

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Dzintars JAUNZEMS**

**SAULES SILTUMA ENERĢIJAS IZMANTOŠANAS ĒKU AUKSTUMA  
APGĀDĒ IZPĒTE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2011**

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

**Dzintars JAUNZEMS**

Doktora studiju programmas „Vides zinātne” doktorants

**SAULES SILTUMA ENERĢIJAS IZMANTOŠANAS ĒKU AUKSTUMA  
APĢĀDĒ IZPĒTE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītāji:  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**I. VEIDENBERGS**

Dr. sc. ing., asoc. profesors  
**C. ROCHAS**

**Rīga 2011**

UDK 697.1(043)  
Ja 938 s

Jaunzems D. Saules siltuma enerģijas  
izmantošanas ēkas aukstuma apgādē izpēte.  
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2011.-  
32 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un  
siltuma sistēmu institūta 2011. gada 9. maija  
lēmumu, protokols Nr. 10/09-05-2011.

**ISBN 978-9934-10-177-9**

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU  
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ  
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011. g. 9. septembrī plkst. 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, 21. auditorijā, Kronvalda bulvārī 1, Rīgā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesore, Dr.sc.ing. Andra Blumberga  
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr.sc.ing. Āris Žīgurs  
AS Latvenergo, Latvija

Profesors, Dr. sc. ing. John Bernhard Rekstad  
University of Oslo, Norvēģija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Dzintars Jaunzems.....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 67 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 150 lappuses. Literatūras sarakstā ir 97 nosaukumi.

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

## Satura rādītājs

Darba mērķis un uzdevumi.....	6
Izpētes metodika.....	6
Darba zinātniskā nozīme .....	7
Darba praktiskā nozīme .....	7
Darba aprobācija.....	7
Autora publikācijas.....	8
Darba struktūra un apjoms.....	9
1. Ēkas dinamiskais aukstuma slodzes aprēķinu modelis.....	9
2. Ēkas aukstuma slodzes izmaiņu izpēte.....	11
2.1. Izpētes mērķa ēka .....	12
2.2. Iekšējo siltuma ieguvumu ietekme uz ēkas aukstuma slodzi .....	13
2.3. Ēkas ārējo norobežojošo konstrukciju siltumfizikālo un optisko parametru ietekme ...	13
2.3.1. Ēkas ārējo norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta ietekme .	13
2.3.2. Ēkas ārējo caurspīdīgo norobežojošo konstrukciju virsmas laukuma īpatsvara ietekme .....	15
2.3.3. Ēkas siltināšanas ietekme .....	16
2.3.4. Ēkas dinamiskie parametri .....	17
3. Saules kolektora eksperimentālā izpēte.....	19
3.1. Reflektoru ietekmes uz saules kolektora veiktspēju analīze .....	21
3.2. Laika rindu datu apstrāde .....	22
4. Saules aukstuma sistēmas modelēšana.....	24
4.1. Saules aukstuma sistēmas modelis TRNSYS vidē.....	25
4.2. Saules aukstuma sistēmas modelēšanas rezultātu analīze .....	25
4.3. Saules aukstuma sistēmas vides un ekonomisko aspektu analīze .....	27
4.3.1. CO <sub>2</sub> samazinājums.....	27
4.3.2. Anuitātes metode .....	29
Secinājumi .....	30

## **Darba aktualitāte**

Eiropas Savienības, enerģētikas attīstības mērķi, kas ir noteikti ambiciozajā Eiropas Savienības attīstības stratēģijā „ES 2020” un ir saistoši Latvijas enerģētikas nozarei, kā arī atjaunojamo energoresursu iekārtu un tehnoloģiju nozares straujā attīstība ir saistīta ar nepieciešamību pēc padziļinātas izpētes un analīzes, lai veicinātu šo uzstādīto mērķu sasniegšanu.

