



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Renārs Millers

SIMULĀCIJU MODELIS DZESĒŠANAS PANEĻIEM AR IEBŪVĒTU LATENTO SILTUMENERĢIJAS AKUMULĀCIJAS SISTĒMU

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

Renārs Millers

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija” doktorants

**SIMULĀCIJU MODELIS DZESĒŠANAS
PANEĻIEM AR IEBŪVĒTU LATENTO
SILTUMENERĢIJAS AKUMULĀCIJAS
SISTĒMU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
ARTURS LEŠINSKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Millers, R. Simulāciju modelis dzesēšanas paneļiem ar iebūvētu latentu siltumenerģijas akumulācijas sistēmu. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 46 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-12" 2021. gada 23. februāra lēmumu, protokols Nr. 1/21.

<https://doi.org/10.7250/9789934226274>

ISBN 978-9934-22-627-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 3. septembrī plkst. 15.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 106. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Jurgis Zemītis,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Asociētā profesore *Dr. sc. ing.* Sandra Gusta,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* *Martin Thalfeldt*,
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

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.

Renārs Millers (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, septiņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 47 attēli, 17 tabulas, kopā 105 lappuses. Literatūras sarakstā ir 162 nosaukumi.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	5
1. IEVADS	6
1.1. Novitāte un motivācija.....	6
1.2. Darba mērķis.....	6
1.3. Darba uzdevumi	7
1.4. Darba praktiskā vērtība	7
1.5. Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.....	7
1.6. Darba aprobācija	8
1.7. Autora publikācijas	8
1.8. Darba struktūra.....	9
2. APSKATS PAR GANDRĪZ NULLES ENERĢIJAS ĒKU PRASĪBĀM EIROPAS SAVIENĪBĀ.....	10
3. APSKATS PAR PASĪVĀS DZESĒŠANAS TEHNOLOĢIJĀM IZMANTOŠANAI ĒKĀS.....	13
4. APSKATS PAR FĀŽU PĀREJAS MATERIĀLIEM	17
5. APSKATS PAR TERMĀLĀS ENERĢIJAS AKUMULATORU SISTĒMĀM, KAS BALSTĪTAS UZ FĀŽU PĀREJAS MATERIĀLIEM	21
5.1. Pasīvās <i>PCM</i> termālās enerģijas akumulatoru sistēmas	21
5.2. Aktīvās <i>PCM</i> termālās enerģijas akumulatoru sistēmas	23
6. APSKATS PAR SILTUMA PĀREJAS TEORIJU.....	26
7. METODOLOĢIJA	30
7.1. Eksperimenta apraksts	30
7.2. Simulāciju modelis veikspējas modelēšanai	33
8. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	35
8.1. Simulācijas modeļa verifikācija	35
8.2. Simulāciju modelis ar <i>PCM</i> dzesēšanas paneli un dzesēšanas ūdens pieslēgumu	35
8.3. Veikspējas modelēšana – salīdzinošais pētījums.....	37
8.4. Rezultātu kopsavilkums	37
8.5. Izstrādātā modeļa ierobežojumi	39
9. SECINĀJUMI	40
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	41

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

<i>CFD</i>	skaitliskā hidrodinamika (<i>Computational fluid dynamics</i>)
<i>PCM</i>	fāžu pārejas materiāli (<i>Phase change materials</i>)
<i>ODP</i>	ozona noārdīšanas potenciāls (<i>Ozone depleting potential</i>)
<i>GWP</i>	globālās sasilšanas potenciāls (<i>Global warming potential</i>)
<i>HVAC</i>	apkure, ventilācija un gaisa kondicionēšana (<i>Heating, ventilation and air-conditioning</i>)
<i>EPBD</i>	direktīva par energoefektivitāti ēkās (<i>Energy performance buildings directive</i>)
<i>NZEB</i>	gandrīz nulles enerģijas ēka (<i>Nearly zero-energy buildings</i>)
<i>MEP</i>	mehāniskās, elektriskās un santehnikas sistēmas (<i>Mechanical, electrica and plumbing systems</i>)
<i>EER</i>	enerģijas efektivitātes rādītājs (<i>Energy efficiency ratio</i>)
<i>TES</i>	termālās akumulācijas sistēma (<i>Thermal energy storage system</i>)
<i>NMF</i>	neitrālais modeļu formāts (<i>Neutral model format</i>)
<i>IDA ICE</i>	<i>IDA</i> iekštelpu klimats un enerģija (<i>IDA Indoor Climate and Energy</i>)
<i>RMSE</i>	vidējā kvadrātiskā kļūda (<i>Root mean square error</i>)
<i>3D</i>	trīsdimensionāls (<i>Three-dimensional</i>)
<i>ZEB</i>	nulles enerģijas ēka (<i>Zero-energy building</i>)

1. IEVADS

1.1. Novitāte un motivācija

Ņemot vērā klimatiskos apstākļus, pieprasījums pēc iekštelpu dzesēšanas pēdējās desmitgadēs ir pieaudzis gan Centrāleiropā, gan Ziemeļeiropā.

Pēc zinātnieku aplēsēm, šī tendence turpināsies, ņemot vērā faktu, ka no 1990. līdz 2016. gadam dzesēšanas enerģijas patēriņš pasaulē ir vairāk nekā trīskāršojies un tiek prognozēts, ka līdz 2050. gadam tas trīskāršosies vēlreiz [1]. Īpaši liels dzesēšanas enerģijas pieaugums ir novērots dzīvojamo ēku sektorā. Šobrīd Eiropā mehāniskā dzesēšana veido aptuveni 20 % no kopējā enerģijas patēriņa ēkās [1].

Ir nepārprotami, ka dzesēšanas pieprasījuma pieaugums konfliktē ar Eiropas Savienības virzību uz siltumnīcefekta radošu gāzu emisiju samazinājumu. Lai risinātu telpu pārkaršanas problēmas un izvairītos no papildu dzesēšanas iekārtu uzstādīšanas, kas satur freonus ar augstiem *ODP* un *GWP* potenciāliem, ir nepieciešamas jaunas pasīvās dzesēšanas tehnoloģijas.

Ir zināms, ka lielākā daļa pasīvās dzesēšanas tehnoloģiju nav pietiekami efektīvas, lai pilnībā nosegtu dzesēšanas pieprasījumu ēkās. Šo problēmu – vismaz daļēji – var risināt, izmantojot termālās enerģijas akumulatoru sistēmas.

Šī pētījuma mērķis – vienādojumos balstīta, validēta simulāciju modeļa izstrāde dzesēšanas paneļiem ar iebūvētu latentu siltumenerģijas akumulatoru (fizisks paneļa prototips jau ir izstrādāts saistībā ar citu pētījumu).

Simulāciju modeļa izstrāde un validācija ir nepieciešama, lai precīzi prognozētu šādu paneļu veiktspēju modernās gandrīz nulles enerģijas ēkās, izmantojot dinamiskos enerģijas simulāciju rīkus, un lai sagatavotu šādu sistēmu izmantošanai industrijā.

Vienādojumos balstīts validēts simulāciju modelis šāda tipa dzesēšanas panelim līdz šim nav izstrādāts, tādēļ var uzskatīt, ka tā ir pētījuma novitāte.

1.2. Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt kalibrētu (validētu) simulāciju modeli ar ūdeni dzesētam panelim ar integrētu fāžu pārejas materiālu (*PCM*) termālās enerģijas akumulatoru un pārbaudīt tā izmantojamību pilnas ēkas izmēra simulācijas modeļos. Darbā izmantotais dzesēšanas panelis ar iebūvētu *PCM* termālās enerģijas akumulatoru tika izstrādāts saistībā ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda pētniecības projektu Nr. 1.1.1.1/16/A/007 “Jauna koncepcija ilgtspējīgas, zema energopatēriņa ēku būvniecībai”.

Darbā ir pierādīts, ka, izmantojot izstrādāto simulāciju modeli, ir iespējams sasniegt adekvātu precizitāti, reproducējot mērījumus no testa kameras un skaitļojamās šķidrumu dinamikas (*CFD*) simulāciju rezultātus.

Šāda pieeja tika izvēlēta, jo, neskatoties uz to, ka *CFD* simulācijas ir vieni no precīzākajiem matemātiskajiem tuvinājumiem īstām sistēmām, to izmantošana šim nolūkam ir ļoti ierobežota lielās darbietilpības un lielo datorresursu nepieciešamības dēļ. Savukārt

dinamisko simulāciju rīki ļauj modelēt lielas sistēmas salīdzinoši īsos laika periodos, kā arī šādus simulāciju rīkus jau plaši izmanto būvniecības industrijā.

Hipotēze

Ekspierimentāli validēts vienādojumos balstīts simulāciju modelis ar ūdeni dzesētam panelim ar integrētu latentu termālās enerģijas akumulatoru spēj radīt simulāciju rezultātus, kuru precizitāte ir piemērota izmantošanai būvniecības industrijā.

1.3. Darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, definēti šādi uzdevumi:

- veikt detalizētu literatūras analīzi par:
 - gandrīz nulles enerģijas ēku prasībām Eiropas Savienībā;
 - iepriekšējiem pētījumiem pasīvo dzesēšanas tehnoloģiju jomā;
 - dažādiem *PCM* materiāliem un to īpašībām;
 - dažādiem *PCM* termālo akumulatoru tehnoloģiju veidiem un iepriekš izstrādātajiem matemātiskajiem un simulāciju modeļiem;
 - siltuma pārejas teoriju apkures, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas (*HVAC*) sistēmās;
- aprakstīt pētījuma metodoloģiju, eksperimenta gaitu un izmantotos aprēķina modeļus;
- veikt eksperimentus un apkopot rezultātus;
- veikt simulācijas modeļa kalibrāciju pret eksperimentālajiem mērījumiem un *CFD* simulācijas rezultātiem;
- veikt rezultātu analīzi citu līdzīgu pētījumu kontekstā.

1.4. Darba praktiskā vērtība

Lielākajai daļai pasīvās dzesēšanas tehnoloģiju ir grūti nodrošināt dzesēšanu ēkās pietiekamā apjomā bez uzticama termālās enerģijas akumulatora. Tas izraisa enerģijas patēriņa pieaugumu un/vai termālā komforta kritumu jaunbūvējamās ēkās. Izstrādātais vienādojumos balstītais simulāciju modelis ir paredzēts industrijas profesionāļiem slodžu, sistēmu dimensionēšanas un enerģijas patēriņa simulācijām, izvairoties no sarežģītu, darbietilpīgu un ilgu *CFD* simulāciju izmantošanas.

Promocijas darba rezultāti un izstrādātais simulāciju modelis ir publicēts brīvpieejas zinātniskajā žurnālā *Energies* no *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* [2].

1.5. Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Eksperimentālie rezultāti liecina par ciešu korelāciju starp eksperimentālajiem mērījumiem un simulācijas rezultātiem.

- Rezultāti, kas iegūti no izstrādātā simulāciju modeļa salīdzinošajā pētījumā, liecina par ciešu korelāciju ar rezultātiem no *CFD* simulācijas. Attiecīgajai simulācijai nepieciešamais laika periods ir par vairākām kārtām īsāks.
- Rezultātiem, kas iegūti no izstrādātā simulāciju modeļa, ir līdzvērtīga vai augstāka precizitāte, nekā ziņots līdzīgos pētījumos līdz šim.

1.6. Darba aprobācija

26.05.2019.–29.05.2019.

Renars Millers, Aleksandrs Korjakins, Arturs Lesinskis, Thermally Activated Concrete Slabs with Integrated PCM Materials CLIMA 2019, Rumānija, Bukareste.

05.10.2016.–07.10.2016.

Renars Millers, Uldis Pelite, Survey of Control Characteristics of Circular Air Dampers in Variable Air Volume Ventilation Systems, SBE16 Tallinn and Helsinki Conference; Build Green and Renovate Deep, Igaunija, Tallina.

22.05.2016.–25.05.2016.

Galina Stankevica, Andris Kreslins, Anatolijs Borodinecs, Renars Millers, Achieving Deep Energy Retrofit in Latvian Public Building – Simulation Study CLIMA 2016, Dānija, Alborga.

1.7. Autora publikācijas

1. publikācija

Millers, R.; Korjakins, A.; Lešinskis, A.; Borodinecs, A. Cooling Panel with Integrated PCM Layer: A Verified Simulation Study. *Energies* 2020, doi:10.3390/en13215715.

2. publikācija

Millers, R., Korjakins, A., Lešinskis, A. Thermally Activated Concrete Slabs with Integrated PCM Materials. No: *E3S Web of Conferences*, Rumānija, Bukareste, 26.–29. Maijs, 2019. Bukareste: CLIMA 2019 Congress, 2019, 1.–6. lpp. ISSN 2555-0403. Pieejams: doi:10.1051/e3sconf/201911101080.

3. publikācija

Prozuments, A., Vanags, I., Borodinecs, A., Millers, R., Tumanova, K. A Study of the Passive Cooling Potential in Simulated Building in Latvian Climate Conditions. From: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Latvija, Rīga, 27.–29. septembris, 2018. UK: IOP Publishing, 2017, 1.–8. lpp. ISSN 1757-8981. Pieejams: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012052.

4. publikācija

Ovchinnikov, P., Borodiņecs, A., Millers, R. Utilization Potential of Low Temperature Hydronic Space Heating Systems in Russia. *Journal of Building Engineering*, 2017, Vol. 13, 1.–10. lpp. ISSN 2352-7102. Pieejams: doi:10.1016/j.jobee.2017.07.003.

5. publikācija

Stankeviča, G., Krēsliņš, A., Borodiņecs, A., Millers, R. Achieving Deep Energy Retrofit in Latvian Public Building – Simulation Study. No: CLIMA 2016: Proceedings of the 12th REHVA World Congress. Vol. 10, Dānija, Alborga, 22.–25. maijs, 2016. Alborga: Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2016, 1.–9. lpp. e-ISBN 87-91606-35-7.

6. publikācija

Millers, R., Pelīte, U. Survey of Control Characteristics of Circular Air Dampers in Variable Air Volume Ventilation Systems. *Energy Procedia*, 2016, Vol. 96, 294.–300. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2016.09.152.

1.8. Darba struktūra

Promocijas darbā ir deviņas nodaļas.

- 1. nodaļā aprakstīta pētījuma motivācija un novitāte, definēts pētījuma mērķis un joma, formulēta hipotēze, kā arī aprakstīti uzdevumi un parādīta pētījuma praktiskā nozīme. Šajā nodaļā ir arī uzskaitītas publikācijas un dalība dažādās konferencēs.
- 2. nodaļā apskatīti gandrīz nulles enerģijas ēku (*NZEB*) pamatprincipi un to prasības dažādās Eiropas Savienības dalībvalstīs, kā arī veidi, kā šajās valstīs ir risināta šo ēku pārkaršanas problēma.
- 3. nodaļā aplūkoti iepriekš veiktie pētījumi pasīvo dzesēšanas tehnoloģiju jomā. Šīs tehnoloģijas potenciāli var izmantot gandrīz nulles enerģijas ēkās apvienojumā ar latentu termālās enerģijas akumulatoru sistēmām, lai risinātu pārkaršanas problēmas ēkās.
- 4. nodaļā apskatīti pieejamie fāžu pārejas materiāli, to īpašības un izmantojamība dzesēšanas paneļos ar fāžu pārejas materiālu termālās enerģijas akumulatoriem.
- 5. nodaļā apskatītas latentu termālās enerģijas akumulatoru (*TES*) sistēmas, dažādu *TES* sistēmu veiktspēja, iepriekš izstrādāti matemātiskie un simulāciju modeļi un ievērojamāko eksperimentālo un simulāciju pētījumu galvenie rezultāti.
- 6. nodaļā apskatīta siltuma pārejas teorija *HVAC* sistēmās, kas saistīta ar dzesēšanas paneļiem. Šo teoriju ir būtiski izprast, lietojot, izstrādājot un modelējot *TES* sistēmu komponentus.
- 7. nodaļā aprakstīta pētījuma metodoloģija un vienādojumos balstītais aprēķinu modelis dzesēšanas panelim ar iebūvētu latentu termālās enerģijas akumulatoru.
- 8. nodaļā veikta izstrādātā modeļa validācija, salīdzinot ar eksperimentālajiem rezultātiem un *CFD* simulācijas rezultātiem, kā arī rezultātu statistiskā analīze. Šajā nodaļā aprakstīti arī izstrādātā simulāciju modeļa ierobežojumi.
- 9. nodaļā apkopoti pētījuma secinājumi un apstiprināta iepriekš izvirzītā hipotēze.

2. APSKATS PAR GANDRĪZ NULLES ENERĢIJAS ĒKU PRASĪBĀM EIROPAS SAVIENĪBĀ

Līdz 2030. gadam Eiropas Savienībā ir plānots ierobežot CO₂ izmešu apjomu no ēkām līdz 55 % (salīdzinot ar 1990. gada līmeni), līdz 2050. gadam – sasniegt CO₂ emisiju nulles bilanci gada griezumā [3]. Šobrīd aptuveni 40 % no CO₂ izmešiem ES rodas no ēku sektora, un tas ir lielākais CO₂ izmešu avots Eiropā [4].

Galvenais rīks, lai samazinātu ēku enerģijas patēriņu ES un sasniegtu nulles emisiju apjomu līdz 2050. gadam, ir Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2010/31/EU. Direktīva nosaka, ka, sākot no 2021. gada 31. decembra, visām jaunbūvējamām ēkām ir jāatbilst gandrīz nulles enerģijas ēku prasībām.

Direktīva nosaka tikai vispārējus principus gandrīz nulles enerģijas ēku aprēķinu metodikai un minimālajām energoefektivitātes prasībām šajās ēkās. Detalizētas prasības ir paredzēts aprakstīt katras dalībvalsts būvnormatīvos, un šīm prasībām ir jābūt optimizētām izmaksu ziņā.

Apkures enerģijas patēriņš var būt ievērojams, īpaši Eiropas ziemeļu un centrālajā daļā. Šis jautājums ir plaši apskatīts iepriekšējo gadu laikā. Vairākas valstis ir adaptējušas prasības būvnormatīvos, kā rezultātā to ēku, kurām ir laba siltumizolācija un zema gaisa caurlaidība, apjoms pieaug, un tam ir pozitīva ietekme uz siltumenerģijas patēriņa samazinājumu. *Ovchinnikov* u. c. [5] ir uzsvēris arī zemas ūdens temperatūras apkures priekšrocības.

