



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Toms Mols

KLIMATA ADAPTĪVĀS ĒKU NOROBEŽOJOŠĀS KONSTRUKCIJAS

Promocijas darba kopsavilkums



RTU Izdevniecība
Rīga 2021

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženieru fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Toms Mols

Studiju programmas “Vides inženierija” doktorants

**KLIMATA ADAPTĪVĀS ĒKU NOROBEŽOJOŠĀS
KONSTRUKCIJAS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Mols, T. Klimata adaptīvās ēku norobežojošās konstrukcijas. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 32 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "P-19" 2021. gada 9. aprīļa lēmumu. Protokols Nr. 137.

<https://doi.org/10.7250/9789934226410>
ISBN 978-9934-22-641-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 29. jūnijā plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Ainis Lagzdiņš,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors *Habil. Ph. D. Vytautas Martinaitis*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

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

Toms Mols (paraksts)

Datums:

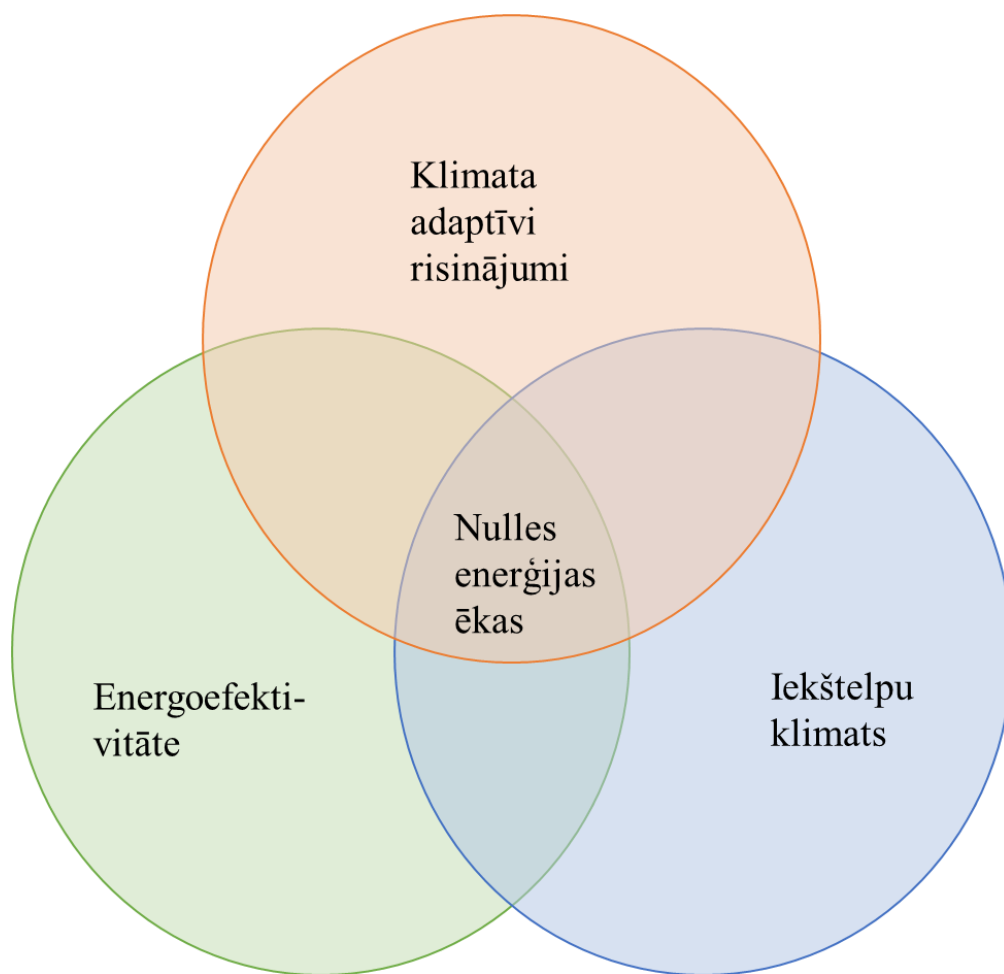
Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 42 attēli, 11 tabulu, 7 pielikumi, kopā 84 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 116 nosaukumu.

SATURS

IEVADS	5
1. METODOLOĢIJA.....	10
1.1. Iekštelpu mikroklimata novērtējums.....	10
1.1.1. Energoefektivitātes pasākumu ietekmes uz iekštelpu mikroklimatu novērtējums Liepājas pašvaldības ēkās	10
1.1.2. Iekštelpu mikroklimata novērtējums renovētās ēkās	10
1.2. Multikritēriju analīze	11
1.3. Eksperiments ar saules sienas moduli.....	12
1.3.1. Eksperimenta plāns ar maza mēroga pasīvo saules sienas moduli ar fāzes maiņas materiālu un Freneļa lēcu.....	12
1.3.2. Eksperimenta plāns. Saules fasādes modulis gandrīz nulle enerģijas ēkai ārējos apstākļos	13
1.3.3. Eksperimenta plāns. Pagarinātais testa periods	15
1.4. Inversā modelēšana	18
2. REZULTĀTI.....	20
2.1. Iekštelpu mikroklimata novērtējuma rezultāti	20
2.1.1. Interviju rezultāti	21
2.2. Multikritēriju analīze par iespējamām Latvijā izmantojamām klimata adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģijām	21
2.3. Eksperimenta rezultāti	22
2.3.1. Eksperimenta rezultāti ar neliela mēroga pasīvo saules sienas moduli ar fāzes maiņas materiālu un Freneļa lēcu.....	22
2.3.2. Siltuma plūsma un FMM uzvedība neliela mēroga saules sienas modulī	23
2.3.2.1. Eksperimenta rezultāti ar maza mēroga pasīvo saules sienas moduli ar fāzes maiņas materiālu – pagarinātais testa periods.....	23
2.4. Inversā modeļa rezultāti	25
SECINĀJUMI.....	27
LITERATŪRAS SARAKSTS	30

IEVADS

Energoefektivitātes prasības būvniecības nozarē kļūst arvien augstākas, tāpēc ir palielinājusies nepieciešamība siltināt un rūpīgi blīvēt ēku norobežojošās konstrukcijas. Uzmanība līdz šim vairāk ir pievērsta nevis labklājībai, bet šaurāku energoefektivitātes mērķu sasniegšanai, tomēr izpratne par iekštelpu klimata ietekmi uz cilvēku labklājību pieaug. Tāpēc ir palielinājusies nepieciešamība pēc instrumentiem un risinājumiem, kas varētu palīdzēt rast līdzsvaru starp šo problēmu risinājumiem.



1. att. Energoefektivitātes un iekštelpu klimata prasību pārklājums ar klimatam pielāgojamo risinājumu tehniskajām iespējām.

Klimatam adaptīvas ēku norobežojošās konstrukcijas (angļu val. – *CABS*; latviešu val. – *KAĒNK*) ir termins ēku konstrukciju izvēlē, kas apraksta fasāžu un jumtu grupu, kas dinamiski mijiedarbojas ar mainīgiem vides apstākļiem. Paredzams, ka šīm konstrukcijām būs nozīmīga loma būvniecības nozarē. Pašlaik koncepcijas izstrādei ir plašs uzlabojumu potenciāls. Šis jēdziens pētniecības jomā ir pazīstams vairāk nekā 30 gadu, taču īpaša uzmanība tam pievērta tikai pēdējā desmitgadē. *KAĒNK* piedāvā iespēju uzlabot ēku energoefektivitāti, iekštelpu mikroklimatu un maksimāli izmantot pieejamo “bezmaksas” enerģiju, kas pozitīvi ietekmē kopējo enerģijas bilanci. Ņemot vērā jaunākos sasniegumus materiālu izstrādē, kā arī dažādu sensoru un vadības ierīču attīstību, šādai pārejai uz

adaptīvām konstrukcijām vai to elementiem praktiski nevajadzētu radīt nekādus tehnoloģiskus šķēršļus, tomēr, kā liecina pašreizējā situācija, novatoriska un unikāla KAĒNK izmantošana ēkās notiek salīdzinoši reti. Zinātniskajā literatūrā ir pieejami dažādi KAĒNK apraksti, no kuriem lielākā daļa ir izpētes stadijā vai tiek izstrādāti laboratoriju līmenī. Salīdzinoši mazāk ir reālo piemēru, kas sasnieguši tirgus līmeni, un lielākā daļa no tiem, par kuriem ir pieejama informācija, tiek veidoti kā individuāli arhitektūras risinājumi, kuriem ir gan praktiska, gan estētiskā vērtība (Loonen, 2010; Wang u. c. 2016).

KAĒNK koncepcijai var būt nozīmīga loma enerģijas pieprasījuma samazināšanā ēkā, nepasliktinot iekštelpu komforta līmeni un mūsdienu dzīvesveida standartus. Turklāt KAĒNK veicina atjaunojamo resursu izmantošanu, tādējādi aizstājot fosilos resursus un attiecīgi samazinot SEG emisijas (Wang u. c. 2016).

Mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izstrādāt metodiku, kā novērtēt klimatam adaptīvu ēku risinājumu lietojumu nulles enerģijas ēkās.

Galvenie uzdevumi mērķa sasniegšanai ir:

- 1) novērtēt iekštelpu mikroklimatu pēc energoefektivitātes pasākumu ieviešanas un tās ietekmi uz cilvēkiem;
- 2) identificēt iespējamās klimatam adaptīvos norobežojošo konstrukciju risinājumus, ko var izmantot Latvijas klimatiskajos apstākļos, un salīdzināt tos, izmantojot multikritēriju analīzes metodi;
- 3) novērtēt neliela mēroga saules sienas moduļa veiktspēju dažādās tehniskās variācijās;
- 4) izstrādāt sistēmas dinamikas modeli, lai novērtētu klimatam pielāgojamo ēku norobežojošo konstrukciju risinājumu veiktspēju, sasniedzot ēkas nulles enerģijas līmeni.

Hipotēze

Klimatam adaptīvi ēku norobežojošo konstrukciju risinājumi palīdz sasniegt nulles enerģijas līmeni ēkā, vienlaikus saglabājot labu iekštelpu mikroklimatu.

Atslēgvārdi

Energoefektivitāte, klimata adaptīvas ēku norobežojošās konstrukcijas, fāzes maiņas materiāli, pasīvā saules siena, nulles enerģijas ēka, inversā modelēšana, sistēmdinamika, iekštelpu mikroklimats, multikritēriju analīze, optimizācija.

Tēmas aktualitāte

Tiek lēsts, ka nekustamā īpašuma nozarē patērētā enerģija veido 40 % no kopējā primārās enerģijas patēriņa visā pasaulē (Energy Agency, 2013). Saskaņā ar Starptautiskās Enerģētikas aģentūras aplēsēm, ja ēku sektorā netiek veikti energoefektivitātes uzlabojumi, enerģijas patēriņš 2050. gadā varētu palielināties par 50 % (OECD, 2013). Normatīvās prasības saistībā ar ietekmi uz vidi kļūst arvien stingrākas, tāpēc ir jārod risinājumi ēku enerģijas patēriņa

samazināšanai. Enerģijas izmaksas pieaug, tikmēr privāto investoru un pašvaldību vidū mikroģenerācija kļūst arvien populārāka.

Cilvēku labklājība telpās ietekmē viņu snieguma kvalitāti, kas rada ekonomisku ietekmi. Ja iekštelpu mikroklimats tiek atstāts novārtā, negatīvā ietekme uz ekonomiskajiem aspektiem var būt daudz ievērojamāka nekā izmaksas, kas nepieciešamas pietiekamas gaisa apmaiņas un temperatūras kontroles nodrošināšanai. Tas jāņem vērā, izstrādājot mehānismus, kas palīdz pieņemt lēmumus par ēkas projektēšanu, būvniecību vai ekspluatāciju.