Viens no veidiem, kā šos mērķus sasniegt ir ar ēkām saistītā enerģijas patēriņa samazināšana, optimāla ēku aukstuma apgādes sistēmas izvēle un pielietošana, kas sevī ietver gan energoefektivitātes pasākumu ietekmes izvērtēšanu un ēkas aukstuma slodzes minimizāciju, gan saules siltuma enerģijas izmantošanu ēkas aukstuma slodzes nosešanai. Šim risinājumam ir liels potenciāls, jo ar ēkām saistītais enerģijas patēriņš veido gandrīz pusi no visa kopējā Latvijas enerģijas gala patēriņa, turklāt šādas saules aukstuma sistēmas var tikt izmantotas arī citur, piem., rūpniecības vai ražošanas sektoros, kur ir nepieciešama aukstuma apgāde vai dzesēšana. Savukārt saules siltuma sistēmu izmantošana joprojām netiek uzskatīta par efektīvu un būtisku enerģijas avotu, jo trūkst eksperimentālās izpētes datu un sistēmas modelēšanas rezultātu, līdz ar to nav pietiekami plaši izvērtētas šādas sistēmas darbība Latvijas klimata apstākļos.

Precīza aukstuma slodzes noteikšana ir būtisks parametrs, lai varētu izvēlēties saules aukstuma sistēmas jaudu un veidu. Tāpēc, no vienas puses, ir būtiski izvērtēt un modelēt objekta aukstuma slodzes izmaiņas, kas ietver nestacionāros siltuma apmaiņas procesus un no otras puses, izvēlēties atbilstošu saules aukstuma sistēmu, kas būtu gan tehniski, gan ekonomiski pamatojama, gan būtu ar minimālu ietekmi uz vidi un klimata pārmaiņām.

## **Darba mērķis un uzdevumi**

Promocijas darbā aprakstīto pētījumu mērķis ir izstrādāt metodiku ēkas laikā mainīgas aukstuma slodzes noteikšanai un saules enerģiju izmantojošās absorbcijas tipa aukstuma iekārtas lietojuma iespēju izpētei. Darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi izpētes uzdevumi:

1. Izstrādāt un validēt dinamisko ēkas aukstuma slodzes aprēķinu modeli.
2. Īstenot ēkas aukstuma slodzi ietekmējošo energoefektivitātes pasākumu un parametru ietekmes izpēti un analīzi, lai minimizētu ēkas aukstuma slodzi.
3. Veikt vakuuma cauruļu saules kolektoru siltuma sistēmas eksperimentālu izpēti augstāku āra gaisa temperatūru un palielināta saules starojuma apstākļos Latvijā.
4. Modelēt saules enerģiju izmantojošo absorbcijas tipa aukstuma iekārtu lietojumu ēkas laikā mainīgās aukstuma slodzes nosešanai.

## **Izpētes metodika**

Promocijas darba izpētes mērķa sasniegšanā tika izmantots autora izstrādātais modelis „CooL” un modelēšanas programma TRNSYS. Izpētes uzdevumu risināšanai ir vairāki savstarpēji saistīti etapi:

1. Ēku dinamiskā aukstuma slodze un tās izmaiņas tiek modelētas ar autora piedāvāto modeli „Cool”.
2. Ēkas parametru ietekmes uz aukstuma slodzi un būtiskuma analīzē izmantots skaitliskais eksperiments un veikta tā plānošana, kā arī rezultātu regresijas analīze.
3. Saules kolektoru iespējas augstu temperatūru un saules starojuma apstākļos Latvijā pētītas izmantojot eksperimentu. Eksperimentālo datu apstrādē izmantotas dinamisko rindu statistiskās apstrādes metodes.
4. Izmantojot ēku dinamisko aukstuma slodžu modelēšanas datus un saules kolektora eksperimentālo pētījumu rezultātus, ar modelēšanas programmu TRNSYS palīdzību, tiek pētīta iespēja ar saule enerģiju saražoto aukstumu izmantot ēkas aukstuma slodzes segšanai.

### **Darba zinātniskā nozīme**

Darbā sasniegtie teorētiskās un eksperimentālās izpētes rezultāti ļauj pilnvērtīgāk analizēt dažādu faktoru ietekmi uz ēkas aukstuma slodzi, kā arī paplašina zināšanas par saules enerģijas izmantošanas iespējām un termiski darbināmu aukstuma iekārtu lietojumu ēku aukstuma apgādē. Ņemot vērā esošo ēkas energoefektivitātes izvērtēšanas praksi, izstrādāts un validēts ēkas dinamiskais aukstuma slodzes aprēķinu modelis, kas ir papildināts ar iespējām analizēt ēkas aukstuma slodzes izmaiņu īpatnējos parametrus. Realizēta saules enerģiju izmantojošo absorbcijas tipa aukstuma iekārtu izmantošanas ēkas aukstuma slodzes nosegšanā modelēšana un izvērtēti vides un ekonomiskie aspekti.

