. gada 4. janvāra līdz 1. novembrim.



3.11. att. Siltumsūkņu elektroenerģijas patēriņš no 2024. gada 23. maija līdz 16. oktobrim.

Grafikos apzīmējumi “S1 REF” un “S2 TEST” attiecīgi apzīmē siltumsūkņus references un testēšanas stendos. Kā bija sagaidāms, sezonālās izmaiņas būtiski ietekmē abu siltumsūkņu enerģijas patēriņu.

2023. gadā abu stendu patēriņa līknes kopumā seko līdzīgai tendencei; tomēr testēšanas stends (S2) konsekventi patērē nedaudz vairāk enerģijas, lai uzturētu vēlamo iekštelpu temperatūru. Izteikts patēriņa maksimums ir novērojams ziemas periodā, īpaši 23. janvārī, kad testēšanas stenda enerģijas patēriņš pārsniedz 5 kWh. Pavasara un vasaras mēnešos (2023. gada aprīlis–jūlijs) abas sistēmas uzrāda relatīvi stabilu patēriņa tendenci, kas parasti svārstās 3–4 kWh dienā. Periodi ar gandrīz nulles patēriņu norāda laiku, kad siltumsūkņi bija izslēgti.

2024. gadā siltumsūkņu elektroenerģijas patēriņš uzrāda līdzīgu sezonālo raksturu. Tomēr periodā no 1. augusta līdz 29. augustam testēšanas stends darbojas nepārtraukti un patērē

aptuveni par 1 kWh vairāk elektroenerģijas dienā nekā references stends. Savukārt no 3. septembra līdz 16. oktobrim sistēma tika testēta dažādos darbības režīmos, kad siltumsūkņi darbojās tikai dienā vai tikai naktī. Šajā periodā tendence nedaudz mainās – testēšanas stends patērē nedaudz mazāk elektroenerģijas nekā references stends, kas liecina par uzlabotu efektivitāti mainīgos darbības režīmos.

3.7.3. Efektīvās siltuma caurlaidības (U vērtības) noteikšana

Aprēķinātās U vērtības korektums lielā mērā ir atkarīgs no pieņēmuma, ka analizētajā periodā fasādes sistēma darbojas kā tikai siltumvadītspējīgs elements. FPM fasādēm tas nozīmē, ka jāpastiprina, ka FPM (fāžu pārejas materiāls) atrodas vai nu cietā, vai šķidrā stāvoklī un ka nenotiek kušana vai sacietēšana, kas varētu sarežģīt siltuma plūsmas signālu latentā siltuma efektu dēļ.

Tas tika neatkarīgi pārbaudīts, izmantojot FPM konteineru temperatūras mērījumus, kas parādīja, ka analizētajos ziemas, pavasara un rudens laikā visas FPM temperatūras saglabājās ievērojami zem kušanas diapazona, savukārt vasarā tās bija krietni virs tā (19–21 °C RT21HC materiālam). Turklāt šo eksperimentu laikā stendos nedarbojās ne apkures, ne dzesēšanas, ne ventilācijas sistēmas, nodrošinot to, ka termisko vidi nosaka tikai dabiskā iekštelpu un āra temperatūras starpība un iekšējais radiācijas līdzsvars.

Saules fasādes modulis aprēķina periodos arī bija neaktīvs (dinamiskie elementi atradās slēgtā pozīcijā), un saules starojums nebija klātesošs, tādēļ FPM neuzkrāja papildu saules enerģiju. Aprēķinātās nakts U vērtības apkopotas 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Aprēķinātā stacionārā stāvokļa U vērtība naktī

Datums	U vērtība [W/m ² K]	n (derīgās minūtes)	FPM stāvoklis	\bar{q} [W/m ²]	ΔT [K]
07/02/2023	0,248	945	Ciets	+1,64	-6,60
17/03/2023	0,593	780	Ciets	+4,82	-8,11
19/03/2023	0,498	869	Ciets	+3,29	-6,61
27/08/2023	0,289	711	Šķidr	+2,32	-8,01
23/10/2023	0,102	895	Ciets	+0,56	-5,48
25/10/2023	0,233	935	Ciets	+1,71	-7,32
29/10/2023	0,090	969	Ciets	+0,53	-5,91
25/07/2025	0,342	507	Šķidr	+1,37	-4,01
26/07/2025	0,534	544	Šķidr	+2,70	-5,05

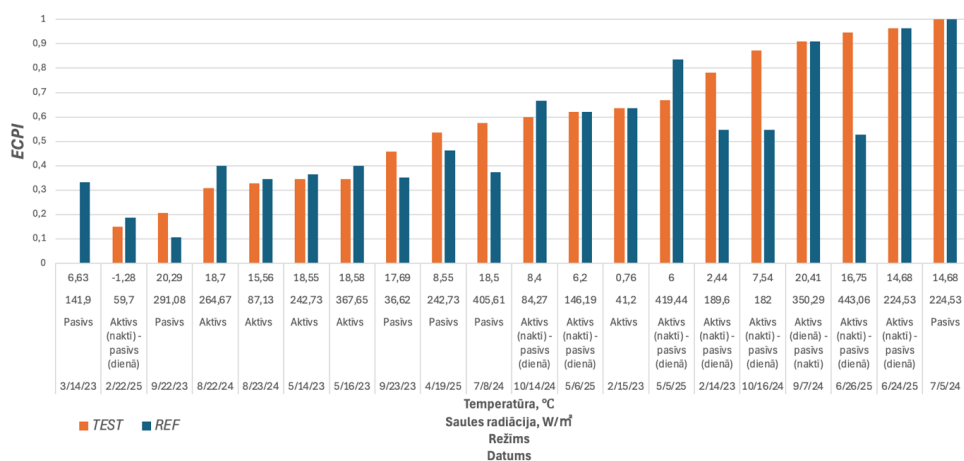
Šīs vērtības raksturo fasādes moduļa iekšējo siltuma caurlaidību, kad FPM ir pilnībā sacietējis un darbojas tikai kā pasīvs siltumizolācijas materiāls.