Eiropas ziemeļu un centrālajā daļā, kur gandrīz nulles enerģijas un zema enerģijas patēriņa ēkas visbiežāk ir ar labi izolētām norobežojošajām konstrukcijām, ēkās akumulētie iekšējie un saules siltuma pieplūdumi var tikt “iesprostoti” un radīt pārkaršanu telpās.

Šis pārkaršanas blakusefekts modernās Eiropas ēkās ir jārisina būvnormatīvu līmenī un jānovērš efektīvā veidā. Daudzas valstis jau ir ieviesušas dažāda veida iekštelpu maksimālās temperatūras ierobežojumus.

Austrijā jau pirms Direktīvas par ēku energoefektivitāti stāšanās spēkā bija salīdzinoši labi definētas ēku energoefektivitātes prasības renovācijām un jaunbūvēm. Tam daļēji par iemeslu ir “pasīvo ēku” kustība pirms gandrīz nulles enerģijas ēku koncepta rašanās.

Gandrīz nulles enerģijas ēka Austrijā ir definēta kā energoefektīva ēka ar labi izolētām norobežojošajām konstrukcijām un videi draudzīgu apkures sistēmu. Energoefektivitāte tiek mērīta, izmantojot četrus indikatorus:

- ēkas siltumenerģijas patēriņš (kWh/m² gadā);
- ēkas primārās enerģijas patēriņš (kWh/m² gadā);
- CO₂ emisijas (kg/m² gadā);
- kopējais energoefektivitātes faktors.

Atbilstību gandrīz nulles enerģijas ēku prasībām var pierādīt divos veidos:

- sasniedzot ēkas siltumenerģijas patēriņa prasības;
- sasniedzot ēkas kopējā energoefektivitātes faktora prasības.

Abos gadījumos arī primārās enerģijas patēriņš un CO₂ emisiju līmenis ir ierobežots. Ēkas siltumenerģijas patēriņa aprēķinā tiek ņemts vērā arī ēkas formas faktors.

Telpu pārkaršana dzīvojamās ēkās Austrijā tiek ierobežota ar maksimāli pieļaujamo operatīvo temperatūru 25 °C vai 27 °C atkarībā no telpas tipa un diennakts laika.

Gandrīz nulles enerģijas ēku prasības **Dānijā** prioritāri ierobežo ēku primārās enerģijas patēriņu, tomēr ir regulēta arī telpu pārkaršana, norobežojošo konstrukciju siltumcaurlaidība, ēku gaisa caurlaidība un atjaunojamo resursu izmantošana.

Maksimāli pieļaujama primārās enerģijas patēriņš jaunbūvējamās ēkās tika samazināts 2010., 2015. un 2020. gadā – katru reizi par aptuveni 25 %, sasniedzot gandrīz nulles enerģijas ēku līmeni 2020. gadā. Gandrīz nulles enerģijas prasības primārās enerģijas patēriņam ir 20 kWh/m² gadā dzīvojamām ēkām un 25 kWh/m² gadā nedzīvojamām ēkām. Šis ierobežojums nav atkarīgs no ēkas izmēra.

Papildus primārās enerģijas patēriņa ierobežojumiem siltuma zudumi aprēķina apstākļos caur ēkas norobežojošajām konstrukcijām nedrīkst pārsniegt 3,7 W/m² vienkāršām ēkām, 4,7 W/m² divstāvu ēkām un 5,7 W/m² trīs un vairāk stāvu ēkām.

Papildus enerģijas patēriņam ir jāpierāda arī atbilstība tam, ka iekštelpu gaisa temperatūra dzīvojamās ēkās nepārsniedz 26 °C vairāk nekā 100 stundas gadā un nepārsniedz 27 °C vairāk nekā 25 stundas gadā. Atbilstība šīm prasībām ir jāpierāda, izmantojot dinamiskās simulāciju programmas vai “Be10” (nacionālais aprēķinu rīks [6]). Ja iekštelpu gaisa temperatūra pārsniedz šīs vērtības, tad tiek aprēķināts pārkaršanas “sods”, kas ir iedomāts dzesēšanas enerģijas patēriņš, lai telpās uzturētu 26 °C gaisa temperatūru [7].

Gandrīz nulles enerģijas ēku prasības **Igaunijā** ierobežo primārās enerģijas patēriņu ēkās. Dažādiem ēku tipiem pastāv atšķirīgas prasības. Norobežojošo konstrukciju *U* vērtības netiek ierobežotas.

Papildus enerģijas patēriņa ierobežojumam pastāv arī ierobežojums telpu pārkaršanai vasarā (no 1. jūnija līdz 31. augustam). Šis ierobežojums ir 150 grādstundas virs 27 °C temperatūras dzīvojamās ēkās un virs 25 °C nedzīvojamās ēkās [8].

Atbilstība primārās enerģijas patēriņam un termālā komforta prasībām vasaras periodā ir jāpierāda, izmantojot dinamiskās simulāciju programmas. Enerģijas patēriņš dzīvojamās ēkās var tikt aprēķināts arī, izmantojot mēnešu vidējo temperatūru metodi.

Papildus primārās enerģijas patēriņam pastāv arī obligātās prasības mehānisko, elektrisko un santehnikas (*MEP*) sistēmu energoefektivitātes līmenim.

Latvijā līdz 2015. gadam enerģijas patēriņš ēkās galvenokārt tika regulēts, ierobežojot norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidību (*U* vērtības). Sākot no 2015. gada, tika ieviests arī maksimālais pieļaujama apkures enerģijas patēriņš.

Gandrīz nulles enerģijas ēku prasības Latvijā regulē apkures enerģijas patēriņu, primārās enerģijas patēriņu, minimālo siltuma atgūšanas efektivitāti ventilācijas iekārtās un obligātu atjaunojamo energoresursu izmantošanu [9]. Papildus enerģijas patēriņam pastāv arī ierobežojumi attiecībā uz norobežojošo konstrukciju *U* vērtībām un ēkas gaisa caurlaidību [10].

Tiešs telpu maksimālās temperatūras ierobežojums nepastāv, tomēr ir noteikts, ka projektēšanas laikā pasūtītājs ir jāinformē, ja kādā no ēkas telpām gaisa temperatūra var

pārsniegt 28 °C. Normatīvie akti nesniedz turpmāku informāciju, kā pierādīt atbilstību šai prasībai [11].

Lielākā daļa valstu ir apzinājušas pieaugošo telpu pārkaršanas problēmu modernās ēkās un reaģējušas, ieviešot normatīvās prasības. Vairumā valstu ir arī telpu maksimālās temperatūras ierobežojumi, kas definēti kā maksimālā temperatūra vai grādstundu ierobežojums virs kādas maksimālās temperatūras.

Var secināt, ka lielākajā daļā Ziemeļeiropas un Centrāleiropas valstu ēkām ir nepieciešama laba siltumizolācija un zema gaisa caurlaidība, lai sasniegtu energoefektivitātes prasības. No otras puses, tas paaugstina telpu pārkaršanu, kas ir jānovērš, nepasliktinot ēku kopējo energoefektivitāti.

3. APSKATS PAR PASĪVĀS DZESĒŠANAS TEHNOLOĢIJĀM IZMANTOŠANAI ĒKĀS

No iepriekšējās nodaļas var secināt, ka, lai sasniegtu gandrīz nulles enerģijas vai pat nulles enerģijas patēriņa līmeni ēkās, pasīvās dzesēšanas tehnoloģijas ir jāizmanto plašā mērogā. Daudzu veidu pasīvās dzesēšanas tehnoloģijas ir iepriekš pētītas un aprakstītas dažāda veida literatūrā, tomēr tās vēl netiek plaši izmantotas augstu izmaksu, sarežģītības, tehnisku ierobežojumu un citu faktoru dēļ.

Pasīvās dzesēšanas tehnoloģijas, kas ir aprakstītas šajā nodaļā, var uzskatīt par potenciāliem dzesēšanas enerģijas avotiem, ko izmantot kombinācijā ar *PCM* termālās enerģijas akumulatoriem, lai samazinātu telpu pārkaršanu gandrīz nulles enerģijas ēkās un samazinātu dzesēšanai nepieciešamo enerģijas patēriņu.

Nakts dzesēšana ir pasīva vai daļēji pasīva dzesēšanas tehnika, kas balstās uz diennakts āra gaisa temperatūras svārstībām. Tās darbības princips ir palielināt telpu gaisa apmaiņu nakts laikā, par dzesēšanas avotu izmantojot vēso āra gaisu.

Nakts dzesēšana visbiežāk tiek izmantota kā papildinājums mehāniskajai dzesēšanai, lai samazinātu enerģijas patēriņu. Nakts dzesēšanu bieži izmanto arī kopā ar fāžu pārejas materiāliem [12]–[15].

Givoni [16]–[18] ir ziņojis, ka nakts dzesēšana efektīvi izmantojama klimatiskajās zonās, kur dienas laikā gaisa temperatūra ir zem 36 °C, savukārt nakts laikā ir zem 26 °C. *Roaf* u. c. [19] savā pētījumā ir norādījis līdzīgus kritērijus – āra gaisa temperatūra nakts laikā ne augstāka par 20 °C un dienas laikā – ne augstāka par 31 °C.

Artman u. c. [20] izstrādāja Eiropas karti, balstoties uz “*Meteonorm*” datiem [21] ar vidējām minimālajām diennakts temperatūrām un vidējām diennakts minimālās un maksimālās temperatūras starpībām jūlijā. Karte ir izmantojama, lai novērtētu nakts dzesēšanas efektivitāti dažādos Eiropas reģionos. Lielākā daļa Ziemeļeiropas un Centrāleiropas ir piemērota šai dzesēšanas tehnikai.

Prozuments u. c. [22] veica simulāciju pētījumu par nakts dzesēšanas potenciālu Latvijas klimatiskajos apstākļos. Pētnieku komanda secināja, ka, izmantojot tikai nakts dzesēšanu, nav iespējams nodrošināt komfortablu iekštelpu temperatūru, tomēr nakts dzesēšana var sniegt aptuveni 8 % dzesēšanas enerģijas patēriņa ietaupījumu.

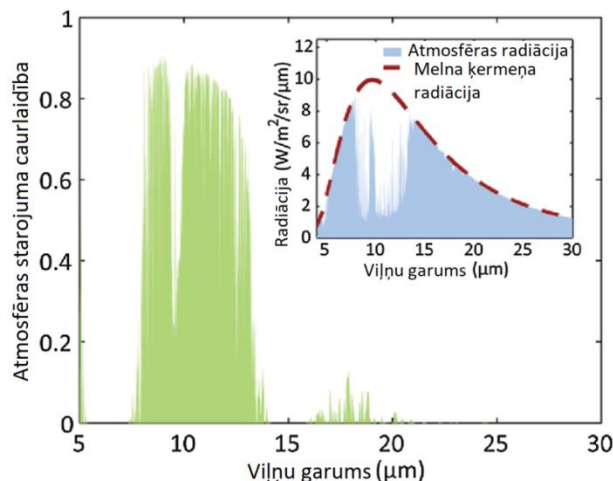
Radiantā nakts dzesēšana ir dzesēšanas tehnoloģija, kas utilizē radianto siltumapmaiņu ar debesīm nakts laikā. Dzesēšanas process darbojas, jo nakts laikā debesu temperatūra ir zemāka par virsmu temperatūru uz zemes.

Meir u. c. savos pētījumos ir ziņojis par to, ka, izmantojot radianto nakts dzesēšanu, ir iespējams nosegt ievērojamu daļu no viengimenes mājas dzesēšanas patēriņa [23].

Ecker un *Dalibard* [24] savā pētījumā novēroja, ka fotovoltiskie termālie saules kolektori spēj nodrošināt ~120 W/m² radianto dzesēšanas jaudu nakts laikā. Par līdzīgiem rezultātiem ziņoja arī *Thibault* u. c. [25].

Dienas laika radiantās dzesēšanas nozīmīgums un potenciāls, izmantojot atmosfēras “caurspīdības logu” infrasarkanajā spektrā starp 8 μm un 13 μm, tika uzsvērts jau pirms vairākām desmitgadēm [26]–[28]. Tomēr tikai nesen dienas laika radiantā dzesēšana tika

demonstrēta zem apkārtējās vides temperatūras, pateicoties panākumiem nanofotonikā. Šo panākumu atslēga ir materiāla spēja vienlaikus apvienot augstu emisivitāti infrasarkanajā spektrā starp 8 μm un 13 μm un zemu emisivitāti visos pārējos elektromagnētiskā starojuma spektros (3.1. att.).



3.1. att. Atmosfēras starojuma caurlaidība uz leju vērstai radiācijai (attēls no [29], dati no [30]).

Materiāli ar iepriekš minētajām īpašībām spēj sasniegt pozitīvu radiantās dzesēšanas bilanci pat tad, ja tie atrodas tiešā saules radiācijas ietekmē. Intensīva šīs tehnoloģijas izpēte sākās pēc tam, kad *Raman* u. c. [31] 2014. gadā pirmo reizi demonstrēja radianto dzesēšanu 40 W/m^2 un 5 $^{\circ}\text{C}$ zem apkārtējās vides temperatūras tiešas saules radiācijas ietekmē. Kopš tā laika radiantās dzesēšanas jaudas virs 100 W/m^2 tiešā saules radiācijas starojuma ietekmē ir sasniegtas, izmantojot “atmosfēras caurspīdības logu”.

Ļoti bieži sastopama pasīvās dzesēšanas tehnoloģija ir **adiabātiskā jeb iztvaikojošā dzesēšana**. Šīs dzesēšanas tehnoloģijas princips balstās uz ūdens iztvaikošanas enerģiju. Iztvaikošanas procesa laikā daļa ūdens molekulu savstarpējo sadursmju ietekmē iegūst pietiekami lielu pārvietošanās ātrumu un kinētisko enerģiju, lai pamestu Knudsenā jeb iztvaikošanas slāni. Rezultātā atlikušās ūdens molekulas paliek ar zemāku vidējo kinētisko enerģiju. Ūdens molekulu vidējā kinētiskā enerģija ir proporcionāla ūdens temperatūrai, tāpēc notiek dzesēšanas process. Ar šo tehnoloģiju visbiežāk nav pietiekami, lai nodrošinātu nepieciešamo dzesēšanas jaudu visa gada laikā. Tā bieži tiek izmantota kopā ar cita veida dzesēšanas tehnoloģijām.

Šī promocijas darba autors un citi [32] simulācijas pētījumā pierādīja, ka Baltijas jūras reģionā ir iespējams nodrošināt komfortablu iekštelpu temperatūru, adiabātisko dzesēšanu kombinējot ar *PCM* termālās enerģijas akumulatoru. *Duan* u. c. [33] pētījumā ziņoja, ka netiešās adiabātiskās dzesēšanas iekārtas spēj sasniegt EER koeficientus robežās no 30 līdz 80. *Amer* [34] savā pētījumā pierādīja, ka jumta dzesēšana, iztvaikojot ūdenim, ir visefektīvākais dzesēšanas veids sausos klimata apstākļos.

Dzesēšanas process, izmantojot sorbentus, sastāv no gaisa plūsmas sausināšanas ar sorbenta materiālu, kas absorbē/adsorbē gaisā esošo ūdens tvaiku. Paralēlā procesā tas pats sorbents no iepriekšējā cikla tiek reģenerēts, to sildot ar vēl vienu gaisa plūsmu līdz tā reģenerācijas temperatūrai.

Pēc ienākošās gaisa plūsmas sausināšanas tā tiek atdzesēta līdz sākotnējai temperatūrai (visbiežāk tas tiek darīts, izmantojot gaiss-gaiss siltummaiņi). Pēc tam tas tiek adiabatiski jeb kādā citā veidā dzesēts līdz nepieciešamajai temperatūrai.

Šāda tipa dzesēšanas sistēmas ir ilgtspējīgas, ja ir pieejams lieks augstas temperatūras siltums vai arī tiek izmantoti termālie saules kolektori.

Mavroudaki u. c. [35] veica simulācijās balstītu ilgtspējības pētījumu, dzesēšanai izmantojot sorbentus. Pētījumā tika apskatītas septiņas pilsētas Eiropā. Tika pieņemts, ka dzesēšanas sistēma tiek darbināta ar gāzes apkures katla un saules kolektoru kombināciju. Pētnieku komanda atklāja, ka āra gaisa mitruma saturs šīs dzesēšanas sistēmas darbību ietekmē vairāk nekā solārās enerģijas pieejamība. Solārā enerģija nosedza, sākot no 25 % siltumenerģijas patēriņa Londonā līdz pat 93 % siltumenerģijas patēriņa Oslo.

Ir zināms, ka dabīgos termālā līdzsvara apstākļos grunts temperatūra jau aptuveni 3 m dziļumā ir praktiski nemainīga un vienāda ar gada vidējo zemes virsmas temperatūru.

Šo principu izmanto **pasīvā ģeotermālā dzesēšana**.

Ģeotermālās dzesēšanas tehnoloģija tiek iedalīta divos veidos: **grunts-gaisa siltummaiņi** un **grunts-šķidrums siltummaiņi**. Abu veidu tehnoloģijas ir samērā pazīstamas un iepriekš plaši pētītas.

Grunts-gaiss siltummaiņi ir plaši pētīti un izmantoti. Šīs sistēmas veiktspēja ir atkarīga no siltumapmaiņas virsmas laukuma (garums un diametrs), gaisa plūsmas un citām īpašībām: dziļums, āra gaisa temperatūra un grunts īpašības [36–38].

Mērena klimata apstākļos sezonālās dzesēšanas enerģijas ieguvums ir aptuveni 8–10 kWh/m², attiecinot uz grunts siltumapmaiņas laukumu, un maksimālā dzesēšanas jauda pie 32 °C āra gaisa temperatūras ir aptuveni 45 W/m², attiecinot uz grunts siltumapmaiņas laukumu [39], [40]. Dažādos pētījumos ir minēta atšķirīga sistēmas veiktspēja:

- 20–30 % diskomforta stundu samazinājums Beļģijā [41];
- no 13,1 kWh/m² līdz 23,8 kWh/m² dzesēšanas enerģijas patēriņa samazinājums Vācijā [42];
- 30 % dzesēšanas enerģijas patēriņa samazinājums Šveicē [39];
- 33 kWh/m² dzesēšanas enerģijas patēriņa samazinājums Grieķijā [43].