### **Darba praktiskā nozīme**

Promocijas darbā izstrādātās metodikas mērķauditorija ir plaša un pielietojums ir atkarīgs no lietotāja mērķiem.

Metodiku var izmantot gan valsts iestādes un uzņēmumi, gan komercsektors un investori, gan privātpersonas, lai plānotu energoefektivitātes pasākumus un noteiktu pasākumu ietekmi uz ēkas aukstuma slodzes izmaiņām, kā arī veiktu saules aukstuma sistēmu attīstības projektu izpēti un novērtētu sistēmas ieviešanas un ekspluatācijas rādītājus, ietverot gan tehniskos ierobežojumus un iespējas, gan vides un ekonomisko aspektu analīzi.

### **Darba aprobācija**

Par darba rezultātiem tika ziņots un tie ir apspriesti:

1. 51. Starptautiskajā RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Small Scale Solar Cooling Unit in Climate Conditions of Latvia: Environmental and Economical Aspects”, 2010. gada 12.-13. oktobrī, Rīgā.
2. 50. Starptautiskajā RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Influence of Thermodynamic Properties and Thermal Inertia of the Building Envelope on Building Cooling Load”, 2009. gada 14.-16. oktobrī, Rīgā.

3. 3. Starptautiskajā konferencē „Solar Air-Conditioning” ar referātu „Applications of Solar Cooling Technologies in Buildings in Latvian (North-eastern Europe) Climate Conditions”, 2009. gada 29. septembris-2.oktobris, Palermo, Itālijā.
4. Starptautiskajā konferencē „CISBAT 2009 Renewables in Changing Climate – From Nano to Urban Scale” ar referātu „Integration of Renewables to Cover Cooling Load of Building. Feasibility and Application”, 2009. gada 2.-3. septembrī, Lozannā, Šveicē.
5. Reģionālajā konferencē „Vide un Enerģija Vidzemē” ar referātu „Atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespēju izvērtējums Latvijā līdz 2020. gadam”, 2009. gada 15. maijā, Valmierā.
6. 49. Starptautiskajā RTU zinātniskajā konferencē ar referātu ”Development and Verification of Method for Building Cooling Load Calculation for Latvian Climate Conditions”, 2008. gada 11.-13.oktobrī, Rīgā.
7. 11. Starptautiskā konference „Solar Energy at High Latitudes” ar referātu „Trigeneration Heat, Power and Cooling”, 2007. gada 30. maijā-1. jūnijā, Rīgā.
8. 48. Starptautiskajā RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Analysis of Trigeneration Heat, Power and Cooling Loads”, 2007. gada 11.-13. oktobrī, Rīgā.
9. Starptautiskā konference „ЦБП России – взгляд в будущее” ar referātu „Разработка алгоритма и имитационной модели для регулирования параметров солнечной комплексной энергоустановки”, 2006. gada 26. oktobris, Sanktpēterburgā, Krievijā.
10. 47. Starptautiskajā RTU zinātniskajā konferencē ar referātu „Development of Solar Combisystem Control Algorithm and Simulation Model”, 2006. gada 12.-14. oktobrī, Rīgā.

### **Autora publikācijas**

1. Jaunzems D., Veidenbergs I., Žandeckis A., Rochas C. The use of reflectors for increasing the energy performance of solar thermal collector in Latvian climate conditions// Latvian Journal of Physics and Technical sciences. – Riga: 2011. Vol. 5. – 7 p.
2. Jaunzems D., Veidenbergs I. Small Scale Solar Cooling Unit in Climate Conditions of Latvia: Environmental and Economical Aspects// 51th International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies. – Riga: RTU, 2010. – pp. 47-53.
3. Jaunzems D., Veidenbergs I. Influence of Thermo-dynamic Properties and Thermal Inertia of the Building Envelope on Building Cooling Load// 50th International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies. – Riga: Scientific Journal of Riga Technical University, 2009. – pp. 63-70.
4. Jaunzems D., Veidenbergs I. Applications of Solar Cooling Technologies in Buildings in Latvian (North-eastern Europe) Climate Conditions// 3rd International Conference Solar Air-Conditioning. – Palermo: Book of Proceedings, 2009. – pp. 447-454.