3.7.4. Enerģijas un komforta veiktspējas indeksa (ECPI) aprēķins

ECPI tika aprēķināts reprezentatīvām dienām (3.2. tab.) ziemā, pavasarī, vasarā un rudenī dažādos darbības režīmos (pilnībā pasīvs, pilnībā aktīvs un hibrids dienas/nakts režīms). Lietojot vienādu aprēķina metodiku gan izstrādātajai fasādes sistēmai, gan references sistēmai, iegūtie rezultāti nodrošina konsekventu pamatu veiktspējas salīdzināšanai dažādos laikapstākļos un ļauj noteikt, kuri darbības režīmi nodrošina vislabāko līdzsvaru starp iekštelpu komforta stabilitāti un enerģijas patēriņu.

3.12. attēlā aprēķinu rezultāti apkopoti un sakārtoti pieaugošā secībā atbilstoši testētās tehnoloģijas ECPI vērtībām.

Pamatojoties uz aprēķinātajām ECPI vērtībām, var novērot, ka izstrādātā adaptīvā fasāde kopumā uzrāda zemāku veiktspēju gadījumos, kad tā nepārtraukti darbojas pilnībā pasīvā vai pilnībā aktīvā režīmā. Tomēr tika identificēti divi būtiski izņēmumi. Pirmkārt, mērenā āra temperatūrā un mērenas saules starojuma intensitātes gadījumā pasīvais režīms nodrošina konkurētspējīgas ECPI vērtības. Šādi apstākļi parasti raksturīgi mēreniem vasaras periodiem, kad saules ieguvumi ir pietiekami, lai uzturētu iekštelpu stabilitāti bez pārkaršanas, un papildu enerģijas patēriņš ir ierobežots. Otrkārt, zemā āra temperatūrā (aptuveni 0 °C) un samazinātas saules starojuma intensitātes gadījumā aktīvais režīms uzrāda salīdzinoši labu veiktspēju. Tas atbilst maigas ziemas apstākļiem, kad kontrolēta siltumsūkņa darbība efektīvi stabilizē iekštelpu temperatūru bez pārmērīga elektroenerģijas patēriņa.



3.12. att. Aprēķināto ECPI vērtību salīdzinājums saules fasādei un references tehnoloģijai.

ECPI analīze arī parāda, ka visstabilāk labvēlīgā izstrādātās tehnoloģijas veiktspēja tiek sasniegta Pasīvs (dienā)–aktīvs (nakts) režīmā pārejas sezonās. Šādos starpsezonas apstākļos nakts aktivizācija palīdz stabilizēt termisko režīmu un nodrošina telpas priekšapsildi, savukārt dienas pasīvā darbība ļauj efektīvi izmantot saules ieguvumus un uzkrāto siltumenerģiju. Savukārt karstos un saulainos vasaras apstākļos visaugstākās ECPI vērtības tiek sasniegtas Pasīvs (nakts)–aktīvs (dienā) režīmā. Šajā gadījumā dienas aktīvā kontrole samazina

pārkaršanas risku, savukārt pasīvā darbība naktī izmanto samazināto dzesēšanas nepieciešamību un dabisko temperatūras pazemināšanos.

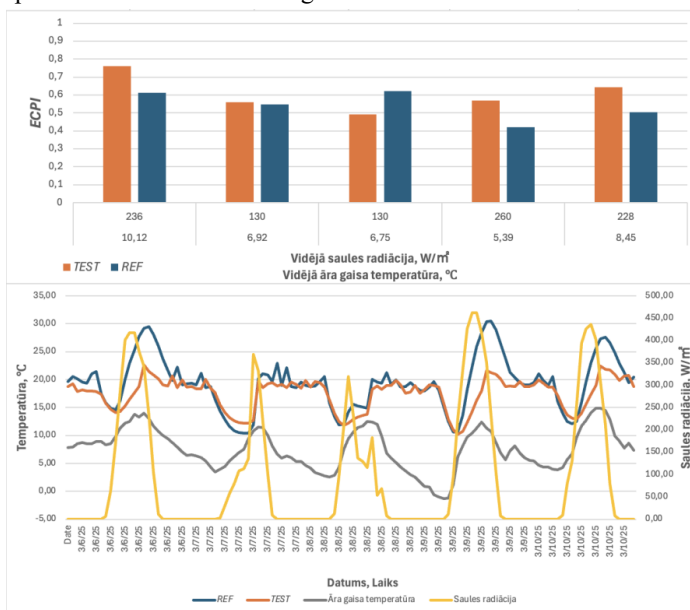
Pēc veiksmīgāko režīmu identificēšanas no vienas dienas *ECPI* analīzes tika detalizētāk aplūkoti piecu dienu periodi, kas jau daudz labāk un precīzāk raksturo darbības režīmus. Atlasītie piecu dienu periodi, kas atbilst identificētajiem optimālajiem režīmiem, apkopoti 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Piecu dienu periodi detalizētam *ECPI* aprēķinam