Materiālu un tehnoloģiju nemitīgas attīstības dēļ tehniskās iespējas ir paplašinājušās un ļauj novērtēt ieguvumus, iekļaujot īpašas klimatam pielāgojamas ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģijas māju un sabiedrisko ēku projektēšanā un būvniecībā. Lai sekmīgi piedāvātu atbilstošus risinājumus tirgū, jāveic atbilstoša analīze un testi, un šis pētījums ir solis ceļā uz šo mērķi.

Pētījuma rezultātu aprobācija

1. Mols, T., Blumberga, A. Inverse modelling of climate adaptive building shells. System dynamics approach. (2020) *Environmental and Climate Technologies*, 24(2), pp. 170–177.
2. Mols, T., Vanaga, R., Blumberga, A. Solar Facade Module for Nearly Zero Energy Building. Extended Test Period (2020) *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), pp. 442–453.
3. Vanaga, R., Blumberga, A., Freimanis, R., Mols, T., Blumberga, D. Solar facade module for nearly zero energy building (2018) *Energy*, 157, pp. 1025–1034.
4. Mols, T., Dzene, K.P., Vanaga, R., Freimanis, R., Blumberga, A. Experimental study of small-scale passive solar wall module with phase change material and Fresnel lens (2018) *Energy Procedia* 147, pp. 467–473.
5. Mols, T., Blumberga, A., Karklina, I. Evaluation of climate adaptive building shells: Multi-criteria analysis (2017) *Energy Procedia*, 128, pp. 292–296.
6. Asere, L., Mols, T., Blumberga, A. Assessment of Indoor Air Quality in Renovated Buildings of Liepāja Municipality (2016) *Energy Procedia*, 91, pp. 907–915.
7. Asere, L., Mols, T., Blumberga, A. Assessment of Energy Efficiency Measures on Indoor Air Quality and Microclimate in Buildings of Liepāja Municipality (2016) *Energy Procedia*, 95, pp. 37–42.

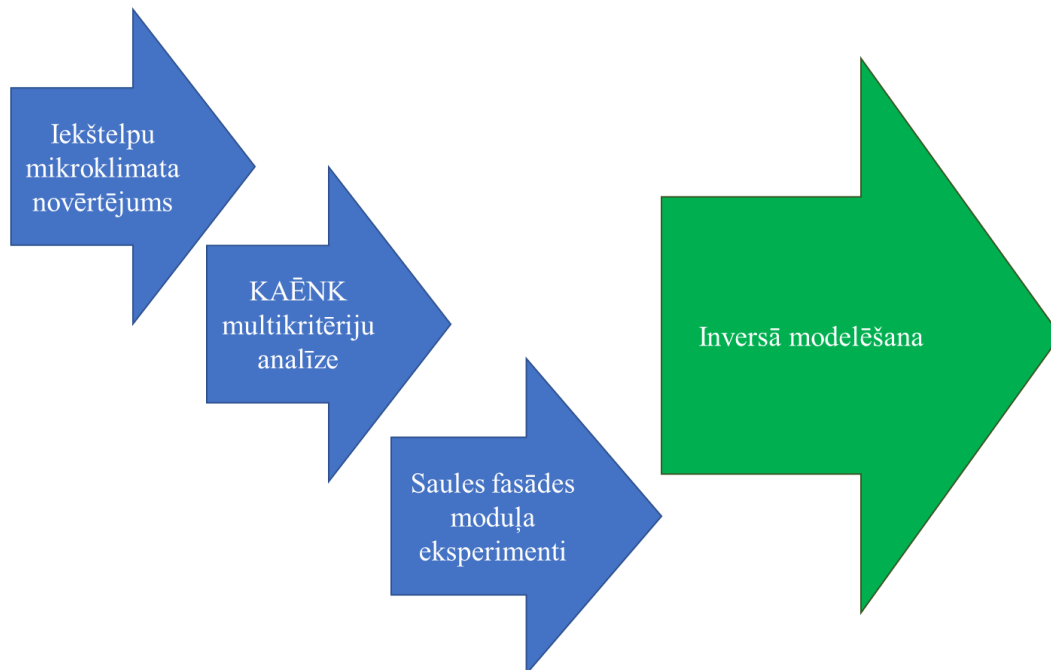
Dalība zinātniskās konferencēs

1. Starptautiskā konference “CONNECT 2020; International scientific conference of Environmental and Climate Technologies” ar ziņojumu “Inverse modelling of climate adaptive building shells. System dynamics approach”, Latvija, Rīga, 2020. gada 13.–15. maijs.
2. Starptautiskā konference “CONNECT 2018; International scientific conference of Environmental and Climate Technologies” ar ziņojumu “Experimental study of small-scale passive solar wall module with phase change material and Fresnel lens”, Latvija, Rīga, 2018. gada 16.–18. maijs.

3. Starptautiska konference “CONNECT 2017; International scientific conference of Environmental and Climate Technologies” ar ziņojumu “Evaluation of climate adaptive building shells: Multi-criteria analysis”, Latvija, Rīga, 2017. gada 10.–12. maijs.

Struktūra

Pētījumā ietilpst iekštelpu gaisa kvalitātes sākotnējā novērtēšana sabiedriskās ēkās, tostarp skolās, pirmsskolas izglītības iestāžu telpās un citās pašvaldības ēkās. Turpinot pētījumu, tiek izmantota multikritēriju analīzes metode, lai novērtētu klimata adaptīvas ēku tehnoloģijas, ko varētu veiksmīgi izmantot Latvijas klimatiskajos apstākļos. Lai novērtētu šādu risinājumu energoefektivitāti, tika testēta un uzlabota viena konkrēta adaptīvā tehnoloģija – neliela mēroga saules sienas modulis. Visbeidzot, izmantojot sistēmadinamikas pieeju, tika izstrādāts inversais modelis, lai novērtētu nepieciešamos norobežojošo konstrukciju parametrus, lai panāktu līdzsvaru starp pieņemamu iekštelpu gaisa kvalitāti, energoefektivitāti un ēku pielāgošanās iespējām mainīgajiem apstākļiem.



2. att. Pētījumā izmantotā metodika.

Zinātniskā nozīme

Veikti mērījumi sabiedriskajās ēkās, un rezultāti ir saistāmi ar iespējamu produktivitātes zudumu, ko var kompensēt ar uzlabotiem iekštelpu apstākļiem. Tāpēc tiek veidots zinātnisks pamatojums, kas uzsver pietiekamas gaisa apmaiņas nepieciešamību sabiedriskajās ēkās, apgalvojot, ka labvēlīgu gaisa apmaiņas apstākļu nodrošināšana būtu ekonomiski pamatota.

Ir veikti jauni neliela mēroga saules sienas moduļu eksperimenti, lai izmērītu moduļa parametrus un novērtētu dažādu konstruktīvo izpildījumu energoefektivitāti. Secinājumi ļauj

turpināt attīstīt tehnoloģiju un rosina pāriet uz nākamo tehnoloģiju veiktspējas novērtēšanas posmu liela mēroga sienas modulī reālos klimatiskos apstākļos.

Pētījumam ir liela zinātniska nozīme, nodrošinot jaunu metodiku, lai novērtētu klimatam adaptīvu ēku norobežojošo konstrukciju risinājumu lietojumu. Pieejamās ēkas energoefektivitātes modelēšanas programmatūras neļāva pilnībā izmantot inverso pieeju aprēķiniem, tāpēc šīs vajadzības nodrošināšanai tika izveidots sistēmadinamikas modelis. Metodika ļauj novērtēt nepieciešamos norobežojošo konstrukciju parametrus, lai sasniegtu vēlamos energoefektivitātes līmeņus, neapdraudot iekštelpu klimata apstākļus.

Praktiskais lietojums

Gaisa kvalitātes un CO₂ koncentrācijas līmeņa mērījumu rezultāti renovētās ēkās, kurās ventilācijas iekārtas darbojas selektīvi vai nedarbojas vispār, ir saistītas ar cilvēku garīgo sniegumu un tā attiecīgo finansiālo ietekmi. Politikas veidotājiem tas ļauj radīt apstākļus ēku apsaimniekotājiem, lai piešķirtu pietiekamu finansējumu iekštelpu gaisa kvalitātes nodrošināšanai. Ēku iedzīvotājiem ir ievērojams pamatojums, kurā balstoties, pieprasīt vides apstākļu uzlabojumus.

Ēkas projektēšana prasa pieņemt lēmumus, kas ietekmēs ēkas energoefektivitāti atlikušajā ekspluatācijas periodā. Pašreizējā pieeja ir aprēķināt nepieciešamo konstrukcijas izolāciju sliktākajam scenārijam un atstāj mazāk vietas adaptīviem mehānismiem.

Izstrādāto metodiku var izmantot arhitekti, projektētāji, nekustamā īpašuma attīstītāji un citi, lai pieņemtu lēmumus par projektēšanas izvēli ar līdzsvarotu un faktisku pamatojumu. Tāpēc pētījumam ir augsts praktiskā lietojuma līmenis, jo tas ļauj profesionāļiem izmantot daudzpusīgāku risinājumu klāstu, tādējādi uzlabojot vispārējo ēkas energoefektivitāti.

1. METODOLOĢIJA

Ir izstrādāti vairāki iekštelpu gaisa kvalitātes novērtējumi ar ilgstošiem mērījumiem, lai noteiktu pašreizējo situāciju. Multikritēriju analīzes metode tiek izmantota, lai novērtētu kopējo klimatam adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju risinājumu lietojumu Latvijas klimatiskajos apstākļos.

Izvēlētās tehnoloģijas, kas tika noteiktas ar multikritēriju analīzes metodi, ir izmantotas, lai izstrādātu sistēmas dinamikas modeli, kas ļauj noteikt energoefektivitātes parametrus, kas jānodrošina, lai sasniegtu vēlamos iekštelpu gaisa parametrus.

1.1. Iekštelpu mikroklimata novērtējums

1.1.1. Energoefektivitātes pasākumu ietekmes uz iekštelpu mikroklimatu novērtējums Liepājas pašvaldības ēkās

Veikts iekštelpu mikroklimata novērtējums piecās Liepājas pašvaldības izglītības iestāžu ēkās un trīs pašvaldības ēkās. Visās izvēlētajās ēkās pēdējos gados ir veikti ievērojami energoefektivitātes uzlabojumi, tostarp ēkas norobežojošo konstrukciju siltināšana, logu maiņa un mehāniskās ventilācijas sistēmu uzstādīšana.

Iekštelpu mikroklimata mērījumi tika veikti apkures sezonā. Katra telpa tika monitorēta vienu nedēļu. Katrā ēkā tika novēroti apstākļi divās telpās.

Gaisa apmaiņas kursa noteikšanai tika izmantota marķiera (*tracer*) gāzes metode. Tika izmantota koncentrācijas samazināšanās metode ar sēra heksafluorīdu (SF₆). Mērījumi tika veikti ar *LumaSense Technologies INNOVA 1303 (Innova AirTech Instruments A/S, 1997)*.

Lai noteiktu gaisa infiltrācijas ātrumu katrā telpā, tika izmantots telpu spiediena (*blower door*) tests. Spiediens telpā tiek palielināts līdz 70 Pa. Mainot ventilatora ātrumu, spiediens pakāpeniski samazināts tika par 5–10 Pa. Gaisa noplūdes koeficientu (*C*) un eksponentu (*n*), kas atspoguļo noplūdes parametrus ēkā, nosaka, mērot spiediena starpību un ventilācijas izvadītā gaisa tilpumu (*Kim, Jo un Jeong, 2013*).

Visi mērījumi tika reģistrēti ik pēc 5 minūtēm un saglabāti ierīces iekšējā atmiņā. *Delta Ohm HD 32.1*. aprīkots ar akumulatoru, kas palīdz darboties, ja ir strāvas traucējumi. Rezultāti attēloti kā gaisa kvalitātes parametru atkarība laikā.

1.1.2. Iekštelpu mikroklimata novērtējums renovētās ēkās

Notika intervijas ar ēkās esošo iestāžu vadītājiem vai atbildīgajām personām, lai iegūtu pārskatu par ēkām. Šajās intervijās tika iegūti dati par ēku veidiem, kopējo platību, energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumiem un ventilācijas sistēmas darbību, kā arī saņemti ēku plāni.