5. Jaunzems D., Veidenbergs I. Integration of Renewables to Cover Cooling Load of Building. Feasibility and Application// International Scientific Conference CISBAT 2009 Renewables in Changing Climate – From Nano to Urban Scale. – Lausanne: Book of Abstracts, 2009. – p. 109.
6. Jaunzems D., Veidenbergs I. Development and Verification of Method for Building Cooling Load Calculation for Latvian Climate Conditions// 50th International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies. – Riga: RTU, 2008. – pp. 120-127.
7. Joo S., Stoia V., Baeva D., Georgallis P., Jaunzems D. Development of Cost and Market Potencial for Solar Panels Under Consideration of Learning Curve Effect// Summer Course „Energy&Environment” – Dresden: DUT, 2008. – pp. 9-22.
8. Torio H., Jaunzems D. How is the Thermal Stratification of Solar Heating Systems Influenced by Thermal Stratification in the Tanks// SolNet Ph.D. course: Thermal stratification in solar storage tanks. – Copenhagen: Department of Civil Engineering, 2007. – pp. 2-11.
9. Jaunzems D., Veidenbergs I. Analysis of Trigenation Heat, Power and Cooling Loads// The 48th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering. – Riga: RTU, 2007. – pp. 98-103.
10. Jaunzems D., Veidenbergs I. Trigenation Heat, Power and Cooling// 11th International Conference on Solar Energy at High Latitudes. – Riga: RTU, 2007. – p. 70.
11. Яунземс Д., Роша К. Разработка алгоритма и имитационной модели для регулирования параметров солнечной комплексной энергоустановки// Международная научно-практическая конференция „ЦБП России – взгляд в будущее”. - Санкт-Петербург: ГОУВПО СПб ГТУ РП, 2006. – с. 128-132.
12. Jaunzems D., Rochas C. Development of Solar Combisystem Control Algorithm and Simulation Model// 47th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering. – Riga: RTU, 2006. – pp. 133.-144.

## **Darba struktūra un apjoms**

Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu valodā un sastāv no ievada, 5 darba daļām un secinājumiem, 2 pielikumiem un literatūras saraksta. Tajā ir 149 lapas, t.sk. 67 attēli, 22 tabulas un literatūras saraksts ar 97 literatūras avotiem. Kopsavilkumā netiek aplūkots literatūras apskats.

### **1. Ēkas dinamiskais aukstuma slodzes aprēķinu modelis**

Precīza ēkas aukstuma slodze un aukstuma enerģijas patēriņa prognoze ir būtiska, lai varētu izvēlēties ēkas aukstuma apgādes sistēmas veidu un optimālos parametrus. Lai būtu iespējams modelēt ēkas aukstuma slodzi, ievērojot visus paralēli notiekošos nestacionāros siltuma apmaiņas procesus, nepieciešams dinamiskais aprēķinu modelis.