Grunts-šķidrums siltummaiņi visbiežāk sastāv no horizontālām cirkulācijas cilpām, kas ir ieraktas zemē, vai vertikālām cirkulācijas cilpām ēkas pāļos vai urbemos gruntī. Šie siltummaiņi tiek izmantoti gan apkurei (izmantojot siltumsūkņus), gan dzesēšanai pasīvā veidā vai dzesēšanai, izmantojot tvaika kompresijas cikla iekārtas.

Šo siltummaiņu efektīvai darbībai tos ir nepieciešams izmantot gan dzesēšanai, gan apkurei vai tos periodiski reģenerēt [44], [45], citādi grunts ar laiku var zaudēt dzesēšanas vai apkures potenciālu. Taču jāņem vērā, ka ir arī tādi pētījumi, kas norāda uz paaugstinātiem bojājumu riskiem šādā izmantošanas režīmā [46].

Lielākā daļa pasīvās dzesēšanas tehnoloģiju var tikai daļēji segt ēkas dzesēšanas enerģijas pieprasījumu. Nakts dzesēšanas efektivitāte ir ļoti atkarīga no āra gaisa temperatūras, radiantā dzesēšana ir atkarīga no debesu mākoņainības, savukārt adiabatiskā dzesēšana un dzesēšana, izmantojot sorbentus, zaudē efektivitāti periodos ar augstu āra gaisa mitrumu. Ģeotermālās dzesēšanas gadījumā ir jāvēro zināma ieejošās un izejošās enerģijas bilance, citādi grunts var zaudēt dzesēšanas potenciālu.

Ir nenoliedzami, ka, lai pilnībā nosegtu vai vismaz palielinātu pasīvās dzesēšanas enerģijas patēriņa daļu ēkas energobilancē, ir jāizmanto atbilstoši termālās enerģijas akumulatori.

Šī tēma apskatīta 4. un 5. nodaļā.

4. APSKATS PAR FĀŽU PĀREJAS MATERIĀLIEM

Latento termālās enerģijas akumulatoru sistēmas sastāv no divām komponentēm – termālās enerģijas akumulācijas materiāla un siltummaiņa (aktīvai izmantošanai) vai *PCM* materiāla iestrādes metodes (pasīvai izmantošanai). Šī iemesla dēļ arī *PCM* tehnoloģiju izpēti var iedalīt divās kategorijās [47]:

- materiālu izpēte, kuras ietvaros tiek pētīti paši *PCM* materiāli;
- siltummaiņu (vai iestrādes metožu) izpēte.

Par siltummaiņu izpēti var uzskatīt tādu metožu kopumu, ar ko var nodrošināt termālās enerģijas transportēšanu uz vai no *PCM* materiāla kādam konkrētam izmantošanas veidam. Šis promocijas darbs galvenokārt fokusēts tieši uz šo metožu izpēti, tomēr ir būtiski apzināt dažāda veida *PCM* materiālus un izprast to darbības principus un īpašības. Šajā darba nodaļā uzmanība vērsta uz *PCM* materiāliem. Siltumenerģijas apmaiņas metodes tās transportēšanai uz un no *PCM* materiāla apskatītas 5. nodaļā.

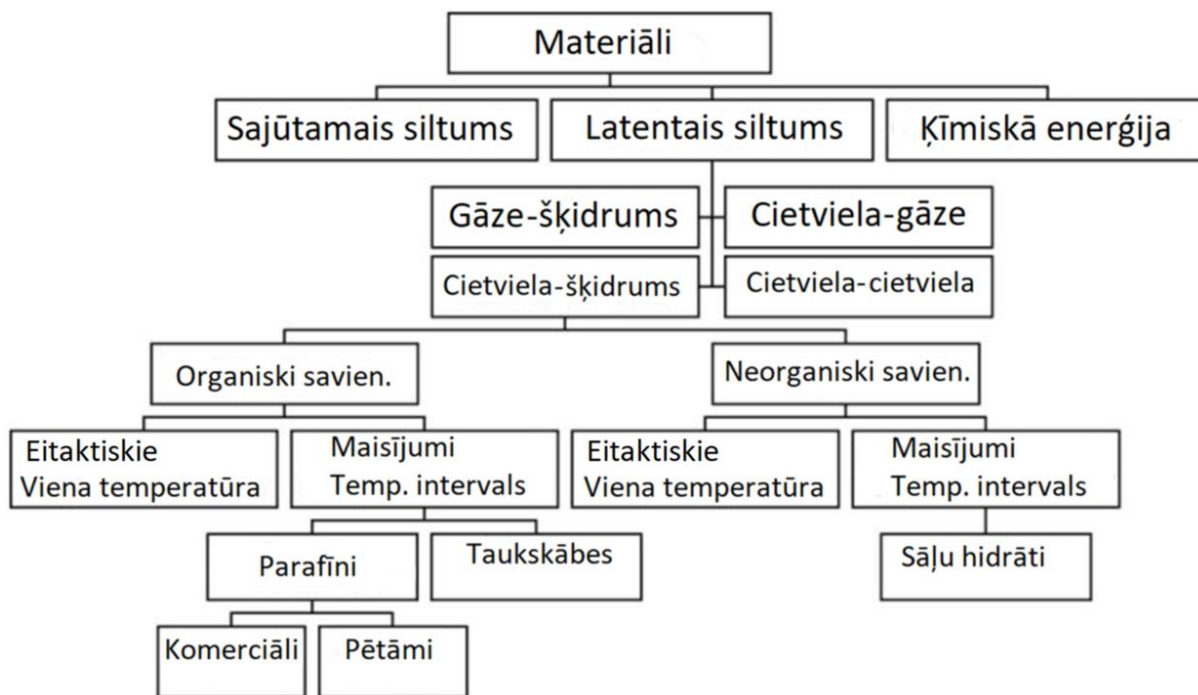
Pirmie pētījumi *PCM* materiālu izmantošanai apkures un dzesēšanas sistēmās tika veikti gandrīz pirms piecām desmitgadēm, tos veica *Telkes* [48], kā arī *Barkmann* un *Wessling* [49]. Kopš tā laika šīs tehnoloģijas ir daudz pētītas, un ir izstrādāti dažādi komercializēti un vēl nekomercializēti materiāli.

PCM materiāli ir efektīvi termālās enerģijas akumulatori to spējas akumulēt siltumenerģiju ne tikai temperatūras izmaiņu ietekmē (sajūtamās siltuma enerģijas akumulācija) dēļ, bet arī spējas izmantot materiālu kušanas un sacietēšanas fāžu pārejas enerģiju (latentā siltumenerģijas akumulācija), kas notiek šaurā temperatūras diapazonā, dēļ. Šis akumulācijas princips ļauj latentajiem siltumenerģijas akumulatoriem uzkrāt 5–14 reizes vairāk siltumenerģijas nekā sajūtamās siltumenerģijas akumulatoriem pie līdzīga tilpuma un svara.

1983. gadā *Abhat* [50] veica materiālu klasifikāciju vielām, ko var izmantot siltumenerģijas uzkrāšanai (4.1. att.). Kā redzams attēlā, latentie termālās enerģijas akumulatori var izmantot vairāku veidu fāžu pāreju: gāze-šķidrums, cietviela-gāze, cietviela-šķidrums, cietviela-cietviela.

Cietviela-cietviela [51] tipa fāžu pārejas materiāls izmanto fāžu pāreju cietvielā no kristāliskas uz kādu citu formu. Šāda tipa materiāli ir alternatīva, kuras izmantošanai nav nepieciešama kapsulācija, kā arī šāda tipa materiāliem fāžu pārejas procesā ir salīdzinoši nelielas tilpuma izmaiņas. Protams, šīm priekšrocībām ir arī trūkumi, kas šajā gadījumā ir zemāka latentā enerģijas akumulācijas spēja [52]. Cietviela-cietviela tipa fāžu pārejas materiālu labs piemērs ir pentaeritritols, pentaglicerīns un neopentilglikols [53].

Vēl viena fāžu pārejas materiālu forma ir **cietviela-gāze un šķidrums-gāze**. Attiecinot uz masas vienību, šī tipa materiāliem ir visaugstākā latentās enerģijas akumulācijas spēja, taču to praktiska izmantošana ir ļoti ierobežota tehnisku ierobežojumu dēļ. Šāda veida vielu izmantošanai ir nepieciešama liela tilpuma konteineri, kas ierobežo to praktisko izmantošanu. Viens praktisks piemērs šādām iekārtām ir tvaika akumulatori.



4.1. att. Klasifikācija materiāliem, kas izmantojami siltumenerģijas akumulācijai (informācija no [50], attēls no [47]).

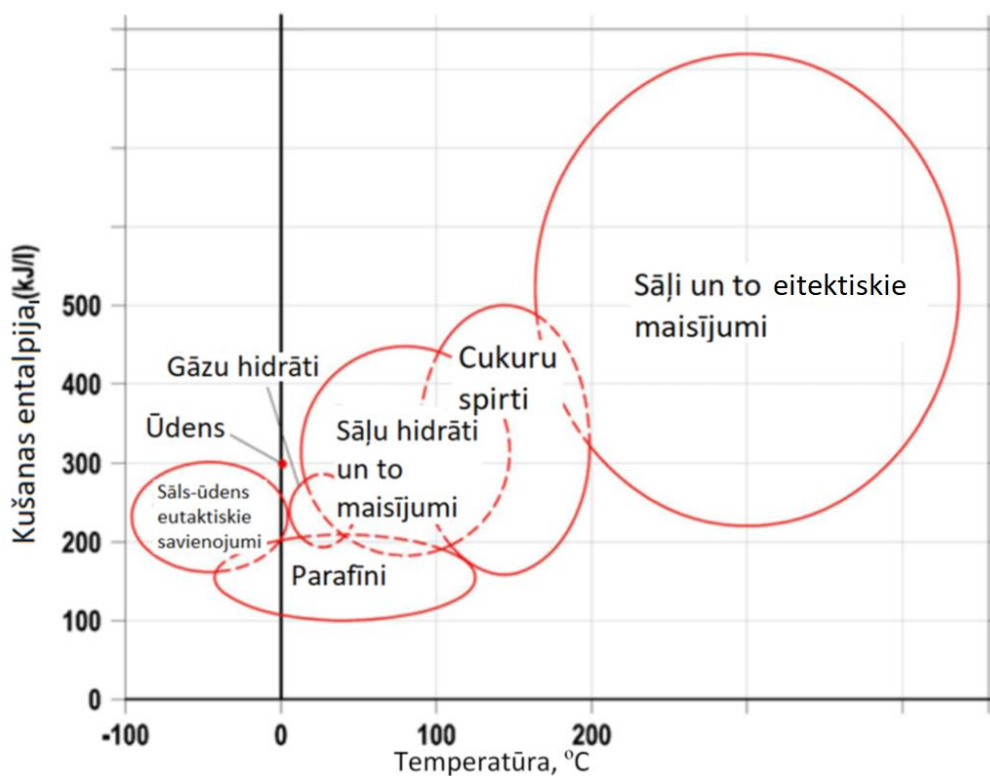
Cietviela-šķidrums tipa fāžu pārejas materiāliem ir mazāks latentās enerģijas akumulācijas potenciāls, ja to salīdzina ar cietviela-gāze vai šķidrums-gāze fāžu pārejas materiāliem. Tāda īpašība kā neliela tilpuma izmaiņa fāžu pārejas laikā padara tos par ilgtspējīgiem un plaši izmantotiem siltumenerģijas akumulatoriem. Šī tipa fāžu pārejas materiāli ir visvairāk pētīti, komerciāli ražoti un gatavi izmantošanai industrijā.

1983. gadā *Abhat* [53] veica arī pētījumus ar materiāliem, ko iespējams izmantot latentās siltumenerģijas akumulācijai, un izstrādāja fāžu pārejas materiālu klasifikācijas koku, balstoties uz to ķīmisko sastāvu. *Abhat* [53] klasifikācijā ir trīs galvenās fāžu pārejas materiālu kategorijas: organiskie savienojumi; neorganiskie savienojumi; eitaktiskie savienojumi.

Vēl vienu fāžu pārejas materiālu klasifikāciju izstrādāja *Dieckmann* un *Heinrich* [54] (4.2. att.).

Visbiežāk sastopamie organiskie fāžu pārejas materiāli ir taukskābes un parafīni, tomēr kopumā parafīniem ir vairāk tādu īpašību, kas tos padara piemērotākus praktiskai izmantošanai. Parafīnu galvenās priekšrocības atbilstoši *Whiffen* un *Riffat* [55] secinātajam ir:

- pieejamība plašā kušanas temperatūru diapazonā;
- augsts fāžu maiņas (kušanas) siltums (aptuveni 120–200 kJ/kg lielākajai daļai vielu);
- nepiemīt būtiska pārdzesēšanās (atdzišana zem sacietēšanas temperatūras, saglabājot šķidru agregātstāvokli);
- ķīmiski stabili un pārstrādājami;
- ir iespējams savstarpēji sajaukt, kas ļauj koriģēt to kušanas temperatūras diapazonu.



4.2. att. Temperatūras un latentās entalpijas robežas dažāda veida cietviela-šķidrums tipa fāžu pārejas materiāliem [54].

Tomēr parafīniem ir arī daži trūkumi, piemēram, zema siltumvadītspēja [$\sim 0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], salīdzinoši lielāka tilpuma izmaiņa fāžu maiņas laikā un degtspēja. To siltumvadītspēja var tikt uzlabota, izmantojot alumīnija plāksnītes [56], oglekļa nanošķiedras [57], iestrādājot parafīnus tādos kompozītmateriālos kā parafīna / ekspandēta grafīta kompozīts [58]. Parafīnu degtspēju var novērst, pievienojot antipirēnus [59].

Komercializētiem parafīniem piemīt papildu pozitīvās īpašības, tās ir norādījis *Beatens* u. c. [60]. Īpašības, ko autors izcēlis attiecībā uz šiem materiāliem, ir: tie nav korozīvi; nav toksiski; tajos nenotiek fāžu segregācija.

Ņemot vērā *Beatens* u. c. [60] secināto, visplašāk izmantotie fāžu pārejas materiāli, izņemot parafīnus, ir taukskābes ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$). Šīm vielām ir augsts latentais fāžu pārejas siltums, nelielas tilpuma izmaiņas fāžu pārejas laikā un šaurš fāžu pārejas temperatūras diapazons. Visatpazīstamākās taukskābes var iedalīt sešās grupās: kapriliskās taukskābes; kapriliskābes; laurīnskābes; miristiskās taukskābes; palmitīnskābes; stearīnskābes. Oglekļa atomu skaits šajos savienojumos ir no 8 līdz 18. Kušanas temperatūras ir robežās no $16 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $65 \text{ }^\circ\text{C}$, savukārt kušanas latentais siltums ir robežās no 155 kJ/kg līdz 180 kJ/kg . Tomēr taukskābēs bāzēti fāžu pārejas materiāli ir aptuveni trīs reizes dārgāki nekā parafīnos bāzētie materiāli, un ir maz tādu taukskābju, kuru fāžu pārejas temperatūra ir tuvu $21 \text{ }^\circ\text{C}$, ko varētu izmantot pasīvajai dzesēšanai.

Neorganiskie fāžu pārejas materiāli ir sāļu hidrāti, metāliskie sakausējumi un kūstoši sāļi, tomēr visbiežāk tiek izmantoti sāļu hidrāti. Šiem savienojumiem ir salīdzinoši laba siltumvadītspēja (aptuveni $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) – vairāk nekā divas reizes augstāka nekā parafīniem) un augsta latentā enerģijas akumulācijas spēja $\sim 240 \text{ kJ/kg}$. Neorganiskie fāžu pārejas

materiāli savienojumā ar daudziem metāliem lielākoties ir korozīvi, un tiem piemīt pārdzesēšanās. Sāļu hidratī ir lētāki par parafīniem, taču tajā pašā laikā – nedaudz toksiski.

Sāļu hidratos bāzēti fāžu pārejas materiāli ir neorganisko sāļu un ūdens savienojumi kristāliskā formā ar vispārējo formulu $A \cdot nH_2O$, kur A ir sāls komponente. To fāžu maiņas temperatūra var tikt regulēta, mainot sāls ķīmisko sastāvu. Kušanas laikā sāls hidratš pārveidojas par sāls hidratu ar mazāku iekšējo ūdens saturu vai ūdeni un sāli bez iekšējā ūdens satura [51].

Kausētiem sāļiem ir augstāka kušanas enerģija, taču arī augstāka kušanas temperatūra, tādēļ tos var izmantot solārās enerģijas akumulācijai.

Eitaktiskie savienojumi ir fāžu pārejas materiāli, kas sastāv no diviem vai vairāk savienojumiem, kas sacietē vai kūst vienlaikus. Fāžu pārejas temperatūras diapazona šaurums, kas var tikt izmainīts, mainot katra materiāla daudzumu attiecību maisījumā, ir galvenā šo materiālu priekšrocība.

Iepriekšējie pētījumi fāžu pārejas materiālu jomā norāda, ka parafīnos un taukskābēs bāzēti fāžu pārejas materiāli var tikt izmantoti kopā ar pasīvajām dzesēšanas tehnoloģijām. Parafīnā bāzētiem materiāliem piemīt optimāla cenas un veiktspējas attiecība, kā arī ir pieejami daudzi komerciāli produkti ar dažādām fāžu pārejas temperatūrām. Šo īpašību salikums padara parafīnos bāzētus fāzes maiņas materiālus par piemērotiem izmantošanai pasīvās dzesēšanas sistēmās šī promocijas darba ietvaros.

Nākamajā nodaļā uzmanība ir vērsta uz enerģijas transportēšanas metodēm uz un no fāžu pārejas materiāla. Visās termālās enerģijas akumulatoru sistēmās, kas aprakstītas nākamajā nodaļā, par fāžu pārejas materiālu tiek izmantoti dažādi parafīni.