Tika intervētas personas, kas atradās visās telpās, lai uzzinātu viņu subjektīvo viedokli par iekštelpu mikroklimatu konkrētajā brīdī. Cilvēki komentēja savas sajūtas un viedokli un novērtēja savu komforta līmeni no –3 līdz +3. Paredzamā vidējā balss (*PMV*) attiecas uz termisko skalu, kas sākas no auksta (–3) līdz karstam (+3), ko sākotnēji izstrādāja Fangers. Lai veiktu turpmākos aprēķinus, tika fiksēti gaisa parametri konkrētajā brīdī. *PMV* aprēķins

tika veikts, lai būtu iespējams salīdzināt teorētiskos komforta līmeņa parametrus ar cilvēka subjektīvajām izjūtām. Siltuma komforta aprēķins tika veikts, izmantojot programmatūru *Design builder*. Jāatzīmē, ka šie rezultāti tika iegūti, ņemot vērā termiskos apstākļus, kādos cilvēki uzturējušies telpās, un aktivitātes līmeni, savukārt gaisa kvalitāte vai ietekmējošie parametri, piemēram, svaiga gaisa padeve, netika ņemta vērā.

Lai noskaidrotu ietekmi uz cilvēka sniegumu, pamatojoties uz pētītajiem ēku mikroklimate apstākļiem apvienojumā ar garīgo darbu, tika izmantots R. Kosonena produktivitātes zudumu modelis. Lai veiktu ekonomiskā efekta un izmaksu un ieguvumu analīzi, tika izvēlēta ventilācijas produktivitātes metode, jo tā ir piemērojama katrai ēkai un šim modelim nav ierobežojošu parametru. Tas dod iespēju noteikt cilvēka produktivitātes izmaiņu ekonomisko ietekmi. Nepieciešamie dati ekonomiskā efekta un izmaksu un ieguvumu analīzei ir nepieciešamais ieguldījumu apjoms, izdevumi, kas rodas no gaisa apstrādes iekārtas darbības, un relatīvā veiktspējas uzlabošanas procentuālā aprēķinātā vidējā svērtā vērtība.

1.2. Multikritēriju analīze

Multikritēriju analīzes lēmumu pieņemšana tika veidota vairākos posmos.

a. Problēmas definēšana, alternatīvu ģenerēšana un kritēriju definēšana

Plašajā klimatam pielāgojamo ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģiju klāstā, kas atrodams zinātniskajā literatūrā, žurnālos un reālās dzīves piemēros, tika atlasītas Latvijas teritorijā raksturīgajam klimatam piemērotas tehnoloģijas. Netika izvērtētas specifiskās tehnoloģijas siltā klimata zonām, kuras vienkārši nebūtu iespējams pielāgot Latvijas klimatam. Salīdzināšanai izvēlētas septiņas tehnoloģijas.

- Aktīvais logs – izmantojot mikrospoguļus, nodrošina aizsardzību no saules apžilbinājuma un veido ēnojumu.
- Ārējā izolācija – izolācijas slēģi, kas tiek pārvietoti, izmantojot fāžu pārejas materiāla virzuļus.
- Logs ar fāžu pārejas materiālu – logs ar fāžu maiņas materiāla siltuma akumulatoriem.
- “Dzīvās” sienas un jumti – vispārēja ēkas virsmas temperatūras samazināšana, izmantojot noēnošanu un iztvaikošanas dzesēšanu.
- Šķidrā fasāde – ar ūdeni pildītas kameras ar regulējamu tilpumu.
- Jumta baseins – uz jumta izvietots ievērojams ūdens apjoms, kas atkarībā no sezonas silda vai dzesē konstrukciju.
- Ūdens mucu siena – saules siltuma uzkrāšana, lai kontrolētu saules siltuma ieguvumus un zudumus (*Moloney, 2011*).

b. Kritēriju svēršana

Ar energoefektivitātes sektora ekspertu palīdzību tiek veidoti kritēriji un piešķirts to svars, lai būtu iespējams noteikt katra kritērija svaru jeb ietekmi uz kopējo rezultātu.

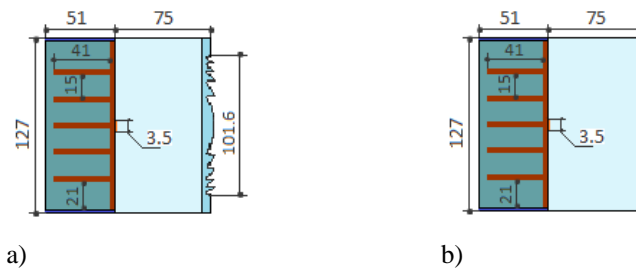
c. Atbilstošas metodes un kritēriju matricas izvēle

Kad kritēriji ir izsvērti, tos iespējams ranžēt matricā ar kritērijiem, to svaru un alternatīvām. Lai iegūtu caurspīdīgu un vienkāršu metodiku atbilstošas klimatadaptīvas tehnoloģijas izvēlei, izmantota vienkāršā summārā svēršanas (*Simple Additive Weighting*) metode. Tā ļauj redzēt, interpretāt un novērtēt katra kritērija un apakškritērija ietekmi katrā posmā (*Kaliszewski un Podkopaev, 2016*).

1.3. Eksperiments ar saules sienas moduli

1.3.1. Eksperimenta plāns ar maza mēroga pasīvo saules sienas moduli ar fāzes maiņas materiālu un Freneļa lēcu

Testa modulis uzkrāj siltumu, izmantojot saules starojumu (*Tawfik, Tonnellier un Sansom, 2018*); tas tiek uztverts un koncentrēts, izmantojot Freneļa lēcu, un koncentrēts uz siltuma pārnese pastiprinātāju – vara plāksni ar izvirzījumiem, kas silda fāzes maiņas materiālu (FMM) un attiecīgi pārnese siltumu telpā. Lai novērtētu Freneļa lēcas ietekmi uz testa moduļa enerģijas bilanci, tās vietā tiek izmantots arī PMMA akrila stikls (1.1. att.). Fāžu maiņas materiāls ir parafīna *RT21 HC* (650 mL) ar īpatnējo siltuma jaudu 2 kJ/(kg K), kušanas temperatūru 20–23 °C, sacietēšanas temperatūru 21–19 °C, latentu kušanas siltumu 190 kJ/kg, siltuma vadītspēju 0,2 W/(m K) un blīvumu ciets/šķidr 0,88/0,77 kg/m³ (*GmbH Rubitherm Technologies, n. d.*). Siltuma pārnese pastiprinātājs ir vara plāksne ar izvirzījumiem, kas iestrādāti FMM. Freneļa lēca ir izgatavota no PMMA (127 mm × 127 mm) ar fokusa punktu 71 mm (*Edmund Optics Inc., n. d.*). Gaisa atstarpe starp vara plāksni un Freneļa lēcu / PMMA akrila stiklu ir 74 mm.



1.1. att. Testa moduļa šķērsgriezums ar: a) Freneļa lēcu; b) PMMA akrila stiklu.

Divas testa kastes ar (1) references sienu un (2) sienu ar testa moduli ievieto klimata kamerā. Katras testa kastes izmērs ir 557 mm × 557 mm × 600 mm. Ārējais apvalks ir izgatavots no 15 mm bieza saplākšņa. Sienu iekšējā daļa ir izgatavota no minerālvates (200 mm līdz 300 mm). Iekšējās telpas izmērs ir 140 mm × 140 mm × 127 mm.

Abu testa kastu priekšējās malas ārējā daļa ir pārklāta ar atstarojošu materiālu. Divas halogēna lampas (katra 500 W) tiek izmantotas kā saules simulators (1.2. att.). Attālums no saules simulatora un testa kastēm ir 1520 mm. Pēc saules simulatora izslēgšanas telpas temperatūra tiek atdzesēta un uzturēta +12 °C ± 1 °C temperatūrā.



1.2. att. Eksperimenta elementu izvietoējums ar saules simulatoru un divām testa kastēm (atskaites siena – labajā pusē, siena ar testa moduli – kreisajā pusē).

1.3.2. Eksperimenta plāns. Saules fasādes modulis gandrīz nulles enerģijas ēkai ārējos apstākļos

Eksperimentā pētījumā 2017. gada septembrī tika novērotas divas testa kastes, kas izvietotas viena otrai blakus ar fasādes moduli un bez tā. Abas testa kastes tika novietotas uz ēkas jumta un pakļautas vienādiem apstākļiem. Testa kastes bija vērstas uz dienvidiem un noēnotas no visām pārejām pusēm (1.3. att.). Abas kastes tika aprīkotas tā, lai uzraudzītu āra klimatu (saules enerģija, vējš, relatīvais mitrums), iekštelpu temperatūru, siltuma pānesi caur konstrukciju un temperatūru fāžu maiņas materiālā. Monitoringa periodā apkopotie dati tika analizēti un izmantoti simulācijas modeļa kalibrēšanai, kas tika izmantots gada un sezonas enerģijas bilances novērtēšanai.



1.3. att. Eksperimentālā testa kaste ar fasādes moduli (pa kreisi) un references kasti bez fasādes moduļa (pa labi).

Eksperimenta plāns

Abas testa kastes ir būvētas no saplākšņa, piepildītas ar 20 cm minerālvilnu, un tām ir telpa (22,7 cm × 12,7 cm × 12,7 cm) kastes centrā. Eksperimentālais saules fasādes modulis references testa lodziņā ir aizstāts ar minerālvati. Eksperimentālais saules fasādes modulis ir veidots no komerciāli pieejamiem materiāliem un sastāv no dažādām daļām. Uz moduļa ārējā apvalka ir uzstādīta Freneļa fokusēšanas lēca (1.4. un 1.5. att.). Fokusa attālums – 7,1 cm, lēcas efektīvais diametrs – 101,6 mm, fokusa punkta virsma – 9,6 mm², caurlaidība – 0,92. Modulis ir izgatavots no PMMA plāksnes (*Edmund Optics Inc.*, n. d.). Fāžu maiņas materiāla siltuma

pārneses uzlabošanai tiek izmantota vara plāksne (113–119 mm) ar vara stieņiem. 15 mm attālumā no plāksnes tiek metināti 25 vara stieņi ar 5 mm diametru. Konuss aerogelu piepildīšanai ir veidots no *DAS* pašcietējošā materiāla. Starp konusu un vara plāksni tiek izmantotas *Cabot* ražotās aerogela granulas *LA1000* ar zemu siltuma vadītspēju un augstu saules enerģijas caurlaidību, lai samazinātu vara plāksnes siltuma zudumus. Parafīna *RT21 HC*, ko ražo *Rubitherm Technologies GmbH*, izmanto kā fāžu maiņas materiālu, kas tiek iepildīts traukā ar iekšējiem izmēriem: platums – 119 mm, augstums – 110 mm, dziļums – 47,5 mm.



1.4. att. Fasādes modulī iestrādāta Freneļa lēca.



1.5. att. Fasādes modulis, kas iebūvēts eksperimentālajā testa kastē. Kopējā aprēķinātā saules fasādes moduļa U vērtība – $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, references sienai – $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Ekspērimēnta norises vietas koordinātes: garums – 2 404 048,700 E, platums – 5 657 003,000 N.

Instrumentācija

Monitoringa aprīkojuma instrumentu shēma ietver iekštelpu temperatūras, āra temperatūras, saules starojuma, FMM temperatūras monitoringu trīs slāņos un siltuma plūsmu uz vara plāksnes ārējās virsmas un FMM konteīnera iekšpusi. Saules plūsmas datus mēra ar piranometru ar precizitāti $\pm 10 \text{ W/m}^2$ vai 5 % no nolāšījuma. Āra un iekštelpu temperatūru mēra ar K tipa termopāriem ar precizitāti $\pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ vai $\pm 4 \%$ no rādījuma no $0 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ un $\pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$ vai $\pm 2 \%$ no rādījumiem no $200 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Siltuma plūsmu mēra ar *Sequoia* siltuma plūsmas plāksnēm. Visi mērījumu dati tiek saglabāti *Campbell Scientific CR1000* datu reģistrētājā. Visi mērījumi tiek fiksēti reizi minūtē.