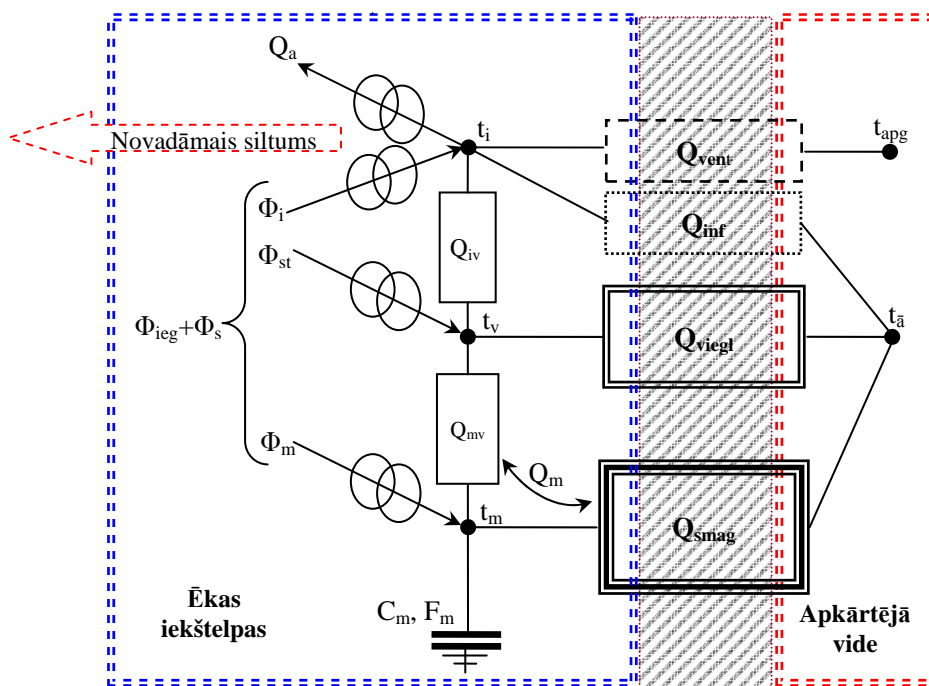
Šajā nodaļa ir izstrādāts ēkas dinamiskais modelis, kas lielā mērā ir balstīts uz spēkā esošo standartu LVS EN 15255:2007 „Ēku energoefektivitāte. Sajūtamās telpu dzesēšanas slodzes rēķināšana. Vispārīgie kritēriji un validēšana” un tajā aprakstīto ēkas aukstuma slodzes noteikšanas metodiku, kas ļauj konstatēt:

- 1) Ēkas ikstundas aukstuma slodzi;
- 2) Ēkas iekštelpu temperatūras izmaiņas profilu.

Ēkas dinamiskais aukstuma slodzes aprēķinu modelis ir papildināts ar vairākām rezultātu apstrādes un analīzes iespējām un ļauj modelēt:

- a) ēkas norobežojošo konstrukciju ģeometrisko, optisko, stacionāro un dinamisko parametru un dažādu energoefektivitātes pasākumu ietekmi uz ēkas aukstuma slodzi;
- b) ēkas iekštelpu mikroklīmata izmaiņu ietekmi uz ēkas aukstuma slodzi;
- c) ēkas iemītnieku uzvedības un paradumu izmaiņu ietekmi uz ēkas aukstuma slodzi.

Ēkas dinamiskā aprēķina modeļa tīkla mezgli un izveidotais tīklojums ir redzams 1.1. attēlā.



1.1. att. Ēkas dinamiskā aukstuma slodzes aprēķina modeļa tīkla mezgli

1.1. attēlā redzami apzīmējumi ir:

- a)  $t_{apg}$  – uz ventilācijas sistēmu padotā gaisa temperatūra, °C;
- b)  $t_a$  – āra gaisa temperatūra, °C;
- c)  $t_i$  – ēkas iekštelpas temperatūra, °C;
- d)  $t_m$  – ēkas norobežojošo konstrukciju termiskās masas temperatūra, °C;
- e)  $t_v$  – ēkas norobežojošo konstrukciju virsmas temperatūras, °C;
- f)  $Q_{vent}$  – siltuma zudumu koeficients ar ventilāciju, W/K;

- g)  $Q_{vieg}$  – siltuma zudumu koeficients caur vieglajām caurspīdīgajām un necaurspīdīgajām ēkas konstrukcijām, W/K;
- h)  $Q_{smag}$  – siltuma zudumu koeficients starp apkārtējo gaisu un ēkas smagajām norobežojošajām konstrukcijām, W/K;
- i)  $Q_{mv}$  – siltuma zudumu koeficients starp ēkas smagajām norobežojošajām konstrukcijām un konstrukciju iekšējo virsmu, W/K;
- j)  $Q_m$  – ēkas smago norobežojošo konstrukciju siltuma zudumu koeficients, W/K;
- k)  $Q_{iv}$  – siltuma zudumu koeficients starp iekšējo ēkas norobežojošās konstrukcijas virsmas un iekštelpas gaisu, W/K;
- l)  $C_m$  – ēkas norobežojošo konstrukciju termiskās masas koeficients, J/K;
- m)  $F_m$  – ēkas masas laukuma ekvivalents, m<sup>2</sup>;
- n)  $\Phi_{ieg}$  – kopējā siltuma plūsma no iekšējiem siltuma avotiem ēkā, W;
- o)  $\Phi_s$  – saules starojuma kopējā siltuma plūsma ēkā, W;
- p)  $\Phi_i$  – siltuma plūsma starp iekštelpu temperatūras tīklojuma mezglā  $t_i$ , W;
- q)  $\Phi_{st}$  – siltuma plūsma virsmas temperatūras tīklojuma mezglā  $t_v$ , W;
- r)  $\Phi_m$  – siltuma plūsma starp ēkas norobežojošo konstrukciju termiskās masas temperatūras tīklojuma mezglā  $t_m$ , W;
- s)  $Q_a$  – ēkas aukstuma slodze, kW.