5. APSKATS PAR TERMĀLĀS ENERĢIJAS AKUMULATORU SISTĒMĀM, KAS BALSTĪTAS UZ FĀŽU PĀREJAS MATERIĀLIEM

Šajā nodaļā publicēts pārskats par iepriekšējiem pētījumiem latentu termālo akumulatoru jomā. Fāžu pārejas akumulatoru sistēmas var iedalīt divās kategorijās: pasīvās sistēmas; aktīvās sistēmas.

Pasīvās sistēmas ir attiecināmas uz fāžu pārejas materiālu iestrādi ēkas konstrukcijās, kur tie kalpo kā “termālā masa”, kas palīdz stabilizēt temperatūru telpās.

Aktīvās sistēmas visbiežāk izmanto kādu kontrolētu mehānismu, kas kontrolē enerģijas plūsmu uz un no fāžu pārejas materiāla.

5.1. Pasīvās PCM termālās enerģijas akumulatoru sistēmas

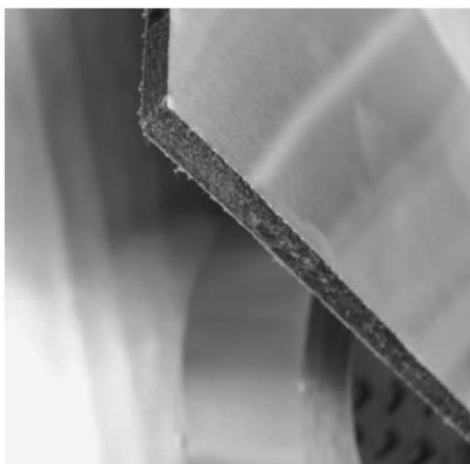
Vienkāršākais veids, kā integrēt fāžu pārejas materiālus ēku konstrukcijās, ir iemaisīt iekapsulētus fāžu pārejas materiālus apšuvuma paneļos, betonā u. c. vai iemērt šīs konstrukcijas šķidrā PCM materiālā un ļaut fāžu pārejas materiālam infiltrēties būvmateriāla porās. Šis ir salīdzinoši vienkāršs veids šo materiālu integrēšanai, un tam nav nepieciešami lieli papildu izdevumi. Šāda tipa metodes nav tik efektīvas, lai gan ir iespējams sasniegt arī vērā ņemamus enerģijas patēriņa ietaupījumus. *Hunger* u. c. [61] savos pētījumos ziņoja par 12 % enerģijas patēriņa samazinājumu, iejaucot betonā 5 % mikrokapsulētu fāžu pārejas materiālu.

Pasīvo termālās enerģijas akumulatoru galvenās priekšrocības ir zemākas izmaksas un enerģijas transporta sistēmas neesamība. Izmantojot šo sistēmu, visbiežāk fāžu pārejas materiāls tiek reģenerēts, izmantojot nakts ventilāciju jeb nakts dzesēšanu. Daudzos gadījumos šāda pieeja neļauj pilnībā izmantot termālā akumulatora potenciālu, jo ierobežotā siltumapmaiņas laukuma un siltumvadītspējas koeficientu dēļ fāžu pārejas materiāls nesacietē [62]–[64]. Tomēr ir arī daži piemēri ar ievērojamiem enerģijas ietaupījumiem [13], [65].

Fāžu pārejas materiālu integrācija apšuvuma paneļos ir izplatīta pieeja, un ir veikti daudzi simulāciju un eksperimentālie pētījumi, kuros ir vērtēta šo sistēmu efektivitāte [66]–[69]. *Kuznik* u. c. [66] veica pētījumu, lai pārbaudītu PCM sienu apšuvuma paneli, ko izstrādāja *Dupont de Nemours* biedrība (5.1. att.). Panelis bija veidots no 60 % mikrokapsulēta parafīna ar kušanas temperatūru aptuveni 22 °C.

Izmantojot simulāciju rezultātus, autori secināja, ka apšuvuma paneļa optimālais biezums ir 10 mm, kas ir piemērots telpas termālās enerģijas akumulēšanai pie diennakts temperatūras svārstībām no 18 °C līdz 26 °C 24 stundu periodā. Izmantojot šo 10 mm biezo apšuvuma paneli, bija iespējams dubultot telpas termālo inerci.

Berzin u. c. veica pētījumu par apšuvuma paneļiem ar iestrādātu fāžu pārejas materiālu izmantošanai kopā ar apkures sistēmu [65] un dzesēšanas sistēmu [13]. Veiktajā eksperimentālajā pētījumā tika izmantotas testa kameras.



5.1. att. *DuPont de Nemours* biedrības izstrādātais panelis (attēls no [66]).

Paneļu izmantošanai kopā ar apkures sistēmu komanda izmantoja vadības sistēmu, kas ņem vērā tā brīža enerģijas tarifu kombinācijā ar zemgrīdas apkuri un ģipškartona apšuvuma paneļiem, kuros ir iestrādāts iekapsulēts fāžu pārejas materiāls. Pētījuma rezultāti liecināja par 18,8 % enerģijas patēriņa ietaupījumu un 28,7 % izmaksu ietaupījumu piecu dienu mērījumu periodā.

Paneļu izmantošanai kopā ar dzesēšanas sistēmu tika izmantota nakts ventilācija kombinācijā ar gaisa dzesēšanas sistēmu un vadības sistēmu, kas ņem vērā tā brīža enerģijas tarifu. Rezultāti parādīja iespaidīgus 73 % enerģijas patēriņa ietaupījumus un 67 % izmaksu ietaupījumu vienas nedēļas mērījumu periodā. Tomēr vienlaikus komanda norādīja, ka tad, ja netiek izmantota pareiza vadības stratēģija, tāda pati sistēmu kombinācija var izraisīt arī enerģijas patēriņa pieaugumu.

Fāžu pārejas materiālu integrācija ārsienās var palīdzēt samazināt siltuma plūsmu no ārpusē uz iekštelpām vai akumulēt iešējos siltuma pieplūdus. Tas ir īpaši nozīmīgi vieglām koka vai metāla karkasa sienām.

Carbonari u. c. [70] veica eksperimentālu un simulāciju pētījumu prefabricētām “sendviča” sienām ar integrētiem fāžu pārejas materiāliem. Matemātiskais modelis uzrādīja ciešu korelāciju ar eksperimentālajiem mērījumiem. Komanda secināja, ka, iebūvējot fāžu pārejas materiālus “sendviča” sienās, var panākt efektu, ka šīs sienas termodinamiski atgādina augstas masivitātes sienas, vienlaikus saglabājot “sendviča” sienu priekšrocības (ātra un viegla izbūve un maza masa).

Evers u. c. [71] veica simulāciju pētījumu vieglas konstrukcijas karkasa sienām ar integrētiem fāžu pārejas materiāliem. Komanda noskaidroja, ka maksimālā siltuma plūsma virzienā no ārpusē uz telpām samazinājās par 9,2 % un diennakts vidējā siltuma plūsma samazinājās par 1,2 %.

Ārsienas ar konstrukciju siltumizolācija-PCM-siltumizolācija (pretestība-kapacitāte-pretestība) simulāciju pētījumā testēja *Halford* un *Boehm* [72]. Piedāvātā ārsienas konstrukcija bija paredzēta dzesēšanas slodžu izlīdzināšanai. Simulāciju modeļi paredzēja 11–25 % pīķa slodžu samazinājumu scenārijā ar termālo masu, taču bez fāžu pārejas materiāliem

sienā, un 19–57 % pīķa slodžu samazinājumu ar fāžu pārejas materiāliem, ja salīdzina ar sienu, kas sastāv tikai no siltumizolācijas.

Alawadhi [73] veica simulāciju pētījumu ķieģeļiem ar dobumiem, kas pildīti ar fāžu pārejas materiāliem. Pētījuma autori secināja, ka tad, ja ķieģeļa vidū ir izvietoti trīs fāžu pārejas materiāla cilindri, siltuma plūsma no ārpusē uz telpu samazinās par aptuveni 18 %.

Alawadhi un *Alqallaf* [74] pētīja jumta pārsegumu ar koniskas formas kabatām, kurās iepildīts fāžu pārejas materiāls. Autori secināja, ka siltuma plūsma no ārpusē uz telpu var tikt samazināta par 39 %.

5.2. Aktīvās PCM termālās enerģijas akumulatoru sistēmas

Aktīvā tipa termālās enerģijas akumulācijas sistēmas visbiežāk izmanto kādu siltuma plūsmas kontroles mehānismu, kas kalpo par siltummaini starp telpu un fāžu pārejas materiālu un/vai starp fāžu pārejas materiālu un dzesēšanas vai sildīšanas avotu.

Fāžu pārejas materiāla-gaisa tipa siltummaiņi ir viena no pētītākajām termālās enerģijas akumulācijas sistēmām. Šāda tipa sistēmas ļauj kontrolēt siltuma plūsmu uz un no fāžu pārejas materiāla, kā arī pilnībā izmantot enerģijas akumulatoru, izvēloties atbilstošu fāžu pārejas materiāla slāņa biezumu [75]–[77]. Arī dzesēšanas un sildīšanas enerģijas transports uz kondicionētajām telpām var tikt kontrolēts.

Jaworski u. c. [78], [79] veica eksperimentāli validētu simulāciju pētījumu, kurā tika apskatīts pie griestiem stiprināms fāžu pārejas materiāla-gaisa siltummainis, kas integrēts ventilācijas sistēmā. Siltummainis tika veidots no mikrokapsulēta fāžu pārejas materiāla un ģipša kompozīta. Termālās enerģijas akumulators bija paredzēts astoņu stundu karstuma vilnim, kurā āra gaisa temperatūra sasniedz 30 °C pēc 16 stundu reģenerācijas perioda, kura laikā āra gaisa temperatūra ir 16 °C. Karstuma viļņa laikā ventilācijas pieplūdes gaisa temperatūra nepārsniedza 24 °C, un fāžu pārejas materiāla kušanas temperatūra bija 22,8 °C.

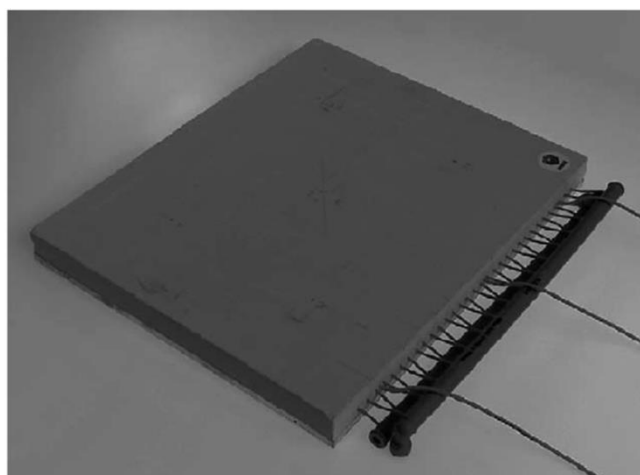
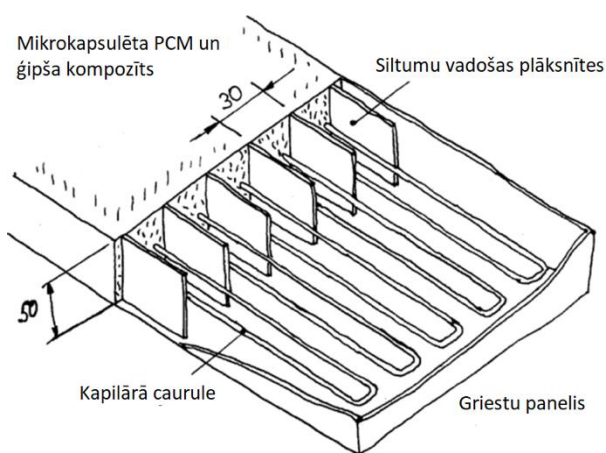
Borderon u. c. [80] veica apjomīgu simulāciju pētījumu 100 m² savrupēkai, kas tiek dzesēta ar ventilācijas pieplūdes gaisu no fāžu pārejas materiāla-gaisa siltummaiņa. Simulācijas tika veiktas četrās pilsētās Francijā: Lionā, Nicā, Trapā, Karpentras. Komanda noskaidroja, ka, izmantojot 700 kg fāžu pārejas materiāla akumulatoru, ir iespējams ierobežot pārkaršanu rezidencē līdz 8 % no laika gada griezumā (ja 26 °C pieņem par ierobežojumu). Galvenās problēmas, par ko ziņoja komanda, bija nespēja reģenerēt termālo akumulatoru siltās naktīs, kas radīja palielinātu ventilatora enerģijas patēriņu.

Plaši izplatīts aktīvo termālās enerģijas akumulatoru tips ir **dzesēšanas ierīces ar iebūvētu fāžu pārejas akumulatoru, piemēram, griestu paneli** vai pārsegumi ar iekapsulētiem fāžu pārejas materiāliem. Iepriekš minētās iekārtas visbiežāk ir termāli aktivizētas ar ūdens cauruļu tīklu, un dzesēšanas enerģija tiek piegādāta no centralizēta dzesēšanas centra ar pasīvā tipa vai aktīvā tipa dzesēšanas enerģijas avotu.

Izplatītākā metode ir izmantot dzesēšanas caurulīšu tīklu, kas izvietots blakus vai iemērķts paneļa vai pārseguma fāžu pārejas materiālā.

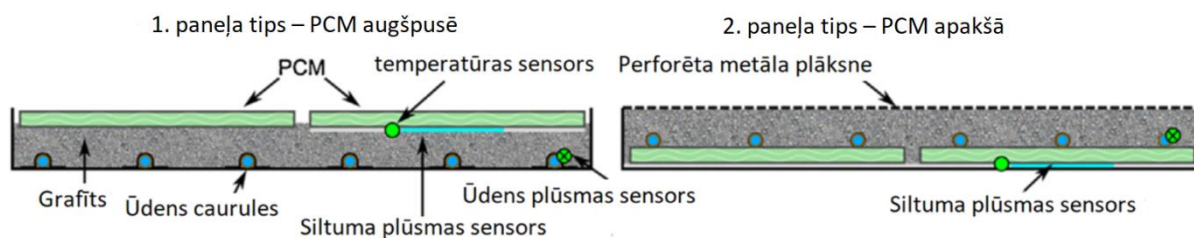
Koschenz un *Lehmann* [56] izstrādāja termāli aktivizētu griestu dzesēšanas paneli (5.2. att.) un veica simulāciju analīzi programmā *TRANSYS*. Izstrādātā paneļa siltuma

akumulācijas kapacitāte bija $0,3 \text{ kWh/m}^2$, un tas bija izgatavots no mikrokapsulēta fāžu pārejas materiāla (heptadekāna parafīna ar fāžu maiņas temperatūru aptuveni $22 \text{ }^\circ\text{C}$) un ģipša kompozīta. Lai uzlabotu paneļa siltumvadītspēju, tajā tika iestrādātas alumīnija plāksnes. Paneļa vidējā nomērītā siltumvadītspēja bija $1,1\text{--}1,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, blīvums – 1030 kg/m^3 , mikrokapsulētā fāžu pārejas materiāla saturs panelī – $13,3 \text{ kg/m}^2$. Eksperimenta rezultāti liecināja, ka panelis spēj akumulēt 40 W/m^2 siltuma plūsmu septiņas stundas un 30 minūtes, līdz fāžu pārejas materiāls izkusa.



5.2. att. PCM dzesēšanas panelis, ko izstrādāja Koschenz un Lehmann [56].

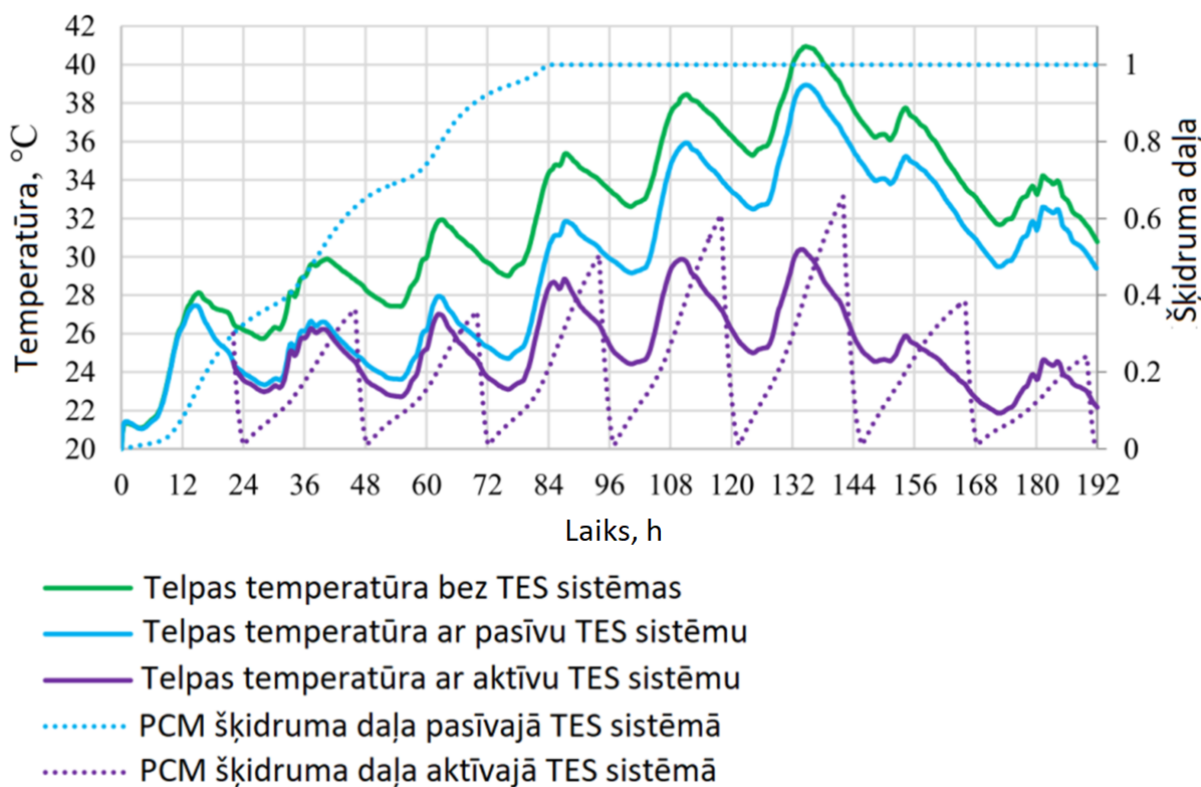
Weinlander u. c. [81] izstrādāja un eksperimentāli pārbaudīja divu veidu dzesēšanas griestu paneļus (5.3. att.). Pirmā tipa panelim fāžu pārejas materiāls tika izvietots virs cauruļvadu tīkla, otrā tipa panelim – zem cauruļvadu tīkla. Nomērītās pasīvās dzesēšanas jaudas bija robežās no 8 W līdz 17 W uz kvadrātmetru paneļa laukuma pie telpas temperatūras no $24 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Pasīvās dzesēšanas jauda pie $26 \text{ }^\circ\text{C}$ telpas temperatūras bija robežās no 10 W/m^2 līdz 15 W/m^2 atkarībā no siltuma pieplūdumiem. Fāžu maiņas temperatūra izmantotajiem materiāliem bija robežās no $22 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $24 \text{ }^\circ\text{C}$.