1.3.3. Ekspērimēnta plāns. Pagarinātais testa periods

Šis FMM moduļa pētījums ir turpinājums pasīvo saules sienu pētījumiem (Mols u. c., 2018; Sirmelis u. c., 2019; Vanaga u. c., 2018). Pēc iepriekš saņemto rezultātu pārskatīšanas tika nolemts:

- izveidot papildu moduļa testa konstruktīvos izpildījumus, izmantojot siltuma apmaiņas pastiprinātājus – smalkas vara stieples, kas iegremdētas fāzes maiņas materiālā;
- novērot moduli ilgāk par divām dienām īpašos āra temperatūras apstākļos;
- mainīt ekspērimēnta apstākļus, palielinot saules simulatora jaudu, tā radot apstākļus, kas ļautu sasniegt augstāku FMM izkušanas pakāpi.

Laboratorijā precīzi kontrolētā vidē tika uzbūvēti un pārbaudīti astoņi maza mēroga pasīvie saules sienas moduļi. Katrs modulis satur divus galvenos elementus – FMM konteīneru ($127 \text{ mm} \times 127 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$), kas papildināts ar siltuma pārnēses pastiprinātājiem un siltuma pārnēses bloku ($127 \text{ mm} \times 127 \text{ mm} \times 71 \text{ mm}$). 1.1. tabulā uzskaitītas konstruktīvās atšķirības starp visiem astoņiem pārbaudītajiem saules sienas moduļiem.

1.1. tabula

Konstruktīvās atšķirības testa iestatījumos

Izpildījums	Konstruktīvie komponenti
Setup 1	Freneļa lēca, konuss un aerogels
Setup 2	PMMA stikls un aerogels
Setup 3	Freneļa lēca un aerogels
Setup 3.1	Freneļa lēca, aerogels, bez smalka metāla pastiprinātāja
Setup 4.	Freneļa lēca un gaiss
Setup 4.1	Freneļa objektīvs, gaisa un smalka metāla pastiprinātājs
Setup 5	PMMA stikls un gaiss
Setup 6	PMMA stikls, konuss un aerogels

Papildus tiek izgatavoti divi saules moduļi: FMM konteiners ar siltuma pārnese pastiprinātāju – smalkas vara stieples (1.6. att.) – apvienojumā ar Freneļa lēcu un aerogelu un PCM konteiners bez siltuma pārnese pastiprinātājiem apvienojumā ar PMMA akrila stiklu un bez izolācijas materiāla.



1.6. att. FMM trauks ar siltuma pārnese pastiprinātāja elementiem – smalkām vara stieplēm.

Šim eksperimentam tiek izmantots fāzes maiņas materiāls *Paraffin RT21 HC (Rubitherm)* ar raksturlielumiem, kas uzskaitīti 1.2. tabulā.

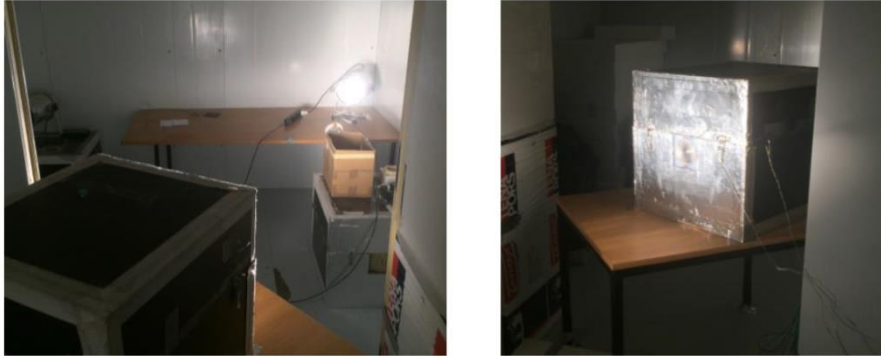
1.2. tabula

Parafīna *RT21 HC* galvenās īpašības (*GmbH Rubitherm Technologies*, n. d.)

Kušanas temperatūra	20–23 °C
Sacietēšanas temperatūra	21–19 °C
Ciets	15 °C
Šķidr	25 °C
Siltuma vadītspēja	0,2 W/(m K)
Siltuma uzglabāšanas ietilpība	190 kJ/kg

Lai simulētu saules starojumu, kas iedarbojas uz sienas moduli, tika izmantota īpaša halogēna spuldze *GE SUPER CP60 EXC VNS 230 V / 1000 W G16d 3200 K* apvienojumā ar dimmeri *UNI BAR Elation professional*. Sildīšanas fāzē sienas moduli tika pakļauti saules starojumam 1000 W/m².

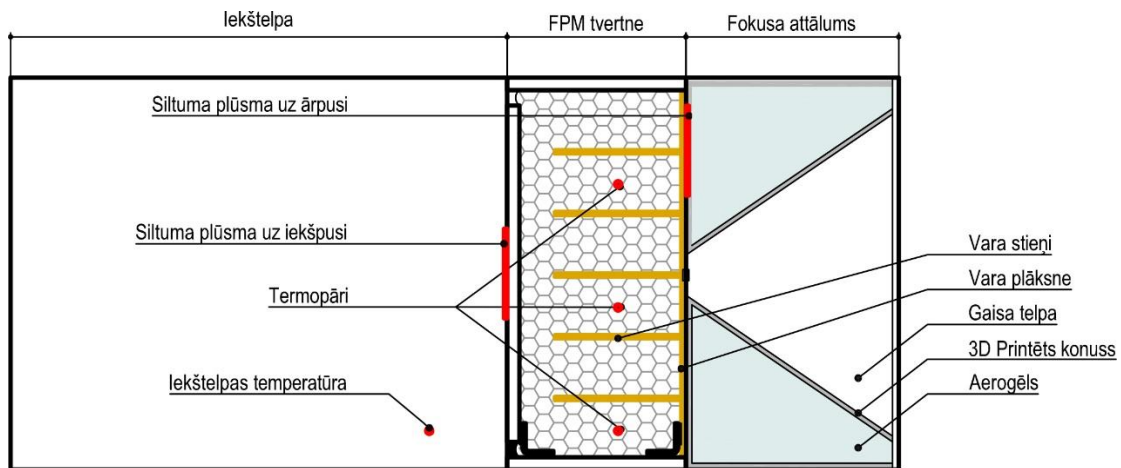
Attālums starp saules starojuma simulācijas lampu un testa kārbu atkārtoti bija 2329 mm (1.7. att.). Eksperiments ilga 48 stundas ar saules starojumu 7 stundas un 39 minūtes (āra temperatūra +15 °C) no testa perioda sākuma. Atlikušajā periodā 40 stundas 21 minūšu laikā temperatūra klimata kamerā tika uzturēta +10 °C.



1.7. attēls. Pagarinātā testa perioda elementu izvietojums.

Monitoringa aprīkojums

Eksperimenta laikā parametri tika reģistrēti, izmantojot daudzfunkcionālu datu reģistrētāju *CR1000* | *Campbell Scientific* kombinācijā ar multipleksoru *AM16/32* | *Campbell Scientific*. Dati tika fiksēti un reģistrēti reizi minūtē. Saules starojums tika mērīts ar piranometru *CMP3* *Kipp & Zonen*. Temperatūras mērīšanai tika izmantoti K tipa termopāri.



1.8. att. Monitoringa aprīkojuma shēma.

Pēc analogijas ar iepriekšējo eksperimentālo pētījumu temperatūras datu apkopošanai eksperimentu laikā tika izmantoti pieci termopāri (1.8. att.). Trīs termopāri atradās FMM traukā tuvu aizmugurējai sienai, lai uzraudzītu uzsilšanas un siltuma sadales procesu dažādos slāņos – apakšējā, vidējā un augšējā. Ceturtais termopāris mērīja iekštelpu temperatūru. Piektais termoelements tika novietots ārpus kastes pie saldēšanas kameras sienas, lai reģistrētu apkārtējās vides temperatūru.

Divi *Sequoia SHF* skaitītāji tika novietoti uz FMM konteinera ārējām un iekšējām sienām, lai monitorētu siltuma plūsmas. Siltuma plūsmas mērītāji sniedza informāciju par siltuma pārnese procesu saules sienas modulī.

1.4. Inversā modelēšana

Sistēmas modelēšanas programmatūra – prasības un ierobežojumi

Šajā pētījumā klimatam pielāgojamas ēku norobežojošās konstrukcijas tiek uztvertas ne tikai kā līdzeklis, kas uzlabo ēkas energoefektivitāti, bet arī uzlabo vai uztur nepieciešamo mikroklimatu, lai ēkas iemītnieki varētu efektīvāk veikt dabus.

Liela daļa ēku modelēšanas rīku ir pakāpeniski attīstījušies, nodrošinot lietotājam arvien jaunas iespējas. Adaptīvo ēku modelēšanai un simulācijai vajadzētu parādīt, kā mainās ēkas struktūra vai ēkas specifiskie parametri. Laikā, kad tikušas izstrādātas ēkas modelēšanas programmatūras, tās netika paredzētas adaptīvu ēku projektu modelēšanai, tāpēc lielākajai daļai pieejamo modelēšanas rīku trūkst plašu iespēju noteikt KAĒNK veiktspēju, jo šajos rīkos būvniecības elementu parametri noteikti kā konstantes (simulācijas laikā paliek nemainīgas), tāpēc tika meklētas vienkāršotas simulācijas pieejas. Daži no visbiežāk izmantotajiem modelēšanas programmatūras rīkiem ir (*ESP-r*, n. d.; Laicane u. c., 2015; *Loonen* u. c., 2010, 2017): *Energy plus*; *TRNSYS*; *ESP-r*.

Prasības un ierobežojumi esošajiem ēkas modelēšanas rīkiem

No visiem apspriestajiem modelēšanas rīkiem visplašākās KAĒNK modelēšanas un simulācijas iespējas kopš tā pirmsākumiem ir nodrošinājis *EnergyPlus*, pakāpeniski attīstoties, lai apmierinātu mūsdienu vajadzības. Ir svarīgi pieminēt, ka tas ir bezmaksas, atvērta koda programmatūras rīks, kas padara to lietotājam pievilcīgāku nekā, piemēram, *TRNSYS* programmatūras rīks. Modelēšanas programmatūras rīku iespējām, kas nākotnē sniegs plašākas iespējas klimata adaptīvu norobežojošo konstrukciju modelēšanai un simulācijai, ir plašs attīstības un uzlabošanas potenciāls (*Harish* un *Kumar*, 2016; *Loonen* u. c., 2014). Tādēļ pieņemts lēmums izmantot sistēmdinamikas pieeju un veidot universālu modeli *Powersim Studio* vidē (*Powersim Studio 8 Academic (8.10.4916.6)*, n. d.).

Inversā modelēšana

Ēku modelēšanas pieejas var iedalīt divās kategorijās: 1) klasiskā (tiešā) modelēšana; 2) reversā (apgrieztā) vai ar datiem pamatotā modelēšana. Tiešajā modelēšanā ievades dati ir ēkas fiksētie parametri, kas var ietvert ēkas atrašanās vietu, vietējos laika apstākļus, ģeometriju, celtniecības materiālus, ekspluatācijas grafiku, apkures ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmas tipu un tam līdzīgi. Tiešo modelēšanu parasti izmanto ēku projektēšanas fāzē. Inversajā modelī kā ievaddatus izmanto ēkas enerģijas patēriņa datus, kas izteikti kā viens vai vairāki mainīgie un empīriskā parametru kopa. Ievades dati tiek izmantoti, lai atrastu parametrus, kas vislabāk atbilst atlasītajam modelim un datu kopai (*Favoino*, *Overend* un *Jin*, 2015; *Kramer*, *van Schijndel* un *Schellen*, 2013).