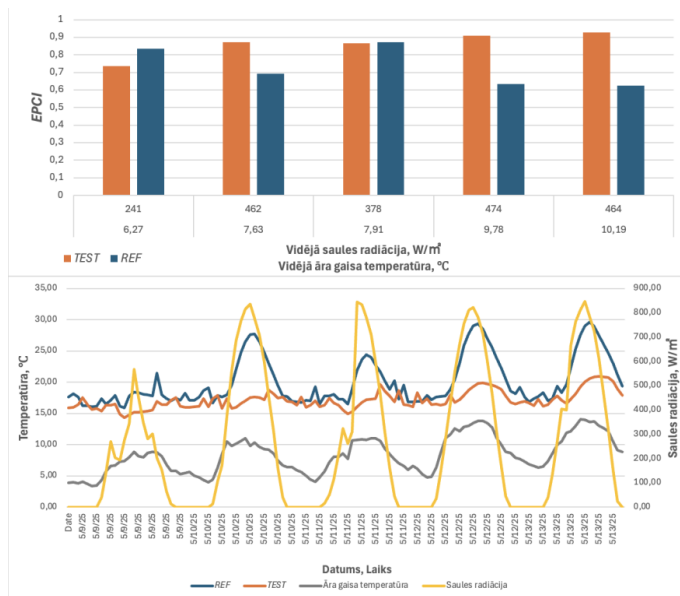
Darbības režīms	Sezona	Datums
Pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī)	Pavasaris/rudens (vēss)	6–10/03/2025
Pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī)	Pavasaris/rudens (silts)	9–13/05/2025
Pasīvs (naktī)–aktīvs (dienā)	Vasara (karsta)	9–13/09/2024
Pasīvs	Vasara (silta)	3–7/07/2024
Aktīvs	Ziema (vidēja)	15–19/02/2023

3.13.–3.17. attēlā redzamas aprēķinātās *ECPI* vērtības atlasītajiem piecu dienu periodiem, kas raksturo iepriekš identificētos veiksmīgākos darbības režīmus.



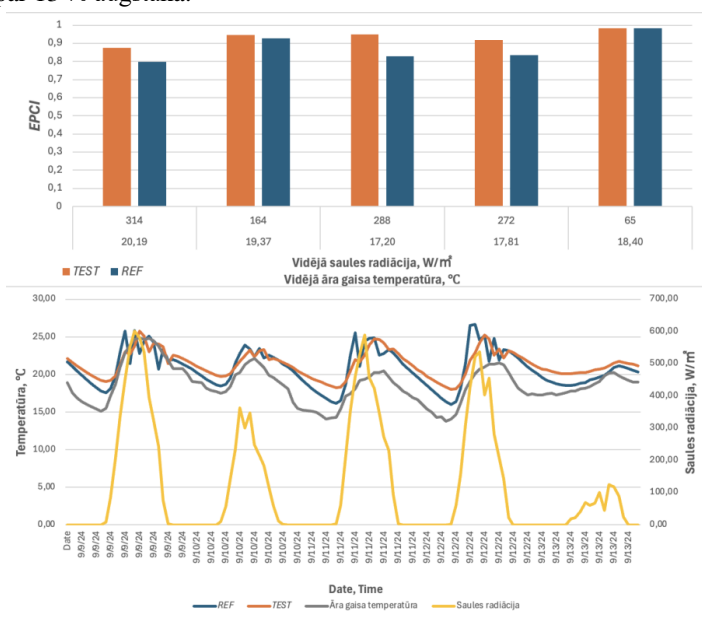
3.13. att. Aprēķināto *ECPI* vērtību salīdzinājums piecu dienu periodā 06–10/03/2025.

Šajā novērotajā piecu dienu periodā (vēsa starpsezona) redzams, ka tikai trešajā dienā izstrādātās tehnoloģijas efektivitāte ir zemāka nekā references tehnoloģijai (3.13. att.). Šajā dienā novērota arī zemākā vidējā āra gaisa temperatūra un saules starojuma intensitāte. Kopējā vidējā efektivitāte visā periodā izstrādātajai tehnoloģijai ir par 6 % augstāka.

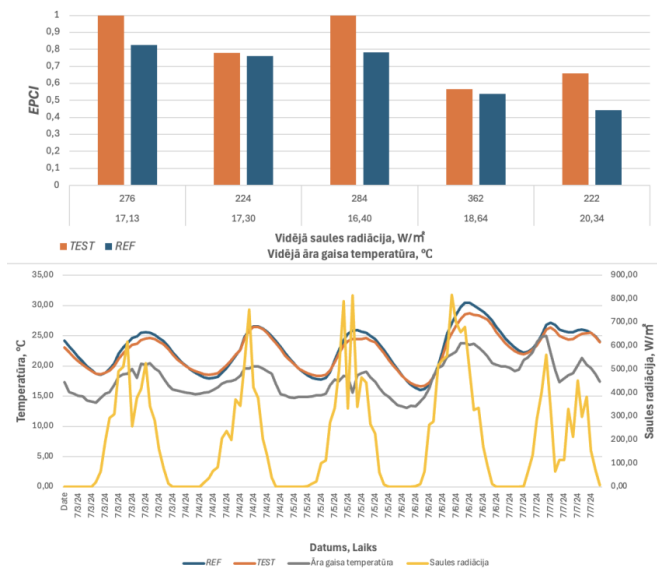


3.14. att. Aprēķināto ECPI vērtību salīdzinājums piecu dienu periodā 09–13/05/2025.

Siltā pārejas sezonas periodā (3.14. att.) novērojama līdzīga tendence – zemākā vidējā āra gaisa temperatūrā un zemākā saules starojuma intensitātes gadījumā izstrādātās tehnoloģijas ECPI vērtība ir zemāka (1. un 3. dienā). Salīdzinot vidējo ECPI vērtību visā periodā, saules fasādei tā ir par 13 % augstāka.