5.3. att. Dzesēšanas paneļi, ko izstrādāja Weinlander u. c. [81].

Līdzīgu pieeju mēģināja latviešu pētnieku komanda Ručevskis u. c. [82]–[84]. Autori veica detalizētu simulāciju pētījumu, izmantojot *CFD* tērauda dzesēšanas paneļiem ar fāžu pārejas materiāla konteineri. Šī tipa dzesēšanas paneļi ar integrētu fāžu pārejas materiāla akumulatoru tiek pētīti šī promocijas darba eksperimentālajā daļā (7. un 8. nodaļa), kurā rezultāti no eksperimentāli kalibrēta *IDA ICE* simulāciju modeļa tiek salīdzināti ar *CFD* simulācijas rezultātiem, ko ir ziņojuši Ručevskis u. c. [83], [84].

Šīs komandas pētītā paneļa siltumenerģijas akumulācijas kapacitāte bija 0,59 kWh/m² uz paneļa laukuma, un fāžu maiņas temperatūra bija aptuveni 23 °C. Simulācijā tika modelēti dzesēšanas paneļi ar 25 mm fāžu pārejas materiāla biezumu, kas pilnībā nosedz telpas griestu laukumu, simulācijas ilgums bija astoņas dienas. Telpas maksimālā temperatūra analizētajā periodā bija par 7 °C zemāka, izmantojot termāli aktivizētus paneļus, un par 2 °C zemāka, izmantojot pasīvos paneļus. Komanda secināja arī to, ka termāli aktivizētu paneļu gadījumā tika izmantoti tikai 66 % no fāžu pārejas materiālu akumulācijas kapacitātes, savukārt pasīvo paneļu gadījumā pēc 85 stundām fāžu pārejas materiāls bija pilnībā izkusis un turpmāko ciklu laikā nesacietēja (5.4. att.).



5.4. att. PCM temperatūra un izkusušā daļa Ručevskis u. c. [82]–[84] simulācijā.

6. APSKATS PAR SILTUMA PĀREJAS TEORIJU

Jaunu HVAC tehnoloģiju adaptēšanai un izstrādei ir nepieciešama padziļināta izpratne par siltuma pārejas procesiem, lai izstrādātu aprēķina metodes un simulāciju modeļus šiem komponentiem. Šī promocijas darba nodaļa ir paredzēta tādu siltumapmaiņas procesu apskatei, kas ir saistīta ar HVAC sistēmām (tostarp – dzesēšanas paneļiem ar integrētiem fāžu pārejas materiāliem).

Dabā ir trīs veidu siltumpārvades procesi – siltuma vadīšana, konvekcija un starošana.

Siltuma vadīšana notiek cietvielās, stacionāros šķidrumos un gāzēs, tvaika un gāžu robežslāņos. Siltuma vadīšanas process notiek molekulu un atomu savstarpēju sadursmju dēļ. Siltuma vadīšanu var aprakstīt, izmantojot Furjē siltuma vadīšana likumu, kas tika formulēts 1822. gadā. Viendimensionālam stacionāram gadījumam tas var tikt izteikts ar 6.1. vienādojumu.

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{Q_x}{A}, \quad (6.1.)$$

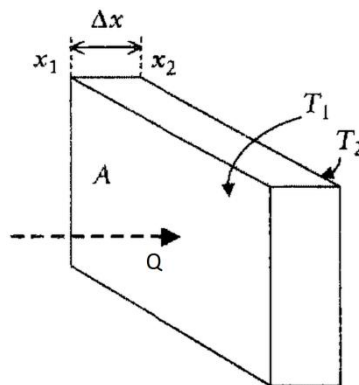
kur q_x – īpatnējā siltuma plūsma x koordinātas virzienā, W/m²;

λ – īpatnējā siltumvadītspēja, W/(m·K);

$\frac{dT}{dx}$ – temperatūras gradients, K/m;

Q_x – kopējā siltuma plūsma x koordinātas virzienā caur laukumu A (6.1. att.), W;

A – laukums, m².



6.1. att. Viendimensionāla siltuma plūsma [85].

Integrējot 6.1. vienādojumu, iegūst 6.2. vienādojumu.

$$Q \int_{x_2}^{x_1} dx = -\lambda A \int_{T_2}^{T_1} dT \rightarrow Q = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (6.2.)$$

kur Q – siltuma plūsma, W;

x_1 – 1. virsmas koordināta, m;

x_2 – 2. virsmas koordināta, m;

T_1 – 1. virsmas temperatūra, m;

T_2 – 2. virsmas temperatūra, m;

ΔT – temperatūras starpība ap slāni, m;

Δx – slāņa biezums, m.

Konvekcija notiek starp virsmu un kustīgu šķidrumu. Lai gan siltumapmaiņa robežslānī notiek siltuma vadīšanas ceļā, enerģijas pārnese ar vielas kustību ir tas, kas vada šo procesu.

Konvekciju var iedalīt divos veidos: dabīgā un piespiedu. Dabīgā konvekcija ir pašierosinoša, jo šķidrumu blīvums ir atkarīgs no temperatūras un šķidrumu vēsākie reģioni gravitācijas ietekmē tiek vilkti uz leju, siltākas šķidruma daļas izspiežot uz augšu. Piespiedu konvekcija veidojas ārēja spēka ietekmē, kas rada šķidruma plūsmu gar konvektīvo virsmu.

Konvekciju starp virsmu un šķidrumu var aprakstīt ar Ņūtona dzesēšanas likumu (6.3. vienādojums).

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}\Delta T, \quad (6.3.)$$

kur q_{conv} – īpatnējā siltuma plūsma starp virsmu un šķidrumu, W/m^2 ;

h_{conv} – konvektīvās siltumapmaiņas koeficients, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

ΔT – temperatūras gradients starp virsmu un šķidruma plūsmas vidējo temperatūru, K .

Konvektīvo siltumapmaiņas koeficientu novērtēšanu un konvekciju kā fizikālu procesu teorētiski aprakstīt ir tikpat kā neiespējami. Lai aprēķinātu konvekcijas siltumapmaiņu praktiskai izmantošanai, ir jālieto empīriskas formulas.

Konvektīvie siltumapmaiņas koeficienti praktiskai izmantošanai var atšķirties pat ar vairākām kārtām atkarībā no izmantotajiem šķidrumiem un sistēmas parametriem. Tipiskas vērtības ir redzamas 6.1. tabulā.

6.1. tabula

Tipiski konvektīvie siltumapmaiņas koeficienti

Konvekcijas veids, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Literatūras avots		
	<i>ASHRAE</i> Fundamentals [86]	<i>Goodfellow</i> un <i>Tahti</i> [85]	<i>Stoecker</i> un <i>Jones</i> [87]
Dabīga konvekcija, gāzes	2–25	3,5–50	5–25 (gaiss)
Dabīga konvekcija, šķidrumi	10–1000	–	50–100 (ūdens)
Piespiedu konvekcija, gāzes	50–20 000	10–500 (gaiss)	10–200 (gaiss)
Piespiedu konvekcija, šķidrumi	2500–100 000	100 – 5000	50–100 000 (ūdens)

Lai novērtētu konvektīvo siltumapmaiņu termodinamiskā sistēmā, tiek izmantots Nusselta skaitlis Nu . Sakarība starp Nusselta skaitli un konvektīvo siltumapmaiņas koeficientu var tikt izteikta ar 6.4. vienādojumu.

$$Nu = \frac{h_{\text{conv}}L}{\lambda} \rightarrow h_{\text{conv}} = \frac{Nu\lambda}{L}, \quad (6.4.)$$

kur Nu – Nusselta skaitlis;

L – virsmas garums (caurules diametrs vai hidrauliskais diametrs $d_h = \frac{4A}{P}$, kur A ir šķērsriezuma laukums un P ir apslāpētais perimetrs), m.

Piespiedu konvekcijai Nusselta skaitlis ir funkcija no Reinoldsa skaitļa un Prandtla skaitļa ($Nu = f(Re, Pr)$). Dabīgajai konvekcijai Nusselta skaitlis ir funkcija no Grashofa skaitļa un Prandtla skaitļa ($Nu = f(Gr, Pr)$). Pr ir Prandtla skaitlis (6.5. vienādojums), Gr ir Grashofa skaitlis (6.6. vienādojums) un Re ir Reinoldsa skaitlis (6.7. vienādojums).

$$Pr = \frac{v\rho c_p}{\lambda}, \quad (6.5.)$$

kur Pr – Prandtla skaitlis;
 v – kinemātiskā viskozitāte, m²/s;
 ρ – šķidrums blīvums, kg/m³;
 c_p – šķidrums siltumietilpība, J/(kg·K).

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{v^2}, \quad (6.6.)$$

kur Gr – Grashofa skaitlis;
 g – zemes gravitācijas brīvās krišanas paātrinājums, 9,806 65 m/s²;
 β – termiskās izplešanās koeficients, 1/K.

$$Re = \frac{uL}{\nu}, \quad (6.7.)$$

kur Re – Reinoldsa skaitlis;
 u – plūsmas ātrums, m/s.

Praktiskiem aprēķiniem pastāv daudz empīrisku korelāciju $Nu = f(Re, Pr)$ un $Nu = f(Gr, Pr)$ vispārējām situācijām, tomēr nestandarta situācijās tās aprēķināt ir sarežģīti.

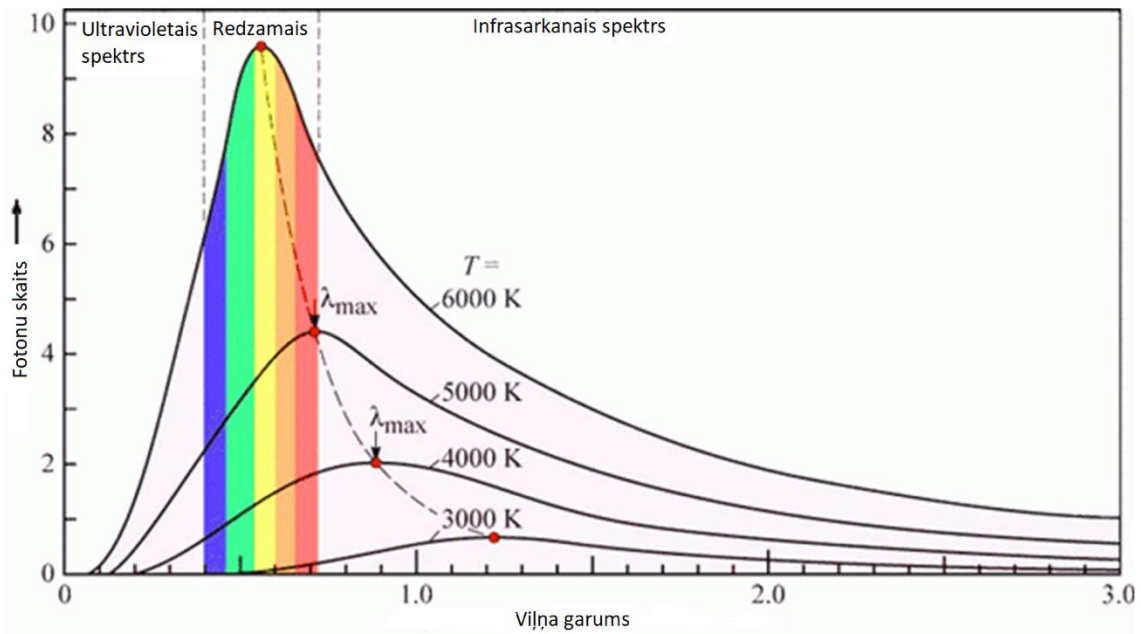
Starošana jeb radiācija ir siltumapmaiņas process, ko raksturo:

- Planka radiācijas likums, kas apraksta radiācijas enerģijas sadalījumu spektrā;
- Stefana–Bolcmaņa likums, kas apraksta enerģiju, ko izstaro melns ķermenis;
- Vīna likums, kas apraksta maksimālā viļņa garuma produktu (jeb viļņa garuma pīķi izstarotajai radiācijai pie dažādām temperatūrām).

Stefana–Bolcmaņa likumu un Vīna likumu var atvasināt no fundamentālāka Planka radiācijas likuma.

Planka radiācijas likums apraksta katra punkta atrašanās vietu (6.2. att.). Savukārt Stefana–Bolcmaņa likums apraksta laukumu, ko katra sadalījuma līnija veido attiecībā pret abscisas asi (6.2. att.; šis laukums ir arī kopējā emitētā enerģija). Vīna likums apraksta katras sadalījuma līknes ekstrēmu (virsošni) (6.2. att.).

Stefana–Bolcmaņa likuma izmantošana inženiertehniskajos aprēķinos ir jāveic, paturot prātā, ka šis likums apraksta kopējo enerģijas izstarošanu visā spektrā un ka emisivitātes lielumi, kas ir doti literatūrā, apraksta kopējo vērtību visā spektrā.



6.2. att. Melna ķermeņa izstarotās radiācijas spektrālais sadalījums (attēls no [88]).

Šie teorētiskie pamati ir nepieciešami, lai attīstītu jaunas latentās siltumenerģijas akumulācijas sistēmas, un ir īpaši būtiski, radot komponentu matemātiskās reprezentācijas jeb simulāciju modeļus, lai paredzētu šo komponentu darbību dažādos apstākļos.

7. METODOLOĢIJA

Šī promocijas darba eksperimentālā daļa fokusēta uz eksperimentāli validēta vienādojumus balstīta simulācijas modeļa izstrādi dzesēšanas panelim ar iebūvētu latentu siltumenerģijas akumulatoru. Šis dzesēšanas panelis veidots no nerūsējošā tērauda konteinera, kas ir pildīts ar fāžu pārejas materiālu, kurā atrodas ūdens caurulīšu tīkls. Konkrētais panelis tika iepriekš izstrādāts saistībā ar Eiropas Reģionālās attīstības fonda pētniecības projektu Nr. 1.1.1.1/16/A/007 “Jauna koncepcija ilgtspējīgas, zema energopatēriņa ēku būvniecībai”.

Pētījumam ir izvirzīti četri galvenie uzdevumi:

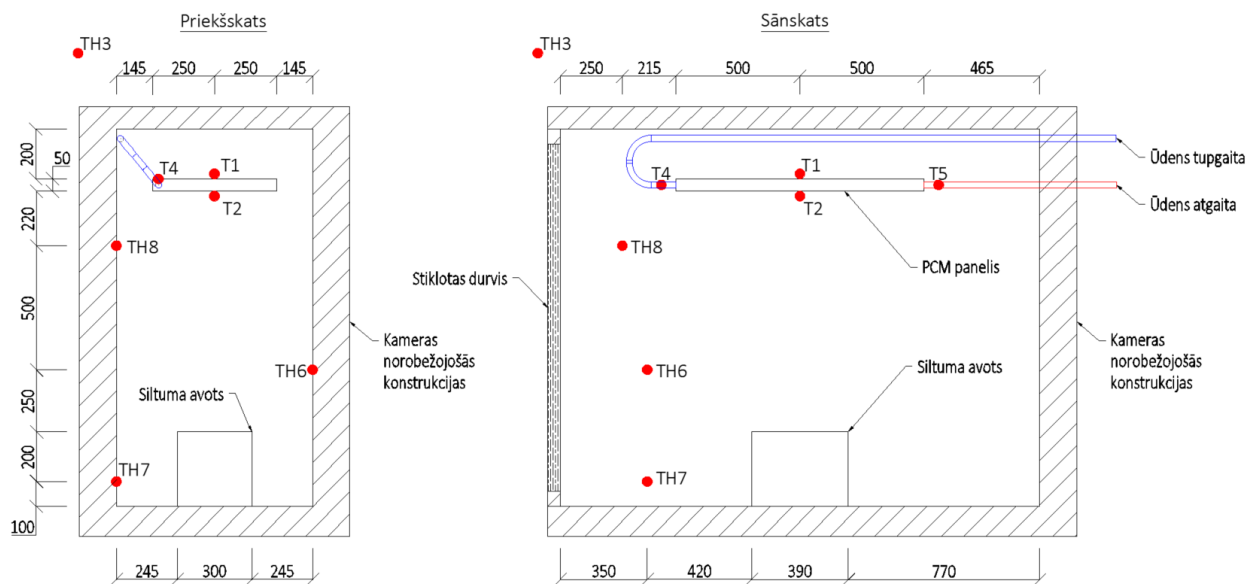
- netiešā veidā izmērīt siltuma zudumu koeficientu eksperimentālajai kamerai līdzsvara stāvoklī, izmantojot temperatūras mērījumus kameras iekšpusē, ārpusē un mērījumus par siltuma pieplūdumu intensitāti;
- veikt virkni eksperimentu kamerā dažādos iekšējā siltuma pieplūdumu scenārijos bez dzesēšanas paneļa un ar dzesēšanas paneli, kas ir pieslēgts dzesēšanas ūdens plūsmai;
- validēt *IDA ICE 4.8* [89], [90] simulāciju programmā izstrādāto dzesēšanas paneļa simulāciju modeli ar mērījumiem testa kamerā;
- veikt salīdzinošo pētījumu, izmantojot validēto paneļa simulāciju modeli un salīdzināt tā ģenerētos rezultātus ar rezultātiem, kas iepriekš tika iegūti *CFD* simulācijā, ko veica Ručevskis u. c. [83], [84].