Validācija rāda, ka izstrādātais ēkas aukstuma slodzes aprēķinu modeļa „Cool” rezultātu novirze ir  $\pm 5\%$  robežās un tā precizitāte atbilst A līmenim, jo  $rQ_a = 0,042$ . Tas nozīmē, ka izstrādātais aprēķinu modelis ir izmantojams praksē. Validācijas rezultāti ir apkopoti 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Ēkas dinamiskā aukstuma slodzes aprēķina modeļa validācijas rezultāti

Pārbaudes Nr.p.k.	Atsauces ēkas aukstuma slodze $Q_{a,ats}$ , W	Modelētā ēkas aukstuma slodze $Q_a$ , W	Relatīvā ēkas aukstuma slodzes vērtība $rQ_a$
1.	1683	1755	0,041
2.	1431	1435	0,003
...	...	...	...
15.	1967	2005	0,019
16.	2218	2270	0,023
Relatīvā ēkas aukstuma slodzes vērtība $rQ_a$			0,042

## 2. Ēkas aukstuma slodzes izmaiņu izpēte

Šajā nodaļā, izmantojot autora izstrādāto un validēto ēkas dinamiskās aukstuma slodzes aprēķinu modeli „Cool” un aprobējot to ar izpētes mērķa ēku, tika veikta energoefektivitātes pasākumu ietekmes uz ēkas aukstuma slodzi un ēkas aukstuma slodzes ilgumu modelēšana un rezultātu analīze.

## 2.1. Izpētes mērķa ēka

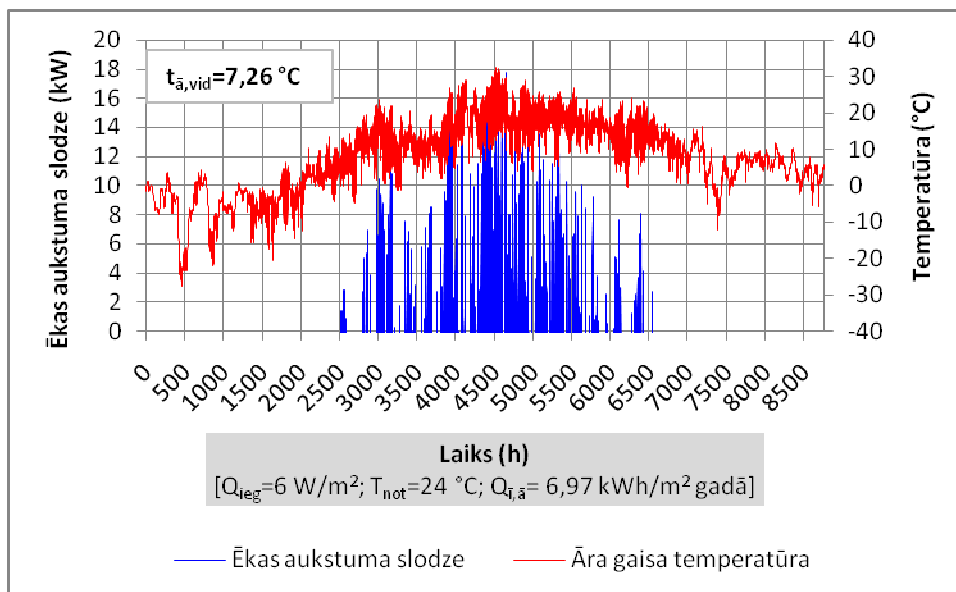
Izpētes ēka ir trīs stāvu ēka, ar salīdzinoši mazu caurspīdīgo ārējo norobežojošo konstrukciju īpatsvaru (~11%) un vienkāršu arhitektūru, kas tiek izmantota kā biroja ēka un sastāv no trīs stāviem, 1 stāva aukstums ir 3m. Ēkas kopējā lietderīgā platība ir ~ 772 m<sup>2</sup>, bet aukstuma apgāde jeb dzesēšana ir nepieciešama 524 m<sup>2</sup>. Ēkas gaisa daudzums ir 1262 m<sup>3</sup>/h, bet gaisa apmaiņas kārtā ir 0,545 h<sup>-1</sup>.