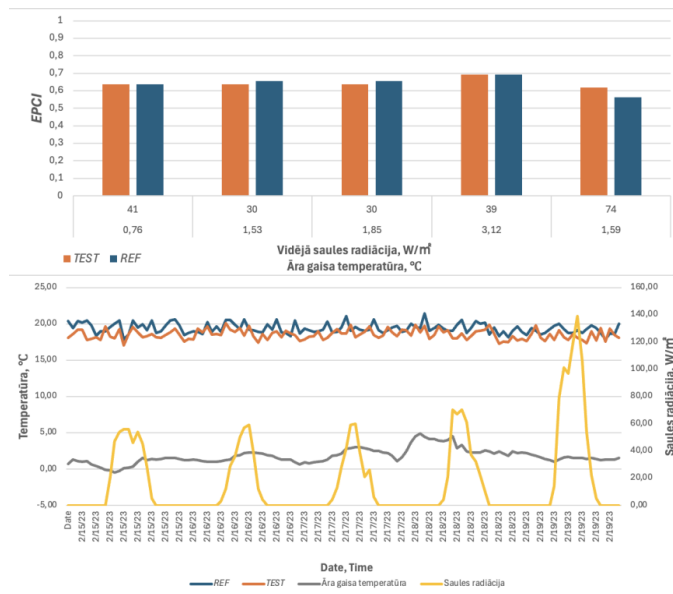
3.15. att. Aprēķināto ECPI vērtību salīdzinājums piecu dienu periodā 09–13/09/2024.



3.16. att. Aprēķināto *ECPI* vērtību salīdzinājums piecu dienu periodā 03–07/07/2024.

Karstajā vasaras periodā pasīvs (naktī)–aktīvs (dienā) režīmā (3.15. att.) abas tehnoloģijas uzrāda augstas *ECPI* vērtības (ne zemākas par 0,8), turklāt saules fasādes veiktspēja visās dienās ir nedaudz augstāka vai vienāda ar referenes tehnoloģiju. Vidējā *ECPI* vērtība visā periodā ir par 6 % augstāka saules fasādei.

Siltos vasaras apstākļos (3.16. att.), kad eksperimentālais stends darbojās pilnībā pasīvā režīmā, saules fasāde visās dienās uzrāda augstāku *ECPI* vērtību nekā referenes stends, sasniedzot maksimālo vērtību divās dienās (1. un 3. dienā). Kopumā *ECPI* vērtība šajā periodā izstrādātajai tehnoloģijai ir par 13 % augstāka.



3.17. att. Aprēķināto *ECPI* vērtību salīdzinājums piecu dienu periodā 15–19/02/2023.

Piecu ziemas dienu periodā (15–19/02/2023) abi stendi tika testēti aktīvajā režīmā (3.17. att.). Abas tehnoloģijas uzrāda ļoti līdzīgas *ECPI* vērtības, kas kopumā nodrošina līdzvērtīgu energoefektivitātes bilanci. Var novērot, cik jutīgas abas sistēmas ir pret temperatūras svārstībām, kas tieši ietekmē efektivitāti visā periodā. Pēdējā dienā, kad novērota nedaudz augstāka saules starojuma intensitāte, saules fasāde uzrāda augstāku *ECPI* vērtību.

3.7.5. Secinājumi par iegūtajiem rezultātiem (E7 – TEST A/P/H)

Divu gadu laikā tika veikts plašs eksperimentu klāsts dažādos gadalaikos un laikapstākļos, lai novērtētu dažādu darbības režīmu efektivitāti un FPM integrācijas ietekmi uz termisko veiktspēju un energoefektivitāti. Viens no galvenajiem pētījuma secinājumiem ir tas, ka dinamiskās fasādes sistēmas efektivitāte lielā mērā ir atkarīga no izvēlēta vadības režīma un dominējošajiem laikapstākļiem. Tika analizēti trīs galvenie režīmi: pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī), aktīvs (24/7) un pilnībā pasīvs. Katrs no šiem režīmiem dažādos gadalaikos uzrādīja atšķirīgas priekšrocības un ierobežojumus.

Pasīvs (dienā)aktīvs (naktī) režīms izrādījās vislīdzsvarotākais un energoefektīvākais risinājums, īpaši pavasara un rudens mēnešos. Šajos pārejas sezonu periodos dienas laikā ir mērena saules starojuma intensitāte, bet naktīs – zemākas temperatūras, kas rada apstākļus, kuros FPM var efektīvi piedzīvot fāžu pāreju. Saulainās dienās FPM absorbēja lieko saules siltumu, novēršot testēšanas stenda pārkaršanu, un aukstākajās naktīs, kad siltumsūkņi tika atkārtoti aktivizēti, atdeva uzkrāto siltumu. Tas daudzajos gadījumos uzlaboja iekštelpu temperatūras stabilitāti un samazināja enerģijas patēriņu. Arī mākoņainās pavasara un rudens dienās bija novērojamas šī režīma priekšrocības, lai gan mazāk izteikti. FPM dažkārt sasniedza

sacietēšanas punktu un izdalīja siltumu, nodrošinot ierobežotu termisko atbalstu. Jāatzīmē, ka šādos apstākļos testēšanas stenda enerģijas patēriņš bieži bija nedaudz zemāks nekā references stendam, kas norāda, ka pat pie samazināta saules starojuma FPM nodrošina noteiktu termisko buferzonu.