7.1. Eksperimenta apraksts

Lai veiktu nepieciešamos mērījumus, šim eksperimentam izstrādāta eksperimentālā kamera (7.1. att.). Kameras siltuma zudumu koeficients tika netiešā veidā izmērīts, tajā ievietojot siltuma avotu ar 90,1 W jaudu. Temperatūra kameras iekšpusē un ārpusē tika reģistrēta. Kad iestājās stacionārs stāvoklis un temperatūra kamerā bija nostabilizējusies, tika aprēķināts kameras siltuma zudumu koeficients, izmantojot temperatūras starpību un siltuma avota jaudu. Aprēķinātais siltuma zudumu koeficients bija $H_t = 8,06 \text{ W/K}$.

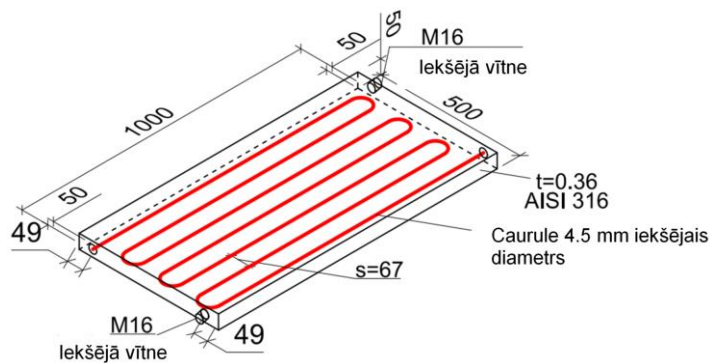
Eksperimentālā kamera tika aprīkota ar astoņiem temperatūras/mitruma sensoriem (7.1. att.) dažādās vietās:

- T1 – virsmas temperatūras sensors uz paneļa augšējās virsmas;
- T2 – virsmas temperatūras sensors uz paneļa apakšējās virsmas;
- TH3 – apkārtējās vides gaisa temperatūra un mitruma sensors;
- T4 – virsmas temperatūras sensors turpgaitas ūdens caurulei;
- T5 – virsmas temperatūras sensors atgaitas ūdens caurulei;
- TH6 – gaisa temperatūra un mitruma sensors kameras vidējā daļā;
- TH7 – gaisa temperatūra un mitruma sensors kameras apakšējā daļā;
- TH8 – gaisa temperatūra un mitruma sensors kameras augšējā daļā.



7.1. att. Eksperimentālā kamera.

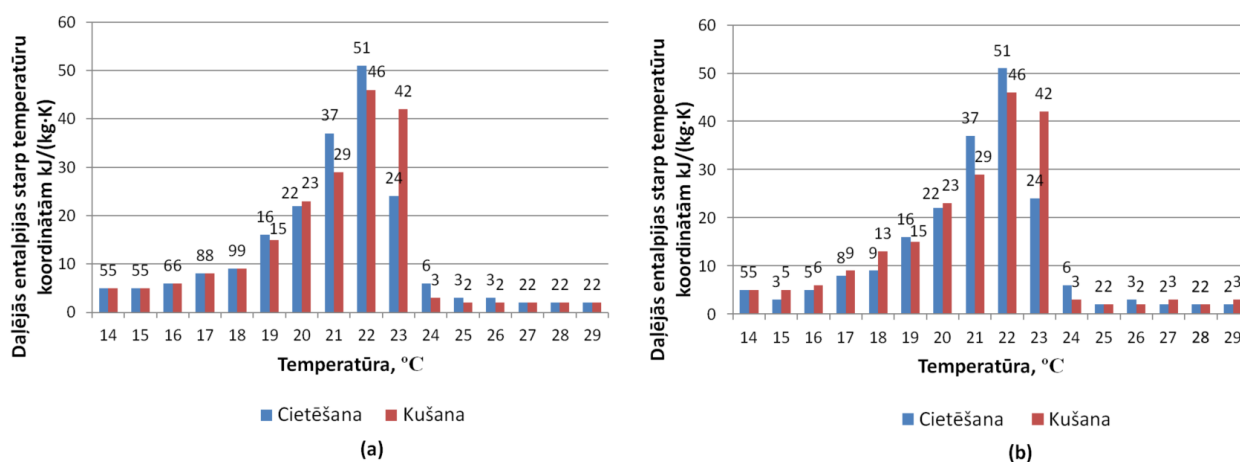
Dzesēšanas panelis sastāv no nerūsējošā tērauda konteinerā ar iekšēju ūdens cauruļvadu tīklu (7.2. att.). 80 % no paneļa tilpuma ir pildīti ar *RUBITHERM© RT22HC* [91] fāžu maiņas materiālu. Ņemot vērā ražotāja tehniskos datus, materiāla siltumenerģijas akumulācijas spēja ir 190 kJ/kg temperatūras diapazonā no 14 °C līdz 29 °C, kas teorētiski atbilst akumulācijas kapacitātei 1,48 kWh/m² paneļa laukuma. Paneļa darbības laikā tā temperatūra visbiežāk būs robežās no 19 °C līdz 24 °C, tāpēc fāžu pārejas materiāla faktiskā siltumenerģijas akumulācijas spēja ir tikai 140 kJ/kg, paneļa siltumenerģijas akumulācijas spēja – 1,09 kWh/m² paneļa laukuma.



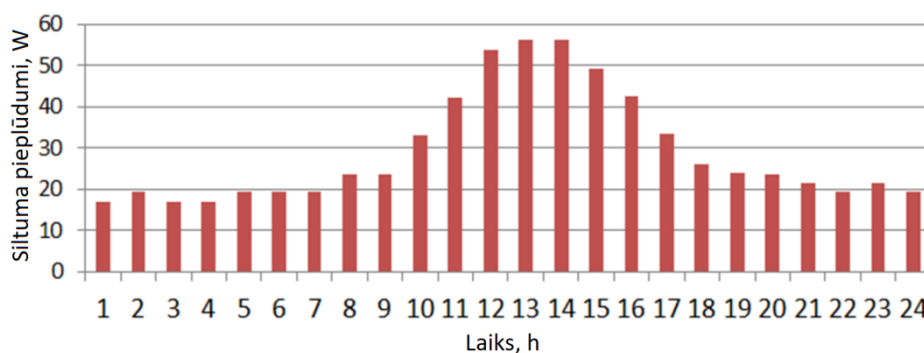
7.2. att. Dzesēšanas panelis (izmēri milimetros).

Atbilstoši ražotāja norādījumiem [91] izmantotajam fāžu pārejas materiālam pastāv mērījumu kļūda starp fāžu maiņas entalpiju kušanai [208 kJ/(kg·K)] un sacietēšanai [197 kJ/(kg·K)] temperatūras diapazonā no 14 °C līdz 29 °C. Entalpijas modelī tika veiktas nelielas korekcijas, lai tam būtu vienāda fāžu maiņas entalpija gan kušanai, gan sacietēšanai. Ražotāja tehniskie dati par materiāla entalpijas mērījumiem un koriģētais entalpijas modelis redzams 7.3. attēlā.

Paneļa iekšpusē atrodas nerūsējošā tērauda ūdens cauruļu tīkls ar cauruļu iekšējo diametru 4,5 mm un 67 mm soli starp caurulēm. Lai simulētu paneļa veikspēju kamerā, tika izmantots arī mākslīgs siltumenerģijas avots. Siltuma pieplūdumu stundu grafiks redzams 7.4. attēlā.



7.3. att. Koriģētais (a) un ražotāja norādītais (b) entalpijas modelis fāžu pārejas materiālam.



7.4. att. Siltuma pieplūdumu grafiks.

Simulāciju modelis eksperimentālajai sistēmai (testa kamera un apkārtējā telpa) tika izstrādāts *IDA ICE 4.8*.

Iepriekš nomērītais siltuma zudumu koeficients H_t tika izmantots, lai koriģētu kameras sienu U vērtības simulāciju modelī. Simulācijās apkārtējās vides temperatūra tika uzturēta tāda, kāda tā tika nomērīta eksperimentu laikā. Tehnisku iemeslu dēļ simulāciju modelī nebija iespējams iekļaut starojuma (radiācijas) siltuma apmaiņu starp apkārtējo vidi un simulācijas kameras konstrukcijām. Laboratorijas telpas ārsienā bija logi, kas arī ir siltuma starojuma avots. Šī starojuma intensitāte un telpas virsmu temperatūras eksperimentu laikā netika reģistrētas, līdz ar to tās nebija iespējams iekļaut simulāciju modelī.

Dzesēšanas panelis tika modelēts kā ūdens cauruļvadu tīkls, kas ir savienots ar fāžu pārejas materiāla slāņiem. Paneļa sieniņa tika termāli savienota ar eksperimentālo kameru, izmantojot kombinētu radiācijas un konvekcijas siltumapmaiņas koeficientu.

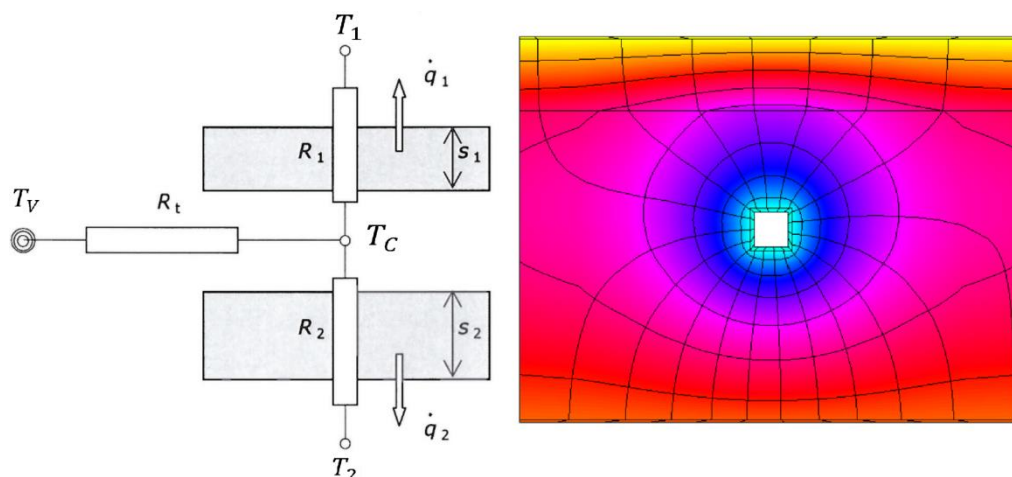
Kopējais starojuma un konvektīvais siltumapmaiņas koeficients validācijas laikā tika koriģēts uz $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, kas dabīgajai konvekcijai ir salīdzinoši augsta vērtība. Taču šī koeficienta vērtībai nebija izšķirošas nozīmes, jo siltumenerģijas plūsmu uz dzesēšanas

cauruļvadu tīklu galvenokārt nosaka fāžu pārejas materiāla siltumvadītspējas koeficients, kas ir salīdzinoši zems [$\lambda = 0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$].

Fāžu pārejas materiāla slānis tika modelēts, izmantojot entalpijas-temperatūras koordinātu tīklu, kur katrai temperatūras koordinātai ir atšķirīga entalpijas vērtība atkarībā no tā, vai materiālā notiek kušanas vai sacietēšanas process. Šis matemātiskais modelis sastāv no 16 temperatūras-entalpijas koordinātu punktiem diapazonā no $14 \text{ }^\circ\text{C}$ līdz $29 \text{ }^\circ\text{C}$, kas atbilst fāžu pārejas materiālam *RUBITHERM*© *RT22HC* [91].

Ūdens caurulīšu tīkls modelī tika atveidots kā plakne, kas atdod dzesēšanas enerģiju fāžu pārejas materiālam, ņemot vērā siltumapmaiņas koeficientu un tā brīža temperatūras starpību starp šo slāni un vidējo temperatūru fāžu pārejas materiālā. Siltumapmaiņas koeficients starp dzesēšanas šķidrumu un fāžu pārejas materiālu tika aprēķināts, izmantojot programmu *U-NORM 2012-2*, kas izmanto galīgo pretestību modeli un spēj aprēķināt temperatūras sadalījumu divu un trīs dimensiju problēmām, ņemot vērā enerģijas bilanci.

Cauruļvadu tīkla aproksimācija uz slāni, izmantojot fiktīvu siltumapmaiņas koeficientu, tika veikta atbilstoši metodoloģijai, kas aprakstīta standartā *EN 15377-1* [92]. Fiktīvais siltumapmaiņas koeficients R_t raksturo pretestību, kas rodas starp vidējo temperatūru cauruļvadu tīklā un fāžu pārejas materiāla slāņa vidējo temperatūru. Relatīvais temperatūras sadalījums un aprēķina princips redzams 7.5. attēlā, kur T_v – vidējā siltumnesēja temperatūra cauruļvadu tīklā, R_t – fiktīva siltumpretestība cauruļvadu tīkla aproksimācijai par slāni, T_c – fiktīvā slāņa vidējā temperatūra, T_1, T_2 un R_1, R_2 – konstrukcijas virsmu temperatūras un siltumpretestības slāņiem, kas atrodas virs un zem cauruļvadu tīkla un tiek aprēķinātas, izmantojot *IDA ICE* aprēķinu dzinēju. Aprēķinātais fiktīvais siltumpretestības koeficients – $1/R_t = 11,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

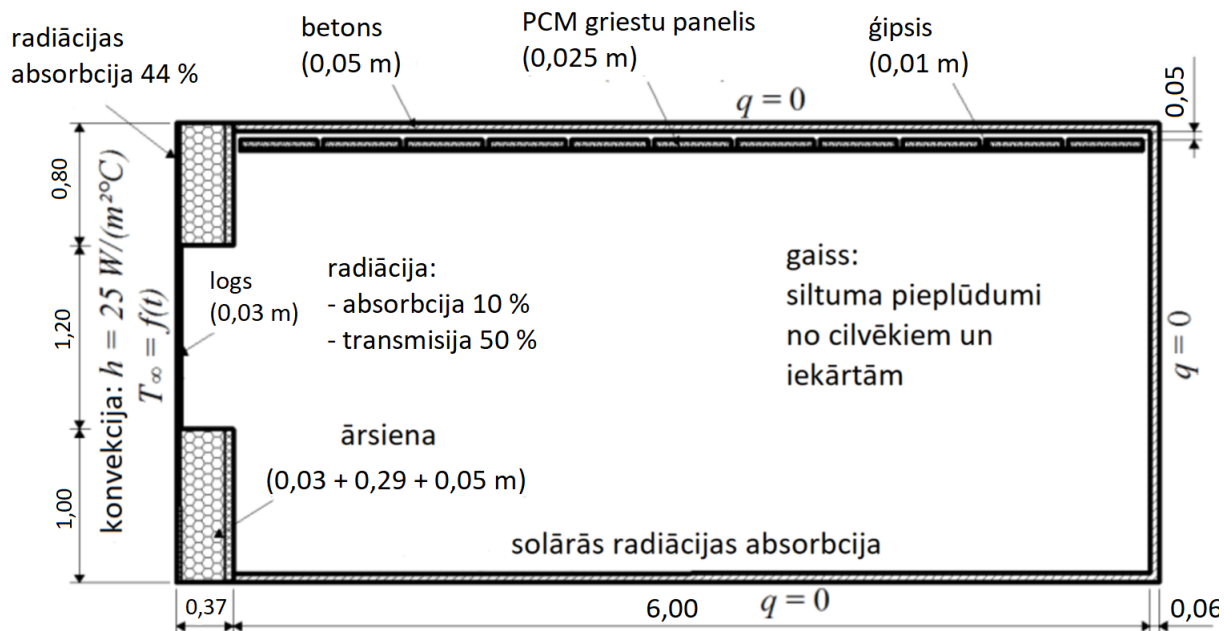


7.5. att. Siltumpretestību tīkls ūdenssildāmās virsmu apkures un dzesēšanas sistēmās [92] un relatīvais temperatūras sadalījums dzesēšanas panelī.

7.2. Simulāciju modelis veiktspējas modelēšanai

Lai modelētu fāžu pārejas pētāmo dzesēšanas paneli realitātei pietuvinātā situācijai, tika izlemts replicēt simulācijas scenāriju no iepriekšēja pētījuma, ko veica Ručevskis u. c. [83], [84].

Šis pētījums tika izvēlēts, jo tajā pētīts panelis ar ļoti līdzīgu uzbūvi un tādu pašu fāžu pārejas materiālu. Ručevskis u. c. [83], [84] veica paneļa simulāciju, izmantojot *CFD* (*Fluent*). Vispārējs Ručevska u. c. [83], [84] veiktās simulācijas ievaddatu apkopojums redzams 7.6. attēlā. Par ārējām robežvērtībām tika izmantota āra gaisa temperatūra un saules radiācija tipiskam astoņu vasaras dienu periodam Rīgā.



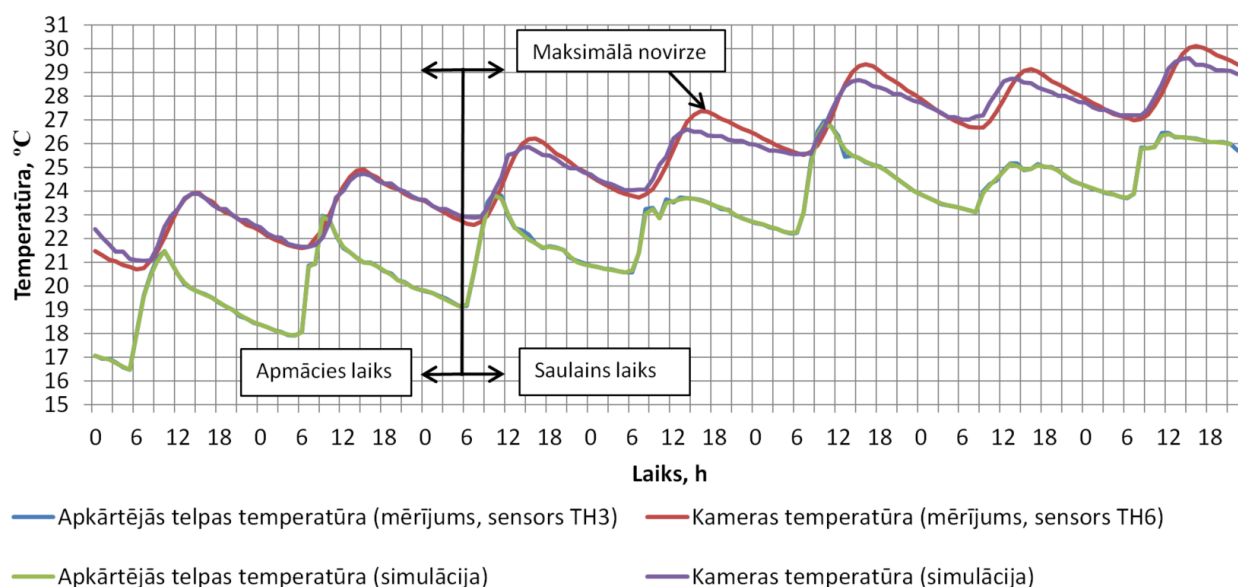
7.6. att. Ručevskis u. c. [83], [84] izmantotais simulācijas modelis.

8. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

8.1. Simulācijas modeļa verifikācija

Pēc eksperimentālās kameras modeļa konstrukciju U vērtības korekcijas atbilstoši nomēritajām vērtībām simulācija tika veikta septiņu dienu periodam, tās rezultāti salīdzināti ar kameras mērījumiem šim pašam laika periodam. Simulētā gaisa temperatūra eksperimentālajā kamerā ļoti labi sakrita ar mērījuma rezultātiem – maksimālā deviance starp mērījumiem un simulāciju rezultātiem bija mazāka nekā $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Viens no iespējamiem skaidrojumiem šai neatbilstībai ir fakts, ka telpā, kurā notika eksperiments, bija salīdzinoši liels stiklojums. Tehnisku ierobežojumu dēļ radiācijas siltuma plūsma no stiklotajām virsmām netika mērīta, līdz ar to arī netika izvērtēta simulācijā. Tas izskaidro arī to, kādēļ pirmajās divās eksperimenta dienās simulācijas modelis gandrīz ideāli sakrita ar mērījumu rezultātiem, savukārt nākamajās dienās parādījās novirze (8.1. att.). Pirmās divas dienas pārsvarā bija mākoņainas, savukārt nākamās dienas – pārsvarā saulainas.

Starp simulāciju rezultātiem un mērījumiem pastāv augsts Pīrsona korelācijas koeficients – $0,98$ un salīdzinoši neliela vidējā kvadrātiskā kļūda – $0,53\text{ }^{\circ}\text{C}$.



8.1. att. Simulācijas rezultāti un mērījumi – scenārijs bez dzesēšanas paneļa.

8.2. Simulāciju modelis ar PCM dzesēšanas paneli un dzesēšanas ūdens pieslēgumu

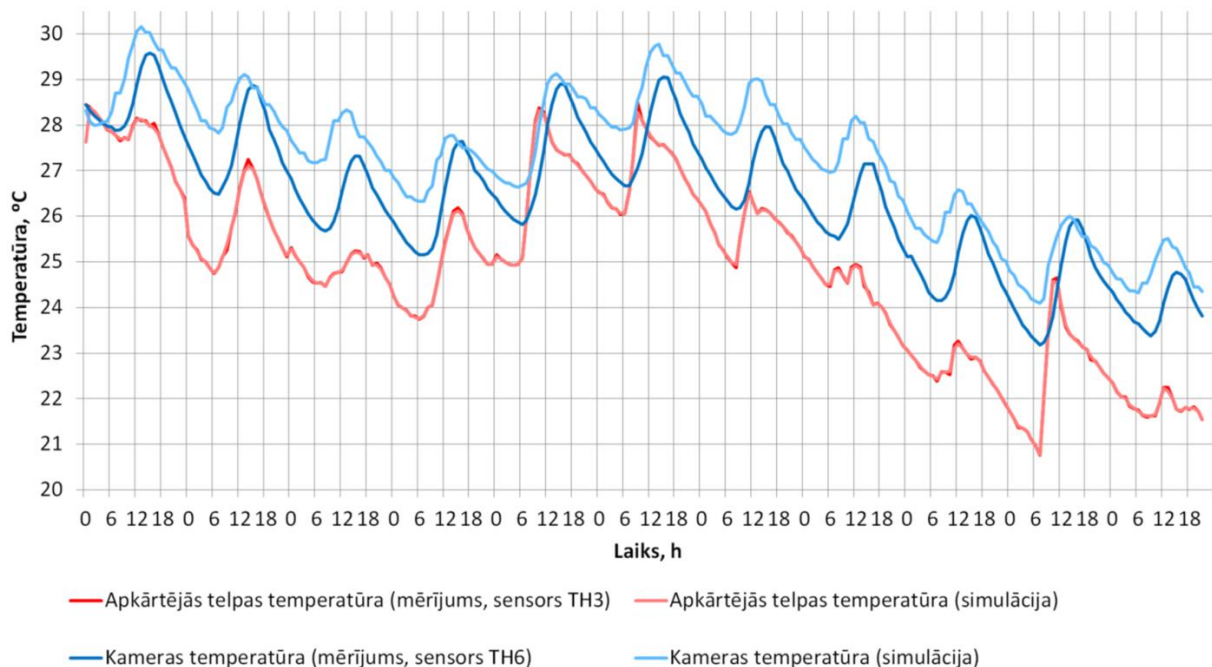
Pēc tam, kad testa kameras norobežojošās konstrukcijas tika nokalibrētas un, balstoties uz rezultātiem, varēja secināt, ka eksperimentālās kameras simulācijas modelis pietiekami labi raksturo īsto eksperimentālo kameru, tika izvēlēts 11 dienu periods dzesēšanas paneļa simulācijai (8.2. att.).

Simulācijas modeli papildinot ar dzesēšanas paneli, neatbilstība starp simulācijas rezultātiem un eksperimentālajiem mērījumiem palielinājās – maksimālā novirze starp mērījumiem un simulāciju rezultātiem pieauga līdz 2 °C, vidējā kvadrātiskā kļūda palielinājās līdz 1,01 °C. Šo nesaisti var daļēji skaidrot ar temperatūras sensoru precizitātes ierobežojumiem un faktu, ka radiantā siltumapmaiņa netika pilnībā modelēta. Tomēr, kad tika salīdzināta visu 11 dienu vidējā temperatūra, atbilstība starp mērījumiem un simulācijas rezultātiem bija labāka – vidējā kameras temperatūra simulācijā bija 26,4 °C pret 25,2 °C atbilstoši mērījumiem, kas veido 1,2 °C starpību.

Šajā eksperimentā sasniegtā simulācijas precizitāte pret eksperimentālajiem mērījumiem ir relatīvi augsta, ja to salīdzina ar līdzīgiem pētījumiem, kur dinamisko simulācijas programmu rezultāti ir salīdzināti ar mērījumiem.

Pētnieku komanda no Austrijas veica validācijas pētījumu [93] četriem dažādiem dinamisko simulāciju rīkiem (tostarp *IDA ICE*) un salīdzināja simulāciju rezultātus ar mērījumiem – maksimālā deviance starp mērījumiem un simulācijas rezultātiem bija robežās no ~3,5 °C līdz ~4,7 °C, vidējā kvadrātiskā kļūda bija robežās no ~0,5 °C līdz ~2,5 °C viena gada periodā.

Arī pētnieku komanda no Itālijas veica līdzīgu pētījumu, izmantojot *IDA ICE* [94] divām kamerām ar pasīvā tipa fāžu pārejas materiālu termālo akumulatoru. Kad mērījumi tika salīdzināti ar simulācijas rezultātiem astoņu dienu periodā, vidējā kvadrātiskā kļūda kamerai bez fāžu pārejas materiāliem bija 2,50 °C, vidējā kvadrātiskā kļūda kamerai ar fāžu pārejas materiāliem – 1,83 °C.



8.2. att. Gaisa temperatūra telpā un eksperimentālajā kamerā, mērījumi pret simulāciju rezultātiem.

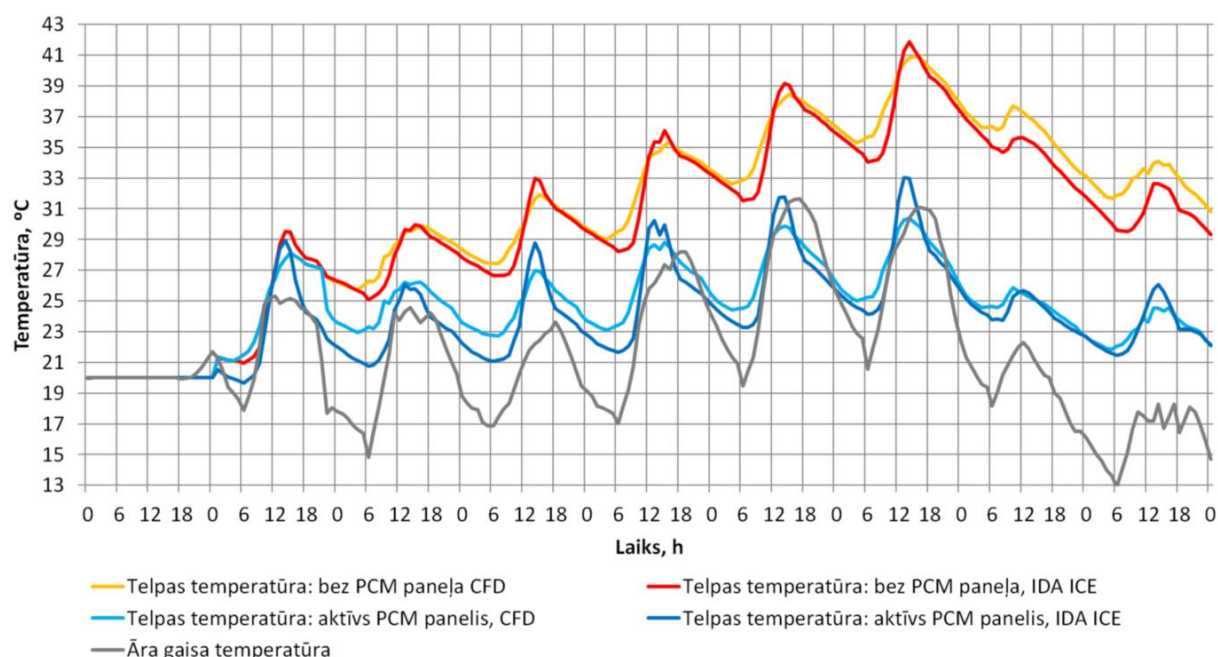
8.3. Veiktspējas modelēšana – salīdzinošais pētījums

Abas simulācijas sniedza diezgan līdzīgus rezultātus (8.3.att.). Maksimālā telpas temperatūra scenārijam bez dzesēšanas paneļiem *CFD* simulācijā sasniedza 40,8 °C, *IDA ICE* simulācijā – 41,8 °C. Scenārijā ar termāli aktivizētiem dzesēšanas paneļiem *CFD* simulācijā telpas temperatūra sasniedza 30,4 °C, *IDA ICE* simulācijā – 33,0 °C.

Salīdzinot telpas vidējo temperatūru visā simulācijas periodā, abu simulāciju rezultāti korelēja labāk. Visa perioda vidējā telpas temperatūra scenārijā bez dzesēšanas paneļiem bija 32,1 °C *CFD* simulācijā un 31,5 °C *IDA ICE* simulācijā (atšķirība – 0,6 °C). Scenārijā ar termāli aktivizētiem dzesēšanas paneļiem visa perioda telpas vidējā temperatūra bija 25,2 °C *CFD* simulācijā un 24,5 °C *IDA ICE* simulācijā (atšķirība – 0,7 °C). Vidējā kvadrātiskā kļūda, *IDA ICE* simulācijas rezultātus salīdzinot ar *CFD* simulāciju, ir 1,13 °C scenārijam bez *PCM* paneļiem un 1,31 °C scenārijam ar termāli aktivizētiem paneļiem.

Atbilstība starp *CFD* simulācijas rezultātiem un dinamiskās simulācijas rezultātiem ir līdzīga, kā tas ir ticis ziņots citos pētījumos [93].

Simulācijas perioda vidējo temperatūru atšķirība abām simulācijām ir salīdzinoši neliela (mazāka par 1 °C), ko var uzskatīt par maznozīmīgu izmantošanai enerģijas simulācijām gada griezumā. Tomēr pīķa temperatūru nesaiste sasniedz aptuveni 2,5 °C.



8.3. att. Telpas temperatūras salīdzinājums *CFD* simulācijā un *IDA ICE* simulācijā.

8.4. Rezultātu kopsavilkums

Saistībā ar promocijas darbu tika veikti četri simulāciju eksperimenti.

Pirmā eksperimentālās kameras simulācija tika veikta bez dzesēšanas paneļa, lai apstiprinātu pieņēmumu, ka pašas eksperimentālās kameras un apkārtējās telpas simulācijas modelis ir precīza realitātes reprezentācija. Šī simulācijas eksperimenta laikā tika konstatēts, ka tehnisku ierobežojumu dēļ simulācijas modelī nebija iespējams izvērtēt īso un garo viļņu

siltumenerģijas starojumu no telpas logiem. Pirmajās divās simulācijas perioda dienās, kas bija pārsvarā mākoņainas, simulācijas rezultāti un mērījumi sakrita gandrīz perfekti, savukārt nākamo dienu laikā, kas bija saulainas, starp simulācijas rezultātiem un mērījumiem parādījās nelielas atšķirības.

Ekspierimentālās kameras otrais simulācijas eksperiments tika veikts jau ar *PCM* dzesēšanas paneli, lai validētu izstrādāto paneļa simulācijas modeli ar mērījumu rezultātiem. Simulācijas modeli papildinot ar šo paneli, maksimālā simulācijas rezultātu novirze un vidējā kvadrātiskā kļūda attiecībā pret mērījumiem pieauga (8.1. tab.), tomēr sasniegtā precizitāte ir augstāka nekā līdzīgos pētījumos iepriekš.

Trešais un ceturtais simulāciju eksperiments tika veikts, lai salīdzinātu izstrādātā modeļa rezultātus ar rezultātiem, kas iegūti jau iepriekš veiktā *CFD* simulācijas pētījumā. Maksimālās novirzes un vidējās kvadrātiskās kļūdas vērtības bija līdzīgas kā pirmajā un otrajā simulācijas eksperimentā (8.1. tab.).

Līdz ar to var secināt, ka otrajā un ceturtajā eksperimentā iegūto rezultātu precizitāte raksturo izstrādātā simulāciju modeļa faktisko precizitāti.

8.1. tabula

Simulāciju rezultātu statistisko indikatoru apkopojums

Statiskais indikators	Šī pētījuma sasniegtā vērtība	Vērtības, kas sasniegtas citos pētījumos
Simulāciju rezultāti pret mērījumu rezultātiem – eksperiments bez paneļa		
D_{max}	mazāk nekā 1 °C	–
D_{avg}	–	–
r	0,98	–
$RMSE$	0,53 °C	–
Simulāciju rezultāti pret mērījumu rezultātiem – eksperiments ar paneli		
D_{max}	2,2 °C	<i>Nageler</i> u. c. no ~3,5 °C līdz ~4,7 °C [93]; <i>Cornaro</i> u. c. 2,5 °C [94]
D_{avg}	1,2 °C	–
r	0,95	–
$RMSE$	1,01 °C	<i>Nageler</i> u. c. no ~0,5 °C līdz ~1,8 °C [93]; <i>Cornaro</i> u. c. 1,83 °C [94]
<i>IDA ICE</i> pret <i>CFD</i> – eksperiments bez paneļiem		
D_{max}	1 °C	–
D_{avg}	0,6 °C	–
r	0,98	–
$RMSE$	1,1 °C	–
<i>IDA ICE</i> pret <i>CFD</i> – eksperiments ar paneļiem		
D_{max}	2,6 °C	–
D_{avg}	0,7 °C	–
r	0,93	–
$RMSE$	1,3 °C	–

8.5. Izstrādātā modeļa ierobežojumi

Izstrādātais paneļa modelis izmanto kombinētu radianto un konvektīvo virsmas siltuma pārejas koeficientu un aplēstā siltumapmaiņa starp apkārtējo vidi un paneli ir 80 % konvektīva un 20 % radianta, tāpēc arī izstrādāto simulāciju modeli būtu vēlams izmantot līdzīgās situācijās.

Panelis ir validēts 40 mm biežam fāžu pārejas materiāla slānim (20 mm virs cauruļvadu tīkla un 20 mm zem cauruļvadu tīkla). Iekšējās gravitācijas plūsmas fāžu pārejas materiāla šķidrā stāvoklī nav ņemtas vērā. Fāžu pārejas materiāls nav modelēts, izmantojot galējo pretestību modeli, bet gan kā viens slānis ar vienmērīgu temperatūras un materiāla stāvokļa sadalījumu. Veicot simulācijas ar šo modeli, nav ieteicams izmantot fāžu pārejas materiāla slāņa biezumu, kas ir lielāks par 20 mm virs un 20 mm zem cauruļvadu tīkla.

Cauruļvadu tīkls tika modelēts atbilstoši standartam *EN 15377-1* [92], izmantojot fiktīvu siltuma pretestības koeficientu, cauruļvadu tīkla aproksimācijai par slāni. Šī papildu siltuma pretestība raksturo siltuma pāreju no vidējās ūdens temperatūras cauruļvadu tīklā uz plakni fāžu pārejas materiāla slāņa centrā. Ja siltumnesēja cauruļvadu tīkla īpašības vai fāžu pārejas materiāla īpašības būtiski atšķiras no vērtībām, kas izmantotas šajā pētījumā, ir jāpārrēķina pretestības koeficienta R_t vērtība. Īpaša uzmanība jāpievērš fāžu pārejas materiāla siltumvadītspējai un situācijām, kad siltumnesējs nav tīrs ūdens (ūdens ar pretsasalšanas piedevām) vai siltumnesēja plūsma nav turbulenta.

9. SECINĀJUMI

Promocijas darbs ir oriģināls pētījums, kas ietver literatūras apskatu atbilstoši darba kontekstam un eksperimentālu pētījumu.

Eksperimentālais pētījums sastāv no vienādojumos balstīta dzesēšanas paneļa simulācijas modeļa detalizēta apraksta un vairākiem eksperimentiem, ar kuru palīdzību šis modelis tiek validēts.

Izstrādātā simulācijas modeļa galvenās priekšrocības, salīdzinot ar *CFD* simulācijas modeļiem, ir spēja veikt veselas ēkas izmēra dzesēšanas, termālā komforta un enerģijas simulācijas ilgstošiem laika periodiem.