Enerģijas bilance *Bart de Boer* u. c. pētījumā tiek izteikta kā trīs mainīgo vienādojums: *U* vērtība, gaisa apmaiņas ātrums un saules siltuma pieauguma koeficients, tāpēc nevar atrast vienu unikālu risinājumu. Modelējot minimālo stundas enerģijas bilances vērtību (enerģijas bilanci parasti izsaka kā starpību starp siltuma pieaugumu (no saules un cilvēkiem) un siltuma zudumus (caur fasādi un ventilāciju)), saules enerģijas izmantošanas maksimizēšana ir prioritāra, samazinot

siltumu zudumus caur fasādi un ventilāciju – brīžos kad šāds risinājums rada lieku siltumu, vispirms tiek samazināti saules siltuma ieguvumi, un tikai pēc tam tiek palielināta siltuma pārnešana un ventilācija (*Andr, Evgrafov un Patriksson, 2005; Boer u. c., 2011*).

Lielākajai daļai pieejamo modelēšanas rīku trūkst plašu iespēju novērtēt ēku ar adaptīvam konstrukcijām veiktspēju, tāpēc pētnieki meklē veidus, kā labāk izmantot esošos rīkus vai izstrādāt jaunus, kas nav plaši pieejami.

Inversā modelēšana ir cieši saistīta ar optimizāciju. Strādājot ar klimatam adaptīvām ēku norobežojošām konstrukcijām, ir svarīgi izvēlēties pareizās vērtības no daudzām sistēmām.

Optimizācijas programmatūra

Lai arī ir pieejami dažādi optimizācijas rīki, kas nodrošina dažādas funkcijas, vēlme izveidot jaunus optimizācijas rīkus joprojām pastāv. Nepieciešamība pēc universāla bezmaksas optimizācijas rīka, var tikt integrēts ar citiem modelēšanas rīkiem un novērš nepilnības esošajos optimizācijas rīkos, ir bijis galvenais motivācijas faktors Somijas akadēmijas finansētā optimizācijas rīka *Mobo (Multi-Objective Building Optimization)* izveidei (*Palonen, Hamdy un Hasan, 2013*).

Optimizējot ēku, starp ļoti lielo iespējamo kombināciju skaitu ir iespējams atrast mainīgo lielumu optimālās vērtības, kas vienlaikus iekļaujas noteiktajās robežfunkcijās un apmierina mērķa funkcijas. Ēku optimizācijas mērķu piemēri var būt vides aspekti (enerģijas patēriņš, emisiju samazināšana, energoefektivitāte), izmaksas, komforta līmenis utt. Optimālus risinājumus var meklēt katram gadījumam atsevišķi, vienlaikus veicot vairāku mērķu optimizāciju (*Favoino un Overend, 2015; Kasinalis u. c., 2014; Palonen u. c., 2013; Stephan, Bastide un Wurtz, 2011*).

Sistēmas dinamikas modelis klimata adaptīvām ēkām

Modelis ir izveidots vispārējam gadījumam, nedalot noteiktu klimatam pielāgojamu ēkas tehnoloģiju. Konkrētajā lietojumā funkcija, kuras pamatā ir visas aktīvo logu tehnoloģijas, ir spēja mainīt saules siltuma ieguvumu koeficientu (g vērtību). Modelis nosaka, ka saules siltuma ieguvuma koeficients var mainīties noteiktās robežās, taču veids, kā notiek šīs izmaiņas (ārējās, iekšējās žalūzijas, atstarojošās gaismas elementi utt.), modelī netiek atspoguļots.

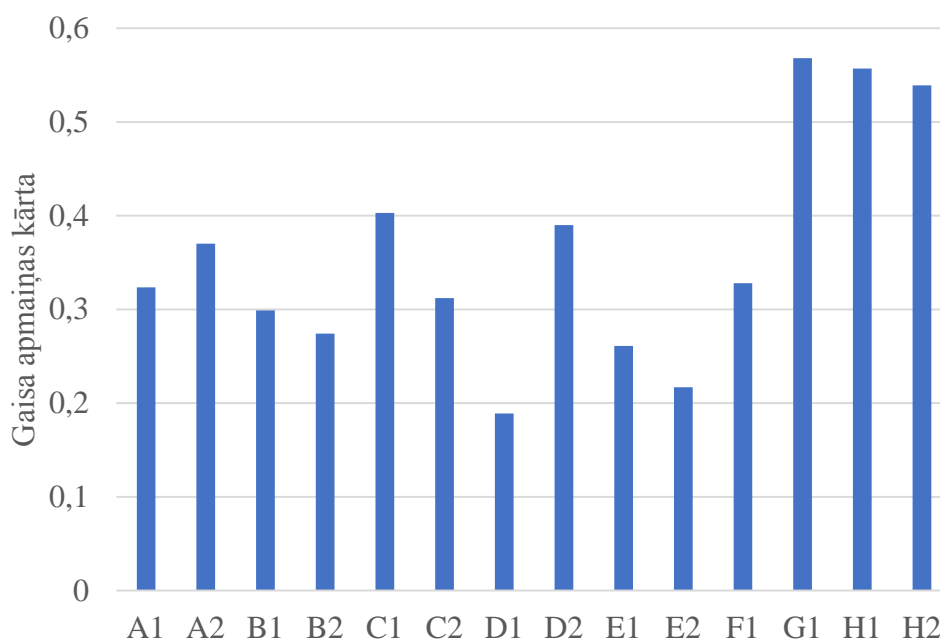
Ēkas enerģijas patēriņu var aprēķināt, nosakot ēkas siltuma jaudu un siltuma zudumus, kas veido ēkas enerģijas bilanci. Šāds process ir pamats jebkuram ēkas energoauditam. Par pamatu aktīvā loga modelim, kas veidots *Powersim Studio* vidē, tiek izmantota ēkas ilgtspējīgas projektēšanas un projektēšanas rokasgrāmatā aprakstītā ēkas atjaunošana: šajā gadījumā ir pieejami visi nepieciešamie ēkas raksturojošie parametri, kas atvieglo modeļa izveidi (*Mumovic un Santamouris, 2009*).

Lai noteiktu piemērotāko saules siltuma ieguvuma koeficientu, tika veikta modeļa optimizācija *Powersim Studio* vidē. Katrai stundai tika aprēķināta atbilstoša siltuma pieauguma koeficienta vērtība, lai enerģijas bilance būtu vienāda ar nulli. Tas tika definēts kā ierobežojums. Šajā modelī enerģijas bilance tika definēta kā mērķa funkcija, savukārt saules siltuma pieauguma koeficients ir mainīgs, svārstoties no 0,06 līdz 0,85.

2. REZULTĀTI

2.1. Iekštelpu mikroklimata novērtējuma rezultāti

Marķiera gāzes testi parāda, ka apskatītajās telpās ir noteiktas gaisa apmaiņas kārtas: no 0,19 līdz 0,40 – izglītības iestādēs un 0,33 līdz 0,57 – citu institūciju ēkās. Tas norāda, ka pēc energoefektivitātes pasākumiem gaisa apmaiņas kārtā šajās telpās ir pārāk zema. Gaisa apmaiņas rezultāti norāda, ka augsts gaisa apmaiņas ātrums ilgtermiņā nav atrasts. Tas raksturo pašreizējo ventilācijas sistēmu, kas darbojas neregulāri vai nedarbojas vispār. Gaisa maiņas kārtas Liepājas pašvaldības ēkās redzamas 2.1. attēlā.



2.1. att. Gaisa maiņas kārtā Liepājas pašvaldības ēkās.

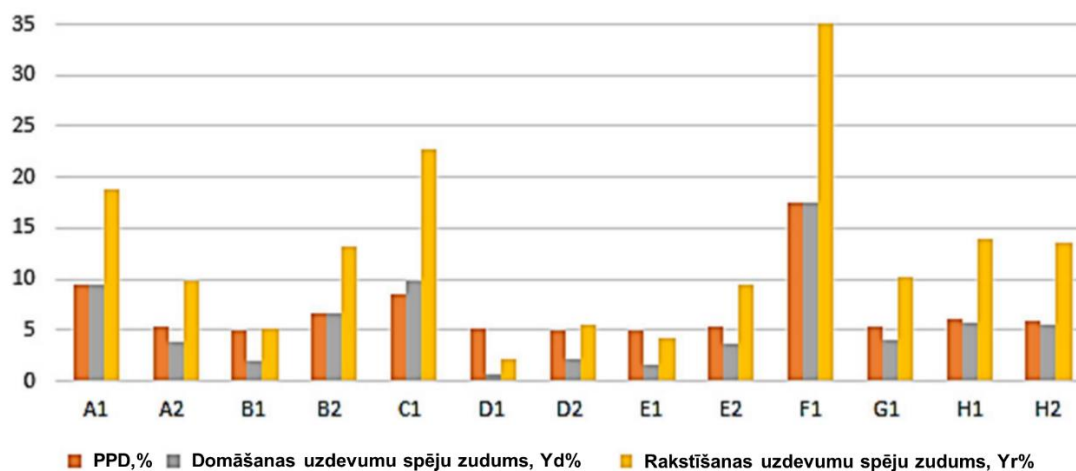
Ņemot vērā cilvēku aktivitātes līmeni, saskaņā ar Ministru kabineta noteikumiem Nr. 359 (Ministru Kabinets, 2009) par darba drošības un veselības aizsardzības prasībām gaisa temperatūrai jābūt no 19 °C līdz 25 °C. Mikroklimata mērījumi lielākajā daļā dienu mērījumu veikšanas laikā neatbilda prasībām.

Temperatūra visās telpās bija neapmierinoša – nepietiekama vai pārāk augsta. Vienā no pētītajām vietām gaisa temperatūra ārpus darba laika bija zemāka par nepieciešamo minimumu un tikai pirmajās darba stundās tā sasniedza zemāko pieļaujamo vērtību 19 °C. Turpretī citas telpas temperatūra bija ļoti augsta, un īslaicīga telpas ventilācija, logu atvēršana nespēja nodrošināt pat īslaicīgu efektu. Pēc ventilācijas gaisa temperatūra pazeminājās, taču pēc tam ātri atguva sākotnējo vērtību. Pamatojoties uz mērījumu rezultātiem, logi telpu vēdināšanai bija atvērti tikai vienu vai divas reizes dienā. Tas liecina par nepareizu ēkas pārvaldību, jo energoefektivitātes pasākumu rezultātā samazinājusies dabiskā gaisa apmaiņa un tā netiek manuāli kompensēta.

2.1.1. Interviju rezultāti

Intervijās ēku pārvaldnieki norādīja, ka ventilācijas sistēma tiek darbināta galvenokārt manuāli. Tas ir subjektīvs novērtējums, un sistēma nedarbojas ar CO₂ sensoriem vai vadības automatiku, kas šķietami palielina uzturēšanas izmaksas. Tas notiek galvenokārt augsto ekspluatācijas izmaksu dēļ, un ziemas periodā ēku apsaimniekotāji cenšas no tā izvairīties. Visām ēkām ir nomainīti logi, daļai no tām ir nosiltināta ēkas fasāde un jumti un uzstādītas mehāniskās ventilācijas sistēmas.

Aprēķinātās *PMV* vērtības pārsvarā ir robežās $-0,5$ un $+0,5$; tomēr gandrīz visas aptaujas parādīja cilvēku subjektīvo vērtējumu no $+0,67$ līdz $+1,86$, kas norāda, ka iekštelpu vide ir silta un neapmierinoša. C2 telpas veiktspējas zuduma skaitliskā vērtība netika aprēķināta, jo šīs telpas *PMV* bija pārāk augsta – $2,86$. Kā redzams 2.2. attēlā, vispiemērotākās telpas darbam ar nelielu fizisku piepūli ir B1, D1 un E1.



2.2. att. Veiktspējas zudumi, pamatojoties uz neapmierinātības procenta vērtību jeb *predicted percentage dissatisfied (PPD)*.