Pretēji tam aktīvais režīms, kurā siltumsūkņi darbojās nepārtraukti, lai uzturētu noteikto iekštelpu temperatūru, parādīja mazāk izteiktas atšķirības starp testēšanas un references stendiem. Daudzos gadījumos abos stendos tika uzturēta līdzīga iekštelpu temperatūra ar gandrīz identisku enerģijas patēriņu. Tomēr karstās un saulainās vasaras dienās FPM testēšanas stends absorbēja ne tikai saules starojumu, bet arī siltumu no iekšējām, ko radīja siltumsūkņi, īpaši gadījumos, kad tas atradās pilnībā izkusušā stāvoklī. Tas radīja situāciju, kurā siltumsūkņi faktiski izkļiedēja to pašu siltumu, ko FPM absorbēja, veidojot enerģijas cirkulācijas ciklu, kas samazināja sistēmas efektivitāti. Šie rezultāti uzsvēr nepieciešamību optimizēt vadības algoritmu, lai noteiktu, kad FPM jāļauj absorbēt siltumu un kad tas jāizolē, lai novērstu nevajadzīgu uzlādi aktīvās dzesēšanas laikā.

Pilnībā pasīvais režīms bija visefektīvākais saulainās vasaras dienās, īpaši pārkaršanas novēršanai telpās. Vairākos testos references stendā iekštelpu temperatūra pārsniedza 40 °C, savukārt testēšanas stendā, ko aizsargāja FPM, temperatūra saglabājās ievērojami zemāka, bieži nepārsniedzot 36 °C. FPM šajā gadījumā darbojās kā efektīva termiskā barjera, absorbējot lieko siltumu un stabilizējot iekštelpu klimatu. Tomēr jāatzīmē, ka FPM bieži visu dienu un nakti saglabājās virs kušanas temperatūras, darbojoties galvenokārt jutīgā siltuma diapazonā, nevis pilnīgas fāžu pārejas režīmā. Tādēļ sistēmas siltuma uzkrāšanas potenciāls bija ierobežots, lai gan komforta apstākļi tika uzlaboti.

Ziemas periodā FPM integrācijas priekšrocības bija ierobežotākas. Pastāvīgi zemās saules starojuma intensitātes un zemās āra temperatūras dēļ FPM bieži nesasniedza kušanas punktu. Gan testēšanas, gan references stendā bija nepieciešama aktīva apsilde, lai uzturētu komforta apstākļus, un dažos gadījumos testēšanas kabīne patērēja nedaudz vairāk enerģijas papildu termiskās masas un lēnākas temperatūras reakcijas dēļ, kas saistīta ar FPM. Tomēr atsevišķās saulainās ziemas dienās FPM varēja nelielā mērā veicināt termisko stabilitāti, dienā uzkrājot ierobežotus saules siltuma ieguvumus un naktī atdodot daļu siltuma, lai gan kopējais enerģijas ietaupījums bija neliels.

2023. un 2024. gadā iegūtie sezonālie enerģijas patēriņa dati apstiprina šos novērojumus. Abos gados testēšanas un references stendu patēriņa raksturs mainījās atkarībā no laikapstākļiem un darbības režīma, taču vairākos būtiskos periodos, īpaši pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī) režīmā pavasarī un rudenī, testēšanas stends uzrādīja vienādu vai nedaudz zemāku enerģijas patēriņu. Savukārt vasarā pilnībā aktīvā režīmā testēšanas stends dažkārt patērēja vairāk enerģijas, īpaši gadījumos, kad FPM darbojās kā konkurējošs siltuma absorbētājs dzesēšanas procesā.

Aprēķinātās U vērtības, kas iegūtas tikai periodos bez saules starojuma, sniedz skaidru priekšstatu par FPM integrētā saules fasādes moduļa patieso siltumvadītspēju. Kad FPM bija pilnībā cietā stāvoklī un nenotika saules uzlāde, modulim tika novērotas ļoti zemas siltuma caurlaidības vērtības – 0,09–0,25 W/m²K vēlā rudens un ziemas vidus dienās (23/10, 25/10, 29/10 un 07/02). Tas demonstrē siltumizolācijas īpašības, kas būtiski pārsniedz references

trīskāršā stikla loga ($U = 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$) veiktspēju. Pat agrā pavasarī (17/03 un 19/03), kad moduļa U vērtība pieauga līdz $0,50\text{--}0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$, fasāde joprojām nodrošināja 30–50 % zemāku siltuma caurlaidību nekā references logs.

Papildu ieskatu sniedz trīs analizētie vasaras gadījumi – 27/08/2023, 25/07/2025 un 26/07/2025 –, kuros FPM visu diennakti saglabājās šķidrā stāvoklī. Bez saules starojuma modulim tika novērota mērena siltuma caurlaidība ($U \approx 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$) 27/08/2023, kas atbilst šķidrā FPM augstākai siltumvadītspējai. Savukārt 2025. gada jūlijā tika iegūtas $U \approx 0,34\text{--}0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$ vērtības, kas atbilst fasādes uzvedībai pilnībā šķidrā stāvoklī. Šie rezultāti apstiprina, ka pat šķidrā stāvoklī FPM fasāde nodrošina labāku siltumizolāciju nekā references logs, lai gan efektīvā siltumpretestība samazinās, salīdzinot ar cietā stāvokļa ziemas apstākļiem.

Papildus fizisko lielumu analīzei nozīmīgu daudzdimensionālu novērtējumu nodrošina *ECPI* vērtības aprēķins. *ECPI* integrē divas vienlīdz svarīgas komponentes – termiskā komforta nodrošinājumu (laiku, kad iekštelpu temperatūra ir $15\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$ diapazonā) un normalizētu siltumsūkņa elektroenerģijas patēriņu. *ECPI* rezultāti kvantitatīvi apstiprina eksperimentālajā analīzē novēroto režīmu atkarīgo sistēmas darbību.