Ēkas sienas ir veidotas no silikāta un parastajiem māla ķieģeļiem ar javu un cementa-kaļķa smilšu apmetumu. Grīdas un pagraba pārsegums ir veidots no betona paneļiem un smilšu un izdedžu maisījuma. Ēka nav siltināta.

Vidējais ēkas iekšējo siltuma ieguvumu apjoms ir 6 W/m<sup>2</sup>. Ēkas iekšējie siltuma ieguvumi sastāv no:

- siltuma ieguvumi no apgaismojuma: 720 W;
- siltuma ieguvumi no elektronikas un elektroiekārtām: 1532 W;
- siltuma ieguvumi no cilvēkiem (metabolisma): 900 W;
- siltuma ieguvumi no karstā ūdens kontūras: 10 W.

2.1. attēlā ir redzams izpētes mērķa ēkas modelētās aukstuma slodzes un āra gaisa izmaiņas gada griezumā, ja ēkas iekšstelpu noteiktā temperatūra ir 24 °C un siltuma ieguvumi ir 6 W/m<sup>2</sup>.



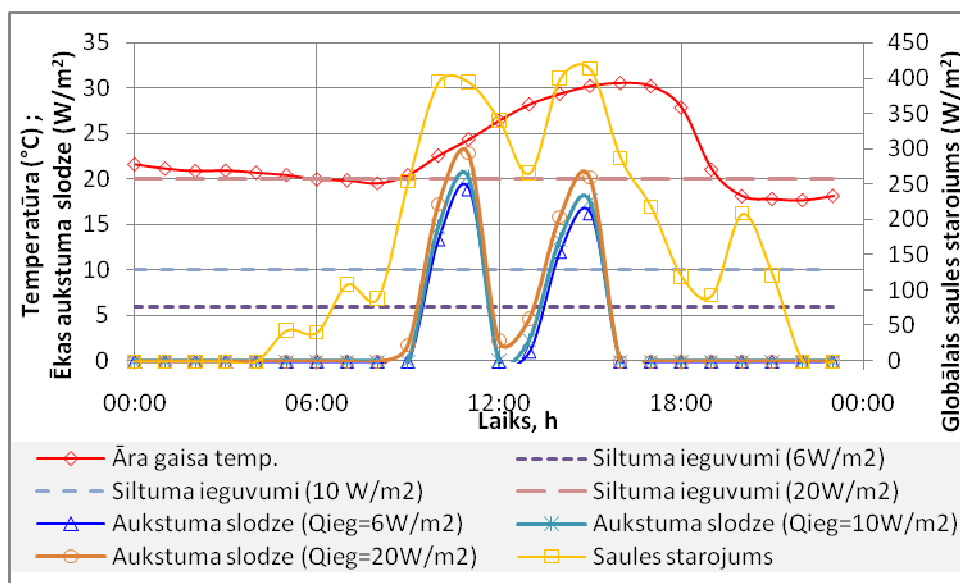
2.1. att. Izpētes ēkas aukstuma slodzes un āra gaisa temperatūras izmaiņa gada griezumā

Izpētes mērķa ēkas dzesēšanas sezona ir no kalendārā gada marta beigām līdz oktobra sākumam. Izpētes ēkas maksimālā aukstuma slodze  $Q_{a,max}$  ir 17,8 kW<sub>a</sub>, bet ēkas īpatnējais aukstuma patēriņš  $Q_{i,a}$  ir 6,97 kWh/m<sup>2</sup> gadā un ēkas aukstuma slodzes ilgums  $t_a$  ir 676 h/gadā. Ēkas aukstuma slodzes ilgums  $t_a$  ļauj izvērtēt aukstuma iekārtas noslodzes ilgumu. Izpētes ēkas konstrukcijas pēc termiskās masas klasifikācijas atbilst ļoti vieglām konstrukcijām, t.i. tās ir ar mazu termisko inerci, kas nozīmē, ka siltuma pāreja starp ēkas

iekštelpām un apkārtējo vidi notiek pietiekoši ātri un nav novērojama liela nobīde laikā starp āra gaisa un ēkas iekštelpas temperatūru maksimumiem un minimumiem.