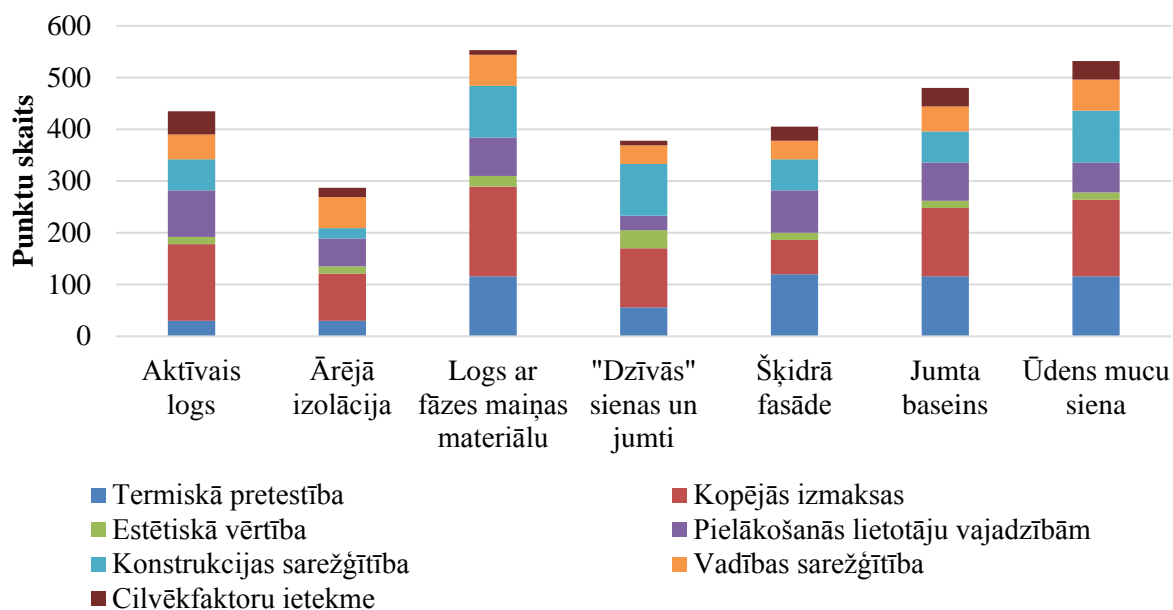
2.2. Multikritēriju analīze par iespējamām Latvijā izmantojamām klimata adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģijām

Svēršanas rezultāti parādīja, ka vislielāko ietekmi rada kopējās dzīvescikla izmaksas un adaptīvo tehnoloģiju būvniecības sarežģītība. Tajā pašā laikā ēkas iemītneka spēja mijiedarboties ar ēkas adaptīvajiem elementiem tiek vērtēta kā daudz mazāk ietekmīga. Relatīvi neliela ietekme lēmumu pieņemšanā ir arī estētiskajai vērtībai.

Alternatīvu ranžēšana

Lai izvēlētos piemērotāko Latvijas teritorijai raksturīgajam klimatam adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju tehnoloģiju, tika apsvērti daudzi faktori. Katra tehnoloģija vai alternatīva tika novērtēta pēc visiem definētajiem kritērijiem un katrai tika piešķirts atbilstošs vērtējums. 2.5. attēlā redzami alternatīvu izvērtējumu rezultāti. Visaugstākais rādītājs ir tehnoloģijai, kurā izmantoti fāzes maiņas materiāli. Rezultāti liecina, ka ir pamats apsvērt arī

saules mucu sienu tehnoloģiju izmantošanu Latvijas klimatiskajos apstākļos (Kancane, Vanaga un Blumberga, 2016).



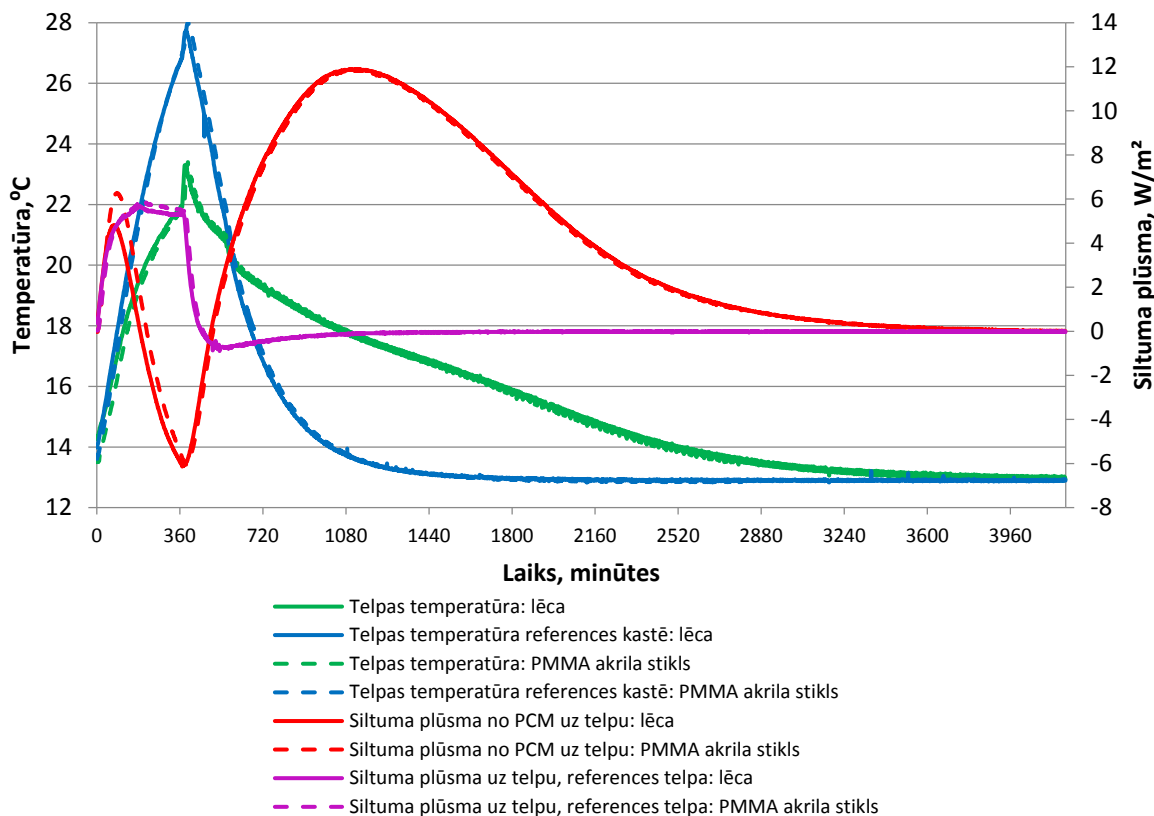
2.3. att. Multikritēriju analīzes rezultāti.

2.3. Eksperimenta rezultāti

2.3.1. Eksperimenta rezultāti ar neliela mēroga pasīvo saules sienas moduli ar fāzes maiņas materiālu un Frenēļa lēcu

Saules starojums sešas stundas tika uzturēts nemainīgs – 560 W/m^2 . Saules simulators tika ieslēgts pirmajā minūtē un izslēgts 360. minūtē. Tika novērotas iekštelpu temperatūras izmaiņas klimata kamerā testa kastes priekšpusē un aizmugurē.

Pēc saules simulatora ieslēgšanas istabas temperatūra sāka pieaugt abās kastēs un sasniedza maksimālās vērtības, kad saules simulators bija izslēgts. 360. minūtē abos lodziņos tika novērotas pēkšņas temperatūras svārstības. Viens no cēloņiem varētu būt gaisa noplūde kastēs, ko radīja klimata kameras dzesēšanas ventilators, kas tika ieslēgts tūlīt pēc saules simulatora izslēgšanas. Temperatūra testa kastē samazinājās daudz straujāk un sasniedza līdzsvaru 1700. minūtē, salīdzinot ar testa moduļa kārbu, kas lēnām atdzisa līdz līdzsvara temperatūrai 3520. minūtē. Testa moduļiem ar lēcu un PMMA akrila stiklu temperatūras modeļi bija līdzīgi.



2.4. att. Temperatūra un siltuma plūsmas atskaites sienā un testa modulī ar lēcu vai PMMA akrila stiklu.

2.3.2. Siltuma plūsma un FMM uzvedība neliela mēroga saules sienas modulī

Siltuma plūsma un temperatūra tika mērīta moduļa iekšpusē un abās pusēs vienu dienu (2017. gada 25. septembris). Pusnaktī, kad FMM sacietē, izdalījās latentais siltums, kas izraisīja siltuma plūsmu gan iekštelpās, gan ārpus tām. Siltuma plūsma temperatūras starpībai no FMM uz ārpusi bija lielāka nekā uz iekštelpām. Saullēktā plkst. 7.05 siltuma plūsma no ārpusē uz FMM mainīja virzienu un plkst. 9.05 kļuva pozitīva. Plkst. 13.30 siltuma plūsma uz istabu sāka krist un pēc tam atkal palielināties. Kad plkst. 13.22 saules starojums samazinājās, samazinājās arī siltuma plūsma uz FMM, līdz plkst. 16.55 tā kļuva negatīva, t. i., siltuma zudumi no moduļa uz āru. Naktī sākas FMM sacietēšana, kad latentais siltums tiek izdalīts aptuveni plkst. 23.40 un palielinās siltuma plūsma gan uz iekštelpām, gan virzienā no tām. Tomēr iekštelpu temperatūra pazeminās, jo siltuma plūsma uz ārpusi dominē pār siltuma plūsmu iekštelpu virzienā.

2.3.2.1. Eksperimenta rezultāti ar maza mēroga pasīvo saules sienas moduli ar fāzes maiņas materiālu – pagarinātais testa periods

Eksperimenta kārtība

Tika monitorēts viens 48 stundu testēšanas cikls, kura laikā FMM tika uzlādēts un izlādēts. Uzlādes fāzes ilgums – 7 stundas un 39 minūtes, pastāvīga saules simulācija –

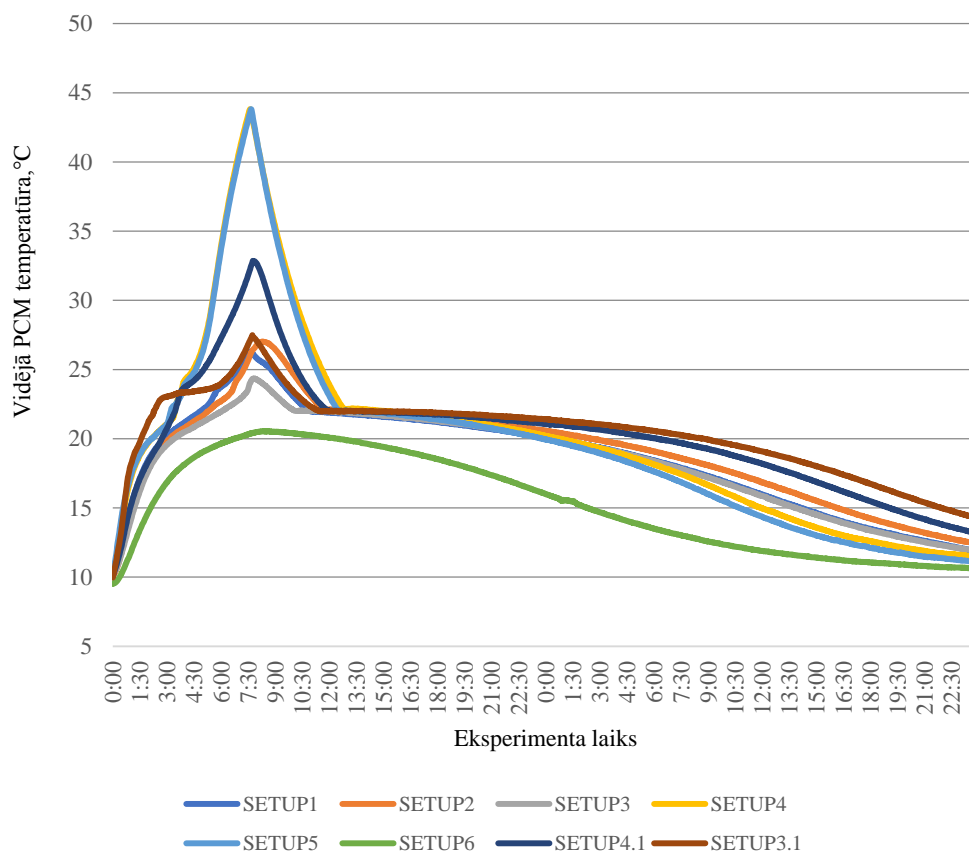
1000 W/m², apkārtējā temperatūra – 15 °C. Izlādes fāzes ilgums, ja apkārtējās vides temperatūra ir 10 °C, bija 41 stundas un 21 minūtes.