Nepārtraukta pilnībā pasīva vai pilnībā aktīva darbība parasti nodrošina zemākus kopējos veiktspējas rādītājus. Vislabākās un stabilākās *ECPI* vērtības tiek sasniegtas hibrīdos režīmos, kas pielāgoti sezonālajiem apstākļiem. Pārejas sezonās optimāla ir pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī) stratēģija, kas ļauj dienā efektīvi izmantot saules siltumu un naktī stabilizēt temperatūru. Karstos vasaras apstākļos optimālais režīms mainās uz pasīvs (naktī)–aktīvs (dienā) režīmu, kur dienas dzesēšana novērš pārkaršanu, bet naktī pasīvā darbība izmanto dabisko temperatūras samazināšanos. Šī sezonālā optimālā vadības režīma maiņa ir viena no pētījuma nozīmīgākajām zinātniskajām atziņām.

Piecu dienu *ECPI* analīze papildus apstiprina šos secinājumus. Vēsā pārejas sezonā saules fasāde sasniedza vidēji par 6 % augstāku *ECPI* nekā references sistēma. Siltā pārejas sezonā šī priekšrocība pieauga līdz 13 %. Karstajā vasaras periodā hibrīdajā režīmā abas sistēmas uzrādīja augstu veiktspēju ($ECPI > 0,8$), tomēr saules fasāde saglabāja aptuveni 6 % priekšrocību. Pilnībā pasīvā siltā vasaras režīmā saules fasāde sasniedza par 13 % augstāku *ECPI*. Savukārt ziemā aktīvajā režīmā abu sistēmu veiktspēja bija gandrīz identiska, kas atspoguļo ierobežoto FPM ieguldījumu apstākļos ar zemu saules starojumu.

Kopumā šie rezultāti parāda, ka izstrādātā adaptīvā saules fasāde ne tikai samazina enerģijas patēriņu vai uzlabo komfortu atsevišķi, bet uzlabo līdzsvaru starp enerģijas patēriņu un termisko stabilitāti, ja tā tiek ekspluatēta, izmantojot sezonāli optimizētas vadības stratēģijas. Sistēma darbojas kā ļoti efektīvs pasīvs siltumizolācijas elements aukstos apstākļos, nodrošina adaptīvu saules enerģijas buferzonu pārejas sezonās un būtiski samazina pārkaršanas risku vasarā. Tomēr tās pilns potenciāls tiek sasniegts tikai tad, ja darbības režīms tiek dinamiski pielāgots klimatiskajiem apstākļiem.

SECINĀJUMI

Promocijas darba galvenais mērķis bija izstrādāt inovatīvu adaptīvu fasādes sistēmu ar integrētu siltumenerģijas uzkrāšanu, izmantojot FPM, un novērtēt tās efektivitāti ēkas energoefektivitātes uzlabošanā gan kontrolētos laboratorijas apstākļos, gan reālos āra apstākļos.

Pētījumu motivēja steidzamā nepieciešamība uzlabot Eiropas ēku fonda energoefektivitāti atbilstoši Eiropas Zaļajam kursam, *EPBD* un *Renovation Wave* stratēģijai. Ēkas joprojām ir viens no lielākajiem galaenerģijas patērētājiem un CO₂ emisiju avotiem Eiropas Savienībā. Tādēļ inovācijas ēkas norobežojošo konstrukciju līmenī ir būtisks priekšnoteikums ilgtermiņa klimatneitralitātes mērķu sasniegšanai. Promocijas darbā šis izaicinājums tiek risināts, apvienojot materiālu līmeņa analīzi, mazizmēra un liela mēroga eksperimentus, kā arī skaitlisko modelēšanu strukturētā metodoloģiskā ietvarā.

Literatūras apskats izveidoja pētījuma zinātnisko, tehnoloģisko un politisko pamatojumu. Tas apstiprināja, ka latentā siltuma siltumenerģijas uzkrāšana (*LHTES*), īpaši izmantojot cietsšķidrums FPM, nodrošina ievērojami lielāku uzkrāšanas blīvumu nekā jutīgā siltuma sistēmas un ļauj nodrošināt enerģijas apmaiņu pie gandrīz nemainīgas temperatūras. Šī īpašība padara FPM īpaši piemērotus integrācijai ēku norobežojošajās konstrukcijās, kur tie var samazināt iekštelņu temperatūras svārstības, mazināt slodzi maksimumus un uzlabot saules enerģijas izmantošanu. Literatūras apskats parādīja arī to, ka, neskatoties uz plašiem laboratorijas pētījumiem, ilgtermiņa pilna mēroga validācija adaptīvām fasādēm ar integrētiem FPM joprojām ir ierobežota. Turklāt tika uzsvērts, ka tikai stacionāra stāvokļa U vērtības mērījumi nav pietiekami, lai raksturotu dinamiskas saules fasādes; tā vietā ir nepieciešama eksperimentāla novērtēšana reālos klimatiskajos apstākļos kopā ar nestacionāru simulāciju. Šīs identificētās nepilnības tieši noteica šajā promocijas darbā izvēlēto eksperimentālo un modelēšanas stratēģiju.

RT21HC un RT28HC FPM īpašību testēšana nodrošināja būtiskus termofizikālos ievaddatus fasādes izstrādei. Atkārtoti aizsargātās karstās plātnes eksperimenti 12 ciklos apstiprināja stabilas un atkārojamas siltumvadītspējas vērtības – 0,255 W/(m·K) RT21HC un 0,30 W/(m·K) RT28HC. Lai gan atsevišķus ciklus ietekmēja nepilnīga robežnosacījumu kontrole, īpaši ierobežota dzesēšanas veiktspēja, kopējā datu kopa demonstrēja pietiekamu konsekvenci, lai to izmantotu skaitliskajā modelēšanā. RT21HC uzrādīja stabilāku termisko uzvedību uzsildes un dzesēšanas ciklos, savukārt RT28HC bija nedaudz jutīgāks pret robežnosacījumiem. Salīdzinot stacionārā un dinamiskā režīma testi tālāk parādīja, ka Ziemeļeiropas klimatiskajos apstākļos RT21HC nodrošina labvēlīgāku ieguldījumu iekštelņu gaisa temperatūrā, lai gan RT28HC dažkārt sasniedza augstākas maksimālās FPM temperatūras. Tas norāda, ka RT21HC efektīvāk izmantoja latentā siltuma uzkrāšanu pārejas klimata apstākļos, savukārt RT28HC uzrādīja izteiktāku jutīgā siltuma reakciju gadījumos, kad pilnīga kušana netika sasniegta.