Lai salīdzinātu izstrādātā simulācijas modeļa rezultātus ar eksperimentāliem mērījumiem un iepriekš veiktas *CFD* simulācijas rezultātiem, izmantoti statistiskās analīzes indikatori. Šie indikatori norāda, ka simulācijas modeļa precizitāte ir adekvāta. Maksimālās temperatūras novirzes un vidējās kvadrātiskās kļūdas ir līdzvērtīgas vai zemākas, nekā ziņots līdzīgos pētījumos.

Izstrādātā simulācijas modeļa precizitāte var tikt uzskatīta par piemērotu izmantošanai būvniecības industrijā, ja netiek pārsniegti simulācijas modeļa ierobežojumi. Līdz ar to iepriekš izvirzītā hipotēze par to, ka eksperimentāli validēts vienādojumos balstīts simulāciju modelis ar ūdeni dzesētam panelim ar integrētu latentu termālās enerģijas akumulatoru spēj radīt simulāciju rezultātus, kuru precizitāte ir piemērota izmantošanai būvniecības industrijā, ir apstiprināta.

Pēc paveiktajām pētniecības aktivitātēm gūti vairāki secinājumi.

1. Vairākums ES dalībvalstu ir pievērsušas uzmanību pārkaršanas problēmām modernās gandrīz nulles enerģijas ēkās, iekļaujot ierobežojumus būvnormatīvos.
2. Literatūras apskats norāda, ka pastāv daudzas uzticamas un industrijai gatavas pasīvās dzesēšanas tehnoloģijas, kuru veikspēju var uzlabot, izmantojot latentās termālās enerģijas akumulatoru sistēmas.
3. Literatūrā izpētītā informācija atklāj, ka par visefektīvākajām latentajām termālās enerģijas akumulatoru sistēmām var uzskatīt fāžu pārejas materiāla un gaisa siltummaiņus, kas iebūvēti ventilācijas sistēmās, kā arī griestu dzesēšanas paneļus ar iebūvētu latentu termālās enerģijas akumulatoru.
4. Atbilstoši iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka šāda veida vienādojumos balstīts simulāciju modelis sniedz rezultātus, kuru precizitāte ir salīdzināma ar rezultātiem, kas iegūti, izmantojot *CFD* simulācijas.
5. Rezultātu, kas iegūti, izmantojot izstrādāto simulāciju modeli, precizitāte ir līdzvērtīga vai precīzāka, nekā ziņots līdzīgos pētījumos, kas veikti iepriekš.
6. Izstrādātais simulāciju modelis var tikt praktiski izmantots būvniecības industrijā pilna izmēra ēku dzesēšanas, termālā komforta un gada enerģijas patēriņa simulācijām.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. The Future of Cooling. *Futur. Cool.* **2018**, doi:10.1787/9789264301993-en.
2. Millers, R.; Korjakins, A.; Lešinskis, A.; Borodinecs, A. Cooling Panel with Integrated PCM Layer: A Verified Simulation Study. *Energies* **2020**, doi:10.3390/en13215715.
3. European Commission Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. *Eur. Union* 2020.
4. Eichhammer, W.; Fleiter, T.; Schlomann, B.; Faberi, S.; Fioretto, M.; Piccioni, N.; Lechtenbohmer, S.; Schuring, A.; Resch, G. *Study on the energy savings potentials in EU member states, candidate countries and EEA countries*; 2009;
5. Ovchinnikov, P.; Borodinecs, A.; Millers, R. Utilization potential of low temperature hydronic space heating systems in Russia. *J. Build. Eng.* **2017**, *13*, doi:10.1016/j.job.2017.07.003.
6. Christensen, J. E.; Schiønning, P.; Dethlefsen, E. Comparison of simplified and advanced building simulation tool with measured data. In Proceedings of the Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association; 2013; pp. 2357–2364.
7. EPBD CA 2016 *Implementing the Energy Performance of Building Directive (EPBD)*; 2016;
8. Vabariigi Valitsus Energiatõhususe miinimumnõuded 2015.
9. Latvijas republikas Ministru kabinets Noteikumi par ēku energosertifikāciju 2016.
10. Latvijas republikas Ministru kabinets Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-19 “Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” 2019.
11. Latvijas republikas Ministru kabinets Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 231-15 “Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija” 2015.
12. Stetiu, C.; Feustel, H.E. Phase-change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings. *Lawrence Berkeley Natl. Lab.* **1998**.
13. Barzin, R.; Chen, J.J.J.; Young, B.R.; Farid, M.M. Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling. *Appl. Energy* **2015**, *158*, 412–421, doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.088.
14. Solgi, E.; Fayaz, R.; Kari, B.M. Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation. *Renew. Energy* **2016**, doi:10.1016/j.renene.2015.07.028.
15. Saffari, M.; de Gracia, A.; Ushak, S.; Cabeza, L.F. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017.
16. Givoni, B. Evaporative Cooling Systems. *Passiv. Low Energy Cool. Build.* **1994**.
17. Givoni, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy Build.* **1992**, doi:10.1016/0378-7788(92)90047-K.
18. Givoni, B. Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. *Energy Build.* **1991**, doi:10.1016/0378-7788(91)90106-D.

19. SUSAN, R.; PHILIP, H.; ORR, J. Climate change and passive cooling in Europe. *Environ. FRfENDLY C. ES, Proce<idings PLEA '98* **1998**, 463–466.
20. Artmann, N.; Manz, H.; Heiselberg, P. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Appl. Energy* **2007**, *84*, 187–201, doi:10.1016/j.apenergy.2006.05.004.
21. Meteoronorm Global meteorological database for engineers, planners and education 2005.
22. Prozuments, A.; Vanags, I.; Borodinecs, A.; Millers, R.; Tumanova, K. A study of the passive cooling potential in simulated building in Latvian climate conditions. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2017; Vol. 251.
23. Meir, M. G.; Rekstad, J. B.; LØvvik, O. M. A study of a polymer-based radiative cooling system. *Sol. Energy* **2002**, doi:10.1016/S0038-092X(03)00019-7.
24. Eicker, U.; Dalibard, A. Photovoltaic-thermal collectors for night radiative cooling of buildings. *Sol. Energy* **2011**, doi:10.1016/j.solener.2011.03.015.
25. Péan, T.; Gennari, L.; Olesen, B. W.; Kazanci, O.B. Nighttime radiative cooling potential of unglazed and PV / T solar collectors: parametric and experimental analyses. In *Proceedings of the Proceedings of the 8th Mediterranean Congress of Heating, Ventilation and Air-conditioning (climamed 2015)*; 2015.
26. Catalanotti, S.; Cuomo, V.; Piro, G.; Ruggi, D.; Silvestrini, V.; Troise, G. The radiative cooling of selective surfaces. *Sol. Energy* **1975**, doi:10.1016/0038-092X(75)90062-6.
27. Granqvist, C. G.; Hjortsberg, A. Surfaces for radiative cooling: Silicon monoxide films on aluminum. *Appl. Phys. Lett.* **1980**, doi:10.1063/1.91406.
28. Granqvist, C. G.; Hjortsberg, A. Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films. *J. Appl. Phys.* **1981**, doi:10.1063/1.329270.
29. Hossain, M. M.; Gu, M. Radiative cooling: Principles, progress, and potentials. *Adv. Sci.* 2016.
30. Berk, A.; Anderson, G. P.; Acharya, P. K.; Bernstein, L. S.; Muratov, L.; Lee, J.; Fox, M.; Adler-Golden, S. M.; Chetwynd, J. H.; Hoke, M. L.; et al. MODTRAN (TM) 5: 2006 update - art. no. 62331F. In *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XII Pts 1 and 2*; 2006 ISBN 0277-786Xr0-8194-6289-6.
31. Raman, A. P.; Anoma, M. A.; Zhu, L.; Rephaeli, E.; Fan, S. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature* **2014**, doi:10.1038/nature13883.
32. Millers, R.; Korjakins, A.; Lesinskis, A. Thermally activated concrete slabs with integrated PCM materials. In *Proceedings of the E3S Web of Conferences*; 2019; Vol. 111.
33. Zhiyin Duan a; Changhong Zhan b; Xingxing Zhang a; Mahmud Mustafa a; Xudong Zhao a, n; Behrang Alimohammadisagvand c; Ala Hasan Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**.

34. Amer, E. H. Passive options for solar cooling of buildings in arid areas. *Energy* **2006**, doi:10.1016/j.energy.2005.06.002.
35. Mavroudaki, P.; Beggs, C. B.; Sleigh, P. A.; Halliday, S. P. The potential for solar powered single-stage desiccant cooling in southern Europe. *Appl. Therm. Eng.* **2002**, doi:10.1016/S1359-4311(02)00034-0.
36. Jacovides, C. P.; Mihalakakou, G.; Santamouris, M.; Lewis, J. O. On the ground temperature profile for passive cooling applications in buildings. *Sol. Energy* **1996**, doi:10.1016/S0038-092X(96)00072-2.
37. Mihalakakou, G.; Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. On the cooling potential of earth to air heat exchangers. *Energy Convers. Manag.* **1994**, doi:10.1016/0196-8904(94)90098-1.
38. Mihalakakou, G.; Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. Use of the ground for heat dissipation. *Energy* **1994**, doi:10.1016/0360-5442(94)90101-5.
39. International Energy Agency Low Energy Cooling 2000.
40. Santamouris, M.; Kolokotsa, D. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy Build.* 2013.
41. Breesch, H.; Bossaer, A.; Janssens, A. Passive cooling in a low-energy office building. In Proceedings of the Solar Energy; 2005.
42. Pfafferott, J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency. *Energy Build.* **2003**, doi:10.1016/S0378-7788(03)00055-0.
43. International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 36 Case studies overview- UK1. **2003**, 117–122.
44. Fadejev, J.; Simson, R.; Kurnitski, J.; Kesti, J.; Mononen, T.; Lautso, P. Geothermal Heat Pump Plant Performance in a Nearly Zero-energy Building. In Proceedings of the Energy Procedia; 2016.
45. Fadejev, J.; Simson, R.; Kurnitski, J.; Kesti, J. Heat Recovery from Exhaust Air as a Thermal Storage Energy Source for Geothermal Energy Piles. In Proceedings of the Energy Procedia; 2016.
46. Hu, B.; Luo, Z. Life-cycle probabilistic geotechnical model for energy piles. *Renew. Energy* **2020**, doi:10.1016/j.renene.2019.09.022.
47. Zalba, B.; Marín, J. M.; Cabeza, L. F.; Mehling, H. Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Appl. Therm. Eng.* 2003.
48. Telkes, M. Thermal storage for solar heating and cooling. In Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings; Lembit U., L., James Taylor, B., Fulvio Anthony, I., Eds.; The Society: Charlottesville, 1975.
49. Barkmann, H.; Wessling, J. Use of buildings structural components for thermal storage. In Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings; Lembit U., L., James Taylor, B., Fulvio Anthony, I., Eds.; The Society: Charlottesville, 1975.

50. Abhat, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Sol. Energy* **1983**, doi:10.1016/0038-092X(83)90186-X.
51. Zeinelabdein, R.; Omer, S.; Gan, G. Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *82*, 2843–2868, doi:10.1016/j.rser.2017.10.046.
52. Cárdenas, B.; León, N. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013.
53. Lane GA. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume 1: Background and Scientific Principles*; CRC Press: London, New York, 1983; ISBN 9781315897653.
54. Dieckmann, J.H.; Heinrich, H. *Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*. 2008, pp. 10–17.
55. Whiffen, T. R.; Riffat, S. B. A review of PCM technology for thermal energy storage in the built environment: Part I. *Int. J. Low-Carbon Technol.* **2013**, doi:10.1093/ijlct/cts021.
56. Koschenz, M.; Lehmann, B. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy Build.* **2004**, doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.029.
57. Frusteri, F.; Leonardi, V.; Vasta, S.; Restuccia, G. Thermal conductivity measurement of a PCM based storage system containing carbon fibers. *Appl. Therm. Eng.* **2005**, doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.10.007.
58. Sari, A.; Karaipekli, A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material. *Appl. Therm. Eng.* **2007**, doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.11.004.
59. Cabeza, L. F.; Castell, A.; Barreneche, C.; De Gracia, A.; Fernández, A. I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011.
60. Baetens, R.; Jelle, B. P.; Gustavsen, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy Build.* 2010.
61. Hunger, M.; Entrop, A. G.; Mandilaras, I.; Brouwers, H. J. H.; Founti, M. The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials. *Cem. Concr. Compos.* **2009**, doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.08.002.
62. Voelker, C.; Kornadt, O.; Ostry, M. Temperature reduction due to the application of phase change materials. *Energy Build.* **2008**, doi:10.1016/j.enbuild.2007.07.008.
63. Arce, P.; Castellón, C.; Castell, A.; Cabeza, L. F. Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings. *Energy Build.* **2012**, *44*, 88–93, doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.028.
64. Evola, G.; Marletta, L.; Sicurella, F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Build. Environ.* **2013**, *59*, 517–527, doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.021.

65. Barzin, R.; Chen, J. J. J.; Young, B. R.; Farid, M. M. Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system. *Appl. Energy* **2015**, doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.027.
66. Kuznik, F.; Virgone, J.; Noel, J. Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Appl. Therm. Eng.* **2008**, doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.10.012.
67. Heim, D.; Clarke, J. A. Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. In Proceedings of the Energy and Buildings; 2004.
68. Zhang, Y.; Lin, K.; Jiang, Y.; Zhou, G. Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard. *Energy Build.* **2008**, doi:10.1016/j.enbuild.2008.03.005.
69. Stovall, T. K.; Tomlinson, J. J. What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard? *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME* **1995**, doi:10.1115/1.2847868.
70. Carbonari, A.; De Grassi, M.; Di Perna, C.; Principi, P. Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls. *Energy Build.* **2006**, doi:10.1016/j.enbuild.2005.08.007.
71. Evers, A. C.; Medina, M. A.; Fang, Y. Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator. *Build. Environ.* **2010**, doi:10.1016/j.buildenv.2010.02.002.
72. Halford, C. K.; Boehm, R. F. Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy Build.* **2007**, doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.005.
73. Alawadhi, E. M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy Build.* **2008**, doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.001.
74. Alawadhi, E. M.; Alqallaf, H. J. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study. *Energy Convers. Manag.* **2011**, doi:10.1016/j.enconman.2011.04.004.
75. Osterman, E.; Hagel, K.; Rathgeber, C.; Butala, V.; Stritih, U. Parametrical analysis of latent heat and cold storage for heating and cooling of rooms. *Appl. Therm. Eng.* **2015**, *84*, 138–149, doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.02.081.
76. Darzi, A. A. R.; Moosania, S. M.; Tan, F. L.; Farhadi, M. Numerical investigation of free-cooling system using plate type PCM storage. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2013**, *48*, 155–163, doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.025.
77. Borcuch, M.; Musiał, M.; Sztékler, K.; Kalawa, W.; Gumuła, S.; Stefański, S. The influence of flow modification on air and PCM temperatures in an accumulative heat exchanger. In Proceedings of the EPJ Web of Conferences; 2018; Vol. 180.
78. Jaworski, M.; Łapka, P.; Furmański, P. Numerical modelling and experimental studies of thermal behaviour of building integrated thermal energy storage unit in a form of a ceiling panel. *Appl. Energy* **2014**, doi:10.1016/j.apenergy.2013.07.068.
79. Jaworski, M. Thermal performance of building element containing phase change material (PCM) integrated with ventilation system – An experimental study. *Appl. Therm. Eng.* **2014**, doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.093.

80. Borderon, J.; Virgone, J.; Cantin, R. Modeling and simulation of a phase change material system for improving summer comfort in domestic residence. *Appl. Energy* **2015**, *140*, 288–296, doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.062.
81. Weinläder, H.; Klinker, F.; Yasin, M. PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center - Passive cooling potential of two different system designs. *Energy Build.* **2016**, *119*, 93–100, doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.031.
82. Ručevskis, S.; Akishin, P.; Korjakins, A. Parametric analysis and design optimisation of PCM thermal energy storage system for space cooling of buildings. *Energy Build.* **2020**, doi:10.1016/j.enbuild.2020.110288.
83. Rucevskis, S.; Akishin, P.; Korjakins, A. Performance Evaluation of an Active PCM Thermal Energy Storage System for Space Cooling in Residential Buildings. *Environ. Clim. Technol.* **2019**, doi:10.2478/rtuect-2019-0056.
84. Rucevskis, S.; Akishin, P.; Korjakins, A. Numerical Study of Application of PCM for a Passive Thermal Energy Storage System for Space Cooling in Residential Buildings. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2019.
85. Goodfellow, H.; Tahti, E. *Industrial Ventilation Design Guidebook*; Academic Press: Orlando, 2001; ISBN 0-12-289676-9.
86. *ASHRAE ASHRAE Fundamentals*; 2017;
87. Stoecker, W. F.; Jones, J. *Refrigeration and Air Conditioning*; McGraw-Hill: Auckland, 1982;
88. The Information Philosopher Available online: <https://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/planck/>.
89. Travesi, J.; Maxwell, G.; Klaassen, C.; Holtz, M. Empirical validation of Iowa energy resource station building energy analysis simulation models. **2001**.
90. Sahlin, P.; Grozman, P. IDA Simulation Environment a tool for Modelica based end-user application deployment. *Proc. 3rd Int. Model. Conf. Linköping, Novemb. 3-4 2003* **2003**, 105–114.
91. Rubitherm GmbH Technical data sheet for RT22HC 2018, 1.
92. European Committee for Standardization EN 15377-1:2008 Heating systems in buildings. Design of embedded water based surface heating and cooling systems. Determination of the design heating and cooling capacity 2008.
93. Nageler, P.; Schweiger, G.; Pichler, M.; Brandl, D.; Mach, T.; Heimrath, R.; Schranzhofer, H.; Hochenauer, C. Validation of dynamic building energy simulation tools based on a real test-box with thermally activated building systems (TABS). *Energy Build.* **2018**, *168*, 42–55, doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.025.
94. Cornaro, C.; Pierro, M.; Roncarati, D.; Puggioni, V. Validation of a PCM simulation tool in IDA ICE dynamic building simulation software using experimental data from solar test boxes. In *Proceedings of the Building Simulation Applications*; 2017; Vol. 2017-Febru, pp. 159–166.