FMM silšanas un atdzišanas temperatūra

Tāpat kā iepriekš veiktajos pētījumos (Sirmelis u. c., 2019) FMM sildīšana notika pakāpeniski no FMM tilpuma augšējam līdz apakšējam slānim. Lai analizētu saules sienas moduļa darbību, vidējās temperatūras vērtības tika aprēķinātas no nolasītajiem mērījumiem (2.5. att.).

Vidējā FMM temperatūra sāka strauji pieaugt pēc 3 stundām un 33 minūtēm moduļos ar izpildījumiem “Setup 3.1”, “Setup 4”, “Setup 4.1” un “Setup 5”. Savukārt “Setup 1”, “Setup 2”, “Setup 3” un “Setup 3.1” uzrādīja paātrinātu temperatūras paaugstināšanos tikai pēc 5 stundām un 30 minūtēm, kad vidējā FMM temperatūra bija sasniegusi 23,6 °C un augstāku. Visbeidzot, “Setup 6” pat nesasniedza FMM kušanas temperatūru. Periodi ar strauju temperatūras paaugstināšanos liecina par pāreju uz latentu siltumu.

Saules radiācijas simulators tika izslēgts pēc 7 stundām un 39 minūtēm. Visi moduļi, izņemot “Setup 6”, parādīja temperatūras paaugstināšanās turpināšanos pēc saules starojuma simulācijas pārtraukšanas. Šo impulsu izskaidro FMM slāņi vai frakcijas, kas nav pilnībā izkusušas. Ja viss FMM tilpums ir izkūsis, dzesēšana sākas brīdī, kad tiek pārtraukta saules radiācija.



2.5. att. Vidējā FMM temperatūra dažādos konstruktīvos izpildījumos, °C.

Šī eksperimenta testēšanas un monitoringa periods bija ilgāks nekā iepriekšējie pētījumi (48 nevis 24 stundas), tāpēc var novērot, ka pēc vienas dienas vidējā FMM temperatūra, izņemot “Setup 6” izpildījumu, ir robežās no 19,95 °C līdz 21,42 °C. Šajā brīdī līderis bija “Setup 3.1”, tuvu sekojot moduļiem ar citu tehnisko izpildījumu. Turpinot novērojumus, atšķirība starp līderi un citiem pieauga. Divu dienu perioda beigās vadošā konstrukcija “Setup 3.1” ir 14,23 °C, tai seko “Setup 4.1” ar 13,15 °C, veidojot 1,08 °C atšķirību.

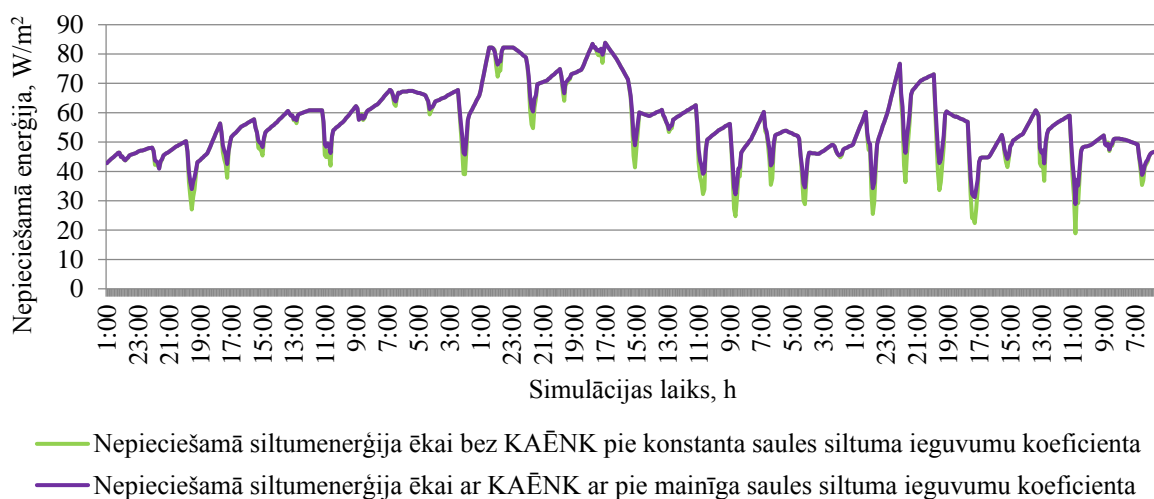
Telpas temperatūra

Tika novērota moduļa iekštelpu temperatūra. Pēc analogijas ar iepriekšējiem pētījumiem iekštelpu temperatūra turpināja paaugstināties un sasniedza maksimālās vērtības pēc saules starojuma simulācijas pārtraukšanas. Šis novērojums liecina, ka siltuma enerģija no FMM tilpuma turpina nodrošināt siltumu iekšējās telpās, kamēr ārējie apstākļi ir mainījušies. Augstāko temperatūru var sasniegt, izmantojot “Setup 4” izpildījumu – tāpat kā ar vidējo FMM temperatūru.

Pārskatot monitoringa rezultātus pēc pirmajām 24 stundām, iekštelpu temperatūras līderis bija “Setup 4” izpildījuma modulis 18,17 °C temperatūrā. Tomēr pēc pilna divu dienu perioda līderi mainījās – “Setup 3.1” ir 12,83 °C, un tam seko citu konstruktīvo variāciju moduļi.

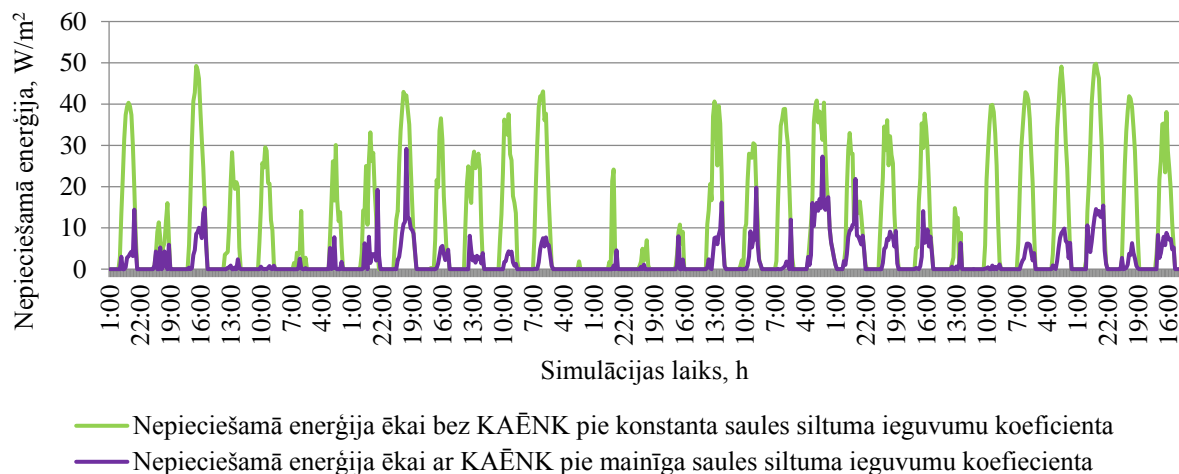
2.4. Inversā modeļa rezultāti

Pēc modeļa simulācijas iegūtais rezultāts redzams 2.10. attēlā (zaļā līnija). Salīdzinot enerģijas patēriņa datus ar āra gaisa temperatūras vērtībām, redzams, ka iegūtie simulācijas dati atbilst gaidāmajam scenārijam – jo vēsāka āra gaisa temperatūra, jo lielāks enerģijas patēriņš. Violetā līnija rāda rezultātu, kas iegūts pēc optimizācijas.



2.6. att. Nepieciešamā enerģija ar KAĒNK un bez tās janvārī.

Ņemot vērā 2.6. attēlā redzamos datus, salīdzinoši zemu saules starojuma vērtību dēļ KAĒNK izmantošana, kas ziemā pielāgojas saules starojuma līmenim, dotu minimālu labumu. Potenciālais siltumenerģijas samazinājums veidotu nedaudz vairāk par 1 %.



2.7. att. Nepieciešamā enerģija ar un bez KAĒNK jūlijā.

Salīdzinot no janvāra līdz jūlijam iegūtos rezultātus, ir skaidrs, ka attiecīgajai tehnoloģijai vislielākie ieguvumi ir dzesēšanas jaudas samazināšanas ziņā (2.7. att.). Līdzīgi atklājumi ir minēti arī *F. Favoino* u. c., *A. Taals* un pētījumos. Vasarā simulācijas rāda minimālu saules enerģijas pieaugumu, savukārt ziemā, gluži pretēji, adaptīvais dizains cenšas maksimāli palielināt saules siltuma priekšrocības, taču enerģijas ietaupīšanas potenciāls ir minimāls. Ziemas mēnešos, kad saules radiācija ir zema, ēkām aukstā klimata joslā jāmeklē cits piemērotāks klimata adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju risinājums (*Favoino* un *Overend*, 2015; *Kramer* u. c., 2013).

SECINĀJUMI

Tālāk tekstā norādīti galvenie aprakstīto pētījumu secinājumi, kā arī rekomendācijas un ieteikumi turpmākajiem pētījumiem.

1. *PMV* vērtības 12 gadījumos no 14 svārstās no $-0,5$ līdz $0,5$, kas nozīmē, ka cilvēki jūtas ērti; tomēr aptaujas parāda subjektīvu vērtējumu no $+0,67$ līdz $+1,86$, kas liecina, ka iekštelpu vide ir silta un neapmierinoša. Oglekļa dioksīda un gaisa apmaiņas mērījumi veikti vienlaikus ar apsekojumiem. Lielākajā daļā ēku CO_2 mērījumi pārsniedz 1000 ppm, un gaisa apmaiņas ātrums ir pārāk mazs. Iespējams, ka sliktā gaisa kvalitāte ietekmēja cilvēka subjektīvo vērtējumu par siltuma komfortu. Pētījuma rezultāti Liepājas pašvaldībā liecina, ka ēkas ir blīvas un siltuma komforts telpās ir neapmierinošs (Asere, Mols un Blumberga, 2016).
2. Multikritēriju analīzes rezultāti liecina par fāžu maiņas materiālu tehnoloģiju, kas piemērota klimatam pielāgoties spējīgām ēku norobežojošām konstrukcijām Latvijas klimatiskajos apstākļos. Par piemērotu turpmākiem pētījumiem tiek ierosināts uzskatīt arī saules mucu sienas tehnoloģiju.
3. Neliela mēroga saules sienas moduļa ar FMM eksperimentu rezultāti atklāj, ka testa moduļi ar Freneļa lēcu un PMMA akrila stiklu uzrāda gandrīz tādus pašus rezultātus, tāpēc šajā tehniskajā risinājumā Freneļa lēcas kā saules koncentratora izmantošana nedod ievērojamus siltuma uzlabojumus.
4. Pētījums pierāda, ka siltuma plūsmu un saules fasādes moduļa siltuma uzkrāšanās procesi mainīgo āra un iekštelpu apstākļu dēļ ir ļoti komplicēti. Eksperimentu rezultāti liecina, ka telpas temperatūras un siltuma dinamiska minerālvates references konstrukcijā ir atšķirīga mērījumiem ar saules fasādes moduli un FMM. Laika nobīde starp saules starojumu un FMM temperatūru ir 3,5 stundas, savukārt starp FMM temperatūru un iekštelpu temperatūru – 45 minūtes. Iekštelpu temperatūras maksimums references kastē tiek atlikts no saules starojuma maksimuma 4 stundas.
5. Pētījuma turpinājums un tālākā pasīvās saules sienas moduļa izpēte ilgākā laika posmā parāda izolētā korpusā iestrādātā fāzes maiņas materiāla ietekmi uz iekštelpu temperatūru apkures sezonā. Eksperimentālais pasīvo saules sienas moduļa pētījums, kas satur FMM, sniedz vairākus secinājumus:
 - a) 48 stundu testēšanas cikls atklāj, ka pēc ilgāka novērošanas perioda tehnoloģiskie līderi un klasifikācija mainās, salīdzinot ar 24 stundu testēšanas cikla rezultātiem;
 - b) pētījums parāda saules moduļa darbību pirmajās 24 stundās līdzīgi iepriekš pārbaudītajiem rezultātiem, tādējādi apstiprinot iepriekšējo pētījumu novērojumus;
 - c) moduļu konstruktīvie izpildījumi, kas ļauj ātri sasniegt stabilu siltuma plūsmu un attiecīgi efektīvāk izkausēt FMM tilpumu, rada problēmu situācijā, kad neizdodas akumulēt visu pieejamo saules starojuma enerģiju. Lai rastu risinājumu, jāveic optimizācija ar FMM materiālu un apjomu. Ideālā gadījumā saules moduļa izpildījums ļautu ātri iegūt saules enerģiju un pēc tam nonākt pašizolētā stāvoklī, kas ļauj maksimāli izstarot siltuma enerģiju telpās;