Validētais S1 skaitliskais modelis veiksmīgi reproducēja eksperimentāli novēroto dominējošo fāžu pārejas dinamiku, īpaši mērenos robežnosacījumos. Laba atbilstība starp simulēto un izmērīto temperatūru apstiprināja izvēlēto materiālu parametru un modelēšanas pieejas fizikālo ticamību. Novirzes ekstremālos uzsildes vai dzesēšanas apstākļos galvenokārt

bija saistītas ar eksperimentālu robežnosacījumu nekonsekvenci, nevis modelēšanas nepilnībām. Šis validētais ietvars ļāva tālāk attīstīt mazizmēra simulācijas modeli (S2) reālos klimatiskajos robežnosacījumos, parādot, ka RT21HC ir piemērotāks risinājums adaptīvas saules fasādes izstrādei aukstākā klimatā.

Mazizmēra laboratorijas un āra eksperimenti parādīja, ka fasādes veiktspēja ir ļoti jutīga pret izolācijas konfigurāciju un optiski termisko mijiedarbību. Regulējamu izolācijas slāņu ieviešana palielināja gan FPM, gan iekštelpu temperatūru visās konfigurācijās, un visizteiktākie uzlabojumi tika novēroti konfigurācijās ar gaisa spraugas slāni. Šādi moduļi izlādes fāzē uzrādīja lēnāku siltuma izkliedi, kas liecina par labāku siltuma saglabāšanu. Novērtējot pilnu uzlādes un izlādes ciklu, konfigurācijas ar gaisa spraugu kopumā uzņēma un atdeva vairāk enerģijas, savukārt vairāk izolētās konfigurācijas demonstrēja lielāku stabilitāti latentā siltuma plato laikā.

Dinamisko komponentu integrācija – atstarojošās lāpstiņas kombinācijā ar aerogela izolāciju un Fresnela lēcu – nodrošināja izmērāmus veiktspējas uzlabojumus. Laboratorijas apstākļos dinamiskā konfigurācija uzlaboja FPM uzlādes ātrumu un pagarināja efektīvās izlādes periodu. Āra validācija apstiprināja, ka dinamiskā lāpstiņu kustība uzlabo vēlā dienas perioda saules enerģijas uztveršanu, īpaši, mainoties saules azimuta leņķim. Sistemātiska fokusa punkta optimizācija parādīja, ka gan konusa diametrs, gan fokusa punkta novietojums būtiski ietekmē siltuma pārnesei efektivitāti. Konfigurācija F1 D4 sasniedza vislabāko līdzsvaroto veiktspēju, nodrošinot maksimālo dienas FPM temperatūru 19,52 °C un vienlaikus saglabājot labvēlīgu cikla beigu siltuma samazinājumu. Šie rezultāti parāda, ka ģeometriskā precizitāte un komponentu sinerģija ir izšķiroši faktori kopējai fasādes efektivitātei.

Divus gadus ilgā lielā mēroga *PASLINK* tipa eksperimentālā testēšana sniedza visaptverošu ieskatu sezonālajā un darbības režīmu atkarīgajā uzvedībā. Rezultāti nepārprotami parāda, ka fasādes veiktspēju būtiski ietekmē izvēlētais darbības režīms un dominējošie klimatiskie apstākļi. Pavasarī un rudenī pasīvs (dienā)–aktīvs (naktī) režīms nodrošināja vislīdzsvarotāko un energoefektīvāko darbību. Šajos apstākļos dienas saules ieguvumi nodrošināja daļēju vai pilnīgu FPM uzlādi, savukārt izlāde naktī atbalstīja iekštelpu termisko stabilitāti un bieži samazināja siltumsūkņa slodzi. Pat daļēji mākoņainos pārejas sezonu periodos tika novērots neliels, bet nozīmīgs termiskās buferzonas efekts.

Vasarā pilnībā pasīvā darbība izrādījās īpaši efektīva pārkaršanas mazināšanā. References stendā iekštelpu temperatūra bieži pārsniedza 40 °C, savukārt testēšanas stendā ar integrētu FPM tā parasti saglabājās zem 36 °C. Lai gan FPM bieži darbojās jutīgā siltuma diapazonā un ne vienmēr īstenoja pilnu fāžu pāreju, tas tomēr darbojās kā efektīvs termiskais buferis. Savukārt pilnībā aktīvajā vasaras režīmā neefektīva darbība parādījās gadījumos, kad FPM absorbēja siltumu, ko dzesēšanas sistēma vienlaikus centās novērst, radot nevēlamu termisko cilpu.

Ziemas rezultāti parādīja ierobežotu FPM aktivizāciju zemās saules starojuma intensitātes un zemo apkārtējās vides temperatūru dēļ. Tomēr fasāde demonstrēja izcilu siltumizolācijas veiktspēju. Apstākļos bez saules starojuma un ar pilnībā cietu FPM modulis sasniedza U vērtības 0,09–0,25 W/m²K vēlā rudens un ziemas periodos, būtiski pārspējot references trīskāršā stikla logu (U = 0,85 W/m²K). Pat agrā pavasarī, kad U vērtības pieauga līdz

0,50–0,60 W/m²K, fasāde joprojām uzturēja par 30–50 % zemāku siltuma caurlaidību nekā references sistēma. Pilnībā šķidrā vasaras stāvoklī U vērtības svārstījās aptuveni 0,29–0,54 W/m²K, saglabājot pārkumu pār references sistēmu. Šie rezultāti apstiprina, ka fasāde nodrošina siltumizolācijas priekšrocības visa gada garumā neatkarīgi no tā, vai notiek fāžu pāreja.