- d) konstatētas būtiskas iekštelpu temperatūras atšķirības. Moduļi, kas uzlādes posmā var iegūt vairāk saules starojuma, tiek pakļauti lielākiem siltuma zudumiem izlādes fāzē uz ārējo vidi;
 - e) augstākā iekštelpu temperatūra sasniegta ar “Setup 4” un “Setup 5” izpildījumiem. Tomēr šis siltums neefektīvi izkliedējās ārējā vidē. Augstākā iekštelpu temperatūra pēc 48 stundu perioda noteikta, izmantojot iestatījumu “Setup 3.1”, izmantojot Frenēļa lēcu, aerogēla siltinājumu un neizmantojot smalka metāla kušanas paātrinātāju. Šie novērojumi liek secināt, ka jāveic metāla FMM kušanas paātrinātāju lietojuma izvērtējums, veicot testus ar un bez tiem;
 - f) iekštelpu apjoms šajā pētījumā bija salīdzinoši mazs, un lielāki apjomi var ietekmēt FMM moduļu darbību. Turpmākos pētījumos nepieciešams tālāk pētīt mijiedarbību starp mainīgajām enerģijas prasībām un siltumu, ko izstaro FMM modulis.
6. Aprakstītie testi un rezultāti liecina par saules enerģijas moduļu veiktspējas iespējām un uzlabošanas punktiem, un tie var būt noderīgi turpmākā klimata adaptīvas ēkas norobežojošo konstrukciju izpētē un izstrādē.
 7. Turpmākos pasīvos saules sienas moduļu pētījumos ir ieteicams apsvērt:
 - a) iespējas optimizēt pasīvo saules sienas moduļu konstrukciju, izmantojot to, ka FMM tilpuma augšējie slāņi sasilst ātrāk nekā apakšējie slāņi;
 - b) turpinot metāla frakcijas optimizāciju FMM apjomā;
 - c) testēšanas mēroga palielināšanu ar saules sienas moduļa izmantošanu āra vidē reālos laika apstākļos.
 8. Ēku modelēšanas rīkiem ir svarīga nozīme sākotnējās ēkas būvniecības projektēšanas posmā, lai apsvērtu dažādus iespējamus apkures, dzesēšanas vai renovācijas pieeju scenārijus, novērtējot ēkas enerģijas bilanci un enerģijas izmaksas pirms projekta ieviešanas. Vispazīstamākie ēku darbības modelēšanas rīki ir pakļauti vairākiem ierobežojumiem, kas izslēdz precīzu klimata adaptīvas ēkas veiktspējas un ieguvumu precīzu novērtēšanu, tāpēc ir pieprasījums pēc jauniem un efektīviem programmatūras rīkiem, kā arī radošām un novatoriskām pieejām. Tiek meklēts, kā visefektīvāk izmantot pieejamos programmatūras rīkus, lai iegūtu pēc iespējas precīzākus ēku modeļus, kas ietver KAĒNK. Ar šobrīd pieejamiem simulācijas modeļiem un programmrīkiem nevar novērtēt vairāku klimata adaptīvu ēku norobežojošo konstrukciju veiktspēju. *Powersim Studio*, kurā integrējams optimizācijas modulis, ir piemērots modelēšanas rīks, lai noteiktu vai prognozētu KAĒNK veiktspēju. *Powersim Studio*, salīdzinot ar citiem modelēšanas rīkiem, ļauj viegli un pilnvērtīgi saprast ēkas modeli, kas simulācijas laikā maina parametru vērtību.
 9. Optimizācija ir būtiska inversās modelēšanas sastāvdaļa, kas nodrošina labāko iespējamo vērtību no lietotāja definētajiem parametriem, kas raksturo klimatam pielāgojamo ēku norobežojošās konstrukcijas, kas ietekmē ēku energoefektivitāti un iekštelpu komfortu.

10. Pētījumā tika pārskatīts fasādes dizains no energoefektivitātes viedokļa. Projektētājiem un arhitektiem jārod kompromiss starp saules siltuma ieguvumu, piekļuvi dienasgaismai un estētisko vērtību no iedzīvotāju viedokļa.

Hipotēze ir apstiprināta: klimatam adaptīvo ēku norobežojošo konstrukciju risinājumi sniedz būtisku pienesumu nulles enerģijas ēkas līmeņa sasniegšanā, vienlaikus saglabājot labu iekštelpu mikroklimatu.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- Andreasson, N., Anton E. un Patriksson, M. 2005. "An Introduction to Optimization : Foundations and Fundamental Algorithms."
- Asere, L., Mols, T., un Blumberga, A. 2016. "Assessment of Energy Efficiency Measures on Indoor Air Quality un Microclimate in Buildings of Liepaja Municipality." *Energy Procedia* 95:37–42. doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.009.
- Boer, B.J., Ruijg, G.J., Roel Loonen, R., Trcka, M., Hensen, J. un Kornaat, W. 2011. "Climate Adaptive Building Shells for the Future – Optimization with an Inverse Modelling Approach." *European Council for an Energy Efficient Economy Summer Study* 1413–22.
- Edmund Optics Inc. n.d. "Fresnel Lens Specification." Retrieved (<https://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/5.0quot-x-5.0quot-2.8quot-focal-length-fresnel-lens/#downloads>).
- Energy Agency, International. 2013. *Policy Pathway to Secure Our Global Energy Future Modernising Building Energy Codes*.
- ESP-r. n.d. "ESP-r, Multi-Platform Building Energy Software Tool." Retrieved (http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.html).
- Favoino, F. un Overend, M. 2015. "A Simulation Framework for the Evaluation of next Generation Responsive Building Envelope Technologies." Pp. 2602–7 in *Energy Procedia*. Vol. 78. Elsevier Ltd.
- Favoino, F., Overend, M. un Jin, Q. 2015. "The Optimal Thermo-Optical Properties and Energy Saving Potential of Adaptive Glazing Technologies." *Applied Energy* 156:1–15. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.065.
- GmbH Rubitherm Technologies. n.d. "Paraffin RT21 HC Data Sheet." Retrieved (https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT21HC_EN_29062016.PDF).
- Harish, V. S. K. V. un Kumar, A. 2016. "A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56:1272–92.
- Innova AirTech Instruments A/S. 1997. *Thermal Comfort*.
- Kaliszewski, I. un Podkopaev, D. 2016. "Simple Additive Weighting—A Metamodel for Multiple Criteria Decision Analysis Methods." *Expert Systems with Applications* 54:155–61. doi: 10.1016/j.eswa.2016.01.042.
- Kancane, L., Ruta, V. un Blumberga, A. 2016. "Modeling of Building Envelope's Thermal Properties by Applying Phase Change Materials." *Energy Procedia* 95:175–80. doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.041.

- Kasinalis, C., Loonen, R. C. G. M., Cóstola, D., un Hensen, J. L. M.. 2014. "Framework for Assessing the Performance Potential of Seasonally Adaptable Facades Using Multi-Objective Optimization." *Energy and Buildings* 79:106–13. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.045.
- Kim, M. H., Jo, J. H., un Jeong, J. W. 2013. "Feasibility of Building Envelope Air Leakage Measurement Using Combination of Air-Handler and Blower Door." *Energy and Buildings* 62:436–41. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.034.
- Kramer, R., Schijndel, J., un Schellen, H. 2013. "Inverse Modeling of Simplified Hygrothermal Building Models to Predict and Characterize Indoor Climates." *Building and Environment* 68:87–99. doi: 10.1016/j.buildenv.2013.06.001.
- Laicane, I., Blumberga, D., Blumberga, A. un Rošā, M. 2015. "Evaluation of Household Electricity Savings. Analysis of Household Electricity Demand Profile and User Activities." Pp. 285–92 in *Energy Procedia*. Vol. 72. Elsevier Ltd.
- Loonen, R. 2010. "Climate Adaptive Building Shells: What Can We Simulate?"
- Loonen, R. C. G. M., Singaravel, S., Trčka, M., Cóstola, D. un Hensen, J. L. M. 2014. "Simulation-Based Support for Product Development of Innovative Building Envelope Components." *Automation in Construction* 45:86–95. doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.008.
- Loonen, R. G. C. M., Trcka M., Cóstola, D., un Hensen J. L. M.. 2010. "Performance Simulation of Climate Adaptive Building Shells: Smart Energy Glass as a Case Study." *8th International Conference on System Simulation in Buildings* 1–19.
- Loonen, R. C. G. M., Favoino, F., Hensen, J. L. M., un Overend, M. 2017. "Review of Current Status, Requirements and Opportunities for Building Performance Simulation of Adaptive Facades." *Journal of Building Performance Simulation* 10(2):205–23. doi: 10.1080/19401493.2016.1152303.
- Ministru Kabinets. 2009. "MK Noteikumi Nr. 359 Darba Aizsardzības Prasības Darba Vietās, 28.04.2009."
- Moloney, J. 2011. *Designing Kinetics for Architectural Facades*. Routledge.
- Mols, T., Dzene, K. P., Vanaga, R., Freimanis, R. un Blumberga, A. 2018. "Experimental Study of Small-Scale Passive Solar Wall Module with Phase Change Material and Fresnel Lens." Pp. 467–73 in *Energy Procedia*. Vol. 147. Elsevier Ltd.
- Mumovic, D. un Santamouris, M. 2009. *Sustainable Building Design and Engineering : An Integrated Approach to Energy , Health and Operational Performance*. London.
- OECD. 2013. *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*. Vol. 9789264202. Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD).

- Palonen, M., Hamdy, M. un Hasan, A. 2013. "Mobo a New Software for Multi-Objective Building Performance Optimization." *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association* 2567–74.
- Powersim Studio 8 Academic (8.10.4916.6). n.d. *Powersim Studio 8 Help. Building Blocks in Powersim Studio*.
- Sirmelis, R., Vanaga, R., Freimanis, R. un Blumberga, A. 2019. "Solar Facade Module for Nearly Zero Energy Building. Optimization Strategies." *Environmental and Climate Technologies* 23(3):170–81. doi: 10.2478/rtuct-2019-0087.
- Stephan, L., Bastide, A. un Wurtz, E. 2011. "Optimizing Opening Dimensions for Naturally Ventilated Buildings." *Applied Energy* 88(8):2791–2801. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.039.
- Tawfik, M., Tonnellier, X. un Sansom, C. 2018. "Light Source Selection for a Solar Simulator for Thermal Applications: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90:802–13.
- Vanaga, R., Blumberga, A., Freimanis, R., Mols, T. un Blumberga, D. 2018. "Solar Facade Module for Nearly Zero Energy Building." *Energy* 157:1025–34. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.167.
- Wang, T., Seo, S., Liao, P., un Fang, D. 2016. "GHG Emission Reduction Performance of State-of-the-Art Green Buildings: Review of Two Case Studies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56:484–93.