ECPI, kas apvieno termiskā komforta atbilstību un normalizētu siltumsūkņa elektroenerģijas patēriņu, nodrošināja integrētu veiktspējas rādītāju. *ECPI* rezultāti kvantitatīvi apstiprināja eksperimentāli novēroto režīmu uzvedību. Hibrīdās sezonālās stratēģijas konsekventi nodrošināja augstākos veiktspējas rādītājus. Vēsos starpsezonas periodos adaptīvā fasāde sasniedza aptuveni par 6 % augstāku *ECPI* vērtību nekā references sistēma, savukārt siltās starpsezonās priekšrocība pieauga līdz 13 %. Karstā vasarā, darbojoties hibrīdajā režīmā, abas sistēmas sasniedza augstas *ECPI* vērtības (virs 0,8), tomēr adaptīvā fasāde saglabāja par 6 % augstāku vērtību. Pilnībā pasīvā režīmā siltas vasaras apstākļos saules fasāde pārsniedza references logu par 13 %. Ziemas aktīvajā režīmā abu sistēmu veiktspēja bija gandrīz identiska, kas atspoguļo ierobežoto FPM ieguldījumu apstākļos ar zemu saules pieejamību.

Kopumā šie rezultāti parāda, ka adaptīvā saules fasāde ar integrētiem FPM ne vienmēr universāli samazina enerģijas patēriņu visos apstākļos. Drīzāk tā uzlabo līdzsvaru starp enerģijas patēriņu un termisko stabilitāti, ja tiek ekspluatēta sezonāli optimizētos režīmos. Tādējādi promocijas darba hipotēze ir apstiprināta daļēji. FPM integrācija pārlicinoši uzlabo termisko veiktspēju, pārkaršanas mazināšanu un energoefektivitāti piemērotos klimatiskajos un darbības apstākļos. Tomēr tās efektivitāte ir cieši atkarīga no saules pieejamības, vadības stratēģijas un siltumsūkņu darbības koordinācijas.

Pētījums sniedz vairākus būtiskus ieguldījumus. Tas nodrošina ilgtermiņa, pilna mēroga validāciju adaptīvai saules fasādei ar integrētiem FPM izvietotai Ziemeļeiropas apstākļos. Tas izveido daudz mērogu metodoloģisko ietvaru, kas sasaista materiālu raksturošanu, mazizmēra optimizāciju, dinamisko āra testēšanu un veiktspējas indeksa novērtēšanu. Tas demonstrē FPM uzlabotu fasāžu siltumizolācijas pārkumu un identificē režīmam specifiskas optimizācijas stratēģijas.

Noslēgumā promocijas darbs parāda, ka adaptīvas saules fasādes ar integrētiem FPM ir tehniski dzīvotspējīga un zinātniski pamatota pieeja ēkas norobežojošo konstrukciju veiktspējas uzlabošanai. To efektivitāte tiek maksimizēta, izmantojot sezonāli adaptīvas vadības stratēģijas un integrētu sistēmas projektēšanu. Apvienojot siltumenerģijas uzkrāšanu, optisko koncentrēšanu, augstas veiktspējas siltumizolāciju un dinamisku darbību, izstrādātā fasādes koncepcija sniedz nozīmīgu ieguldījumu energoefektīvu un klimatjutīgu ēku tehnoloģiju attīstībā, kas atbilst Eiropas dekarbonizācijas mērķiem.

ATSAUCES

- [1] European Commission, The European Green Deal, European Commission – Press Re 53 (2019) 24. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [2] European Commission, Clean energy for all Europeans, Euroheat and Power 14 (2019) 3. <https://doi.org/10.2833/9937>.
- [3] E. Union, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, 2018.
- [4] EU, Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union 2018 (2018) 82–209.
- [5] M. Lazzaroni, G. Bianchi Porro, Preparation, premedication and surveillance, *Endoscopy* 35 (2003) 103–111. <https://doi.org/10.1055/s-2003-37012>.
- [6] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D’Agostino, P. Zangheri, L. Castellazzi, Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings, *Energy Build.* 225 (2020) 110322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>.
- [7] D. Kumar, M. Alam, P.X.W. Zou, J.G. Sanjayan, R.A. Memon, Comparative analysis of building insulation material properties and performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131 (2020) 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.
- [8] B. Nashaat, A. Waseef, Responsive Kinetic Facades: An Effective Solution for Enhancing Indoor Environmental Quality in Buildings RESPONSIVE KINETIC FACADES: AN EFFECTIVE SOLUTION, (2017) 0–13.
- [9] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union L156 (2018).



Jānis Narbutis dzimis 1987. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu elektroinženierijā (2010), profesionālo maģistra grādu elektrotehnoloģiju datorvadībā (2011) un maģistra grādu vides zinātnē (2021). Kopš 2022. gada ir RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta pētnieks. Studiju laikā piedalījies *Erasmus* apmaiņas programmā Turīnas Politehniskajā universitātē (Itālija). Ir vairāku zinātnisko publikāciju par adaptīvām fasādēm, fāžu pārejas materiāliem un ēku energoefektivitāti autors. Zinātniskās intereses saistītas ar adaptīvām ēku norobežojošām konstrukcijām, siltumenerģijas uzkrāšanu un ilgtspējīgām enerģētikas tehnoloģijām.