## 2.2. Iekšējo siltuma ieguvumu ietekme uz ēkas aukstuma slodzi

Balstoties uz praksē un energoauditos iegūtajiem datiem, vidējās kopējās ēkas iekšējo siltuma ieguvumu vērtības ir robežās no 2 līdz pat  $50 \text{ W/m}^2$ . Šī vērtība ir atkarīga no ēkas veida, izmantošanas un noslodzes režīma. Privātmājās vidējie siltuma ieguvumi nepārsniedz  $10 \text{ W/m}^2$ , savukārt birojos iekšējo siltuma ieguvumi var sasniegt  $20\text{-}30 \text{ W/m}^2$ .



2.1. Izpētes mērķa ēkas īpatnējās aukstuma slodzes, āra gaisa temperatūras un saules starojuma izmaiņas diennakts griezumā jūlija mēnesī

Kā redzams no 2.1. attēla, ja ēkas iekštelpās jānodrošina patstāvīga temperatūra, ēkas aukstuma slodzi nepārtraukti ietekmē iekšējie siltuma ieguvumi, savukārt saules starojuma intensitāte un āra gaisa temperatūra ietekmē ēkas aukstuma slodzi tikai periodiski. Turklāt, saules starojuma intensitāte būtiski ietekmē ēkas aukstuma slodzi, ja siltuma ieguvumi ir salīdzinoši mazi (līdz  $10 \text{ W/m}^2$ ). Palielinoties siltuma ieguvumu apjomam, samazinās saules starojuma un āra gaisa temperatūras ietekme uz ēkas aukstuma slodzi un dominējošie kļūst ēkas siltuma ieguvumi.

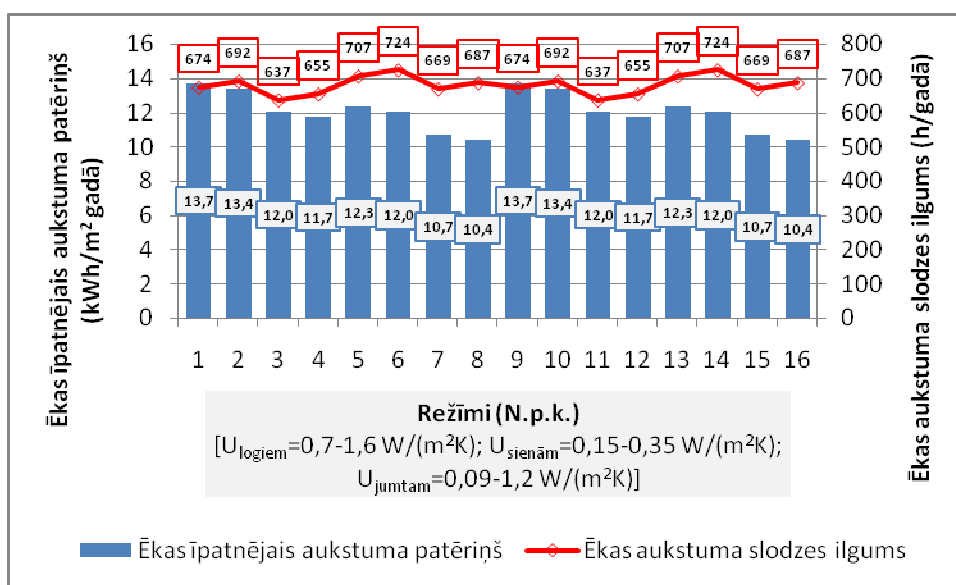
## 2.3. Ēkas ārējo norobežojošo konstrukciju siltumfizikālo un optisko parametru ietekme

### 2.3.1. Ēkas ārējo norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta ietekme

Ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficients raksturo, kāds siltuma daudzums noteiktā laika vienībā izplūst caur vienu kvadrātmetru konstrukcijas laukuma, ja temperatūru starpība starp norobežojošās konstrukcijas abām pusēm ir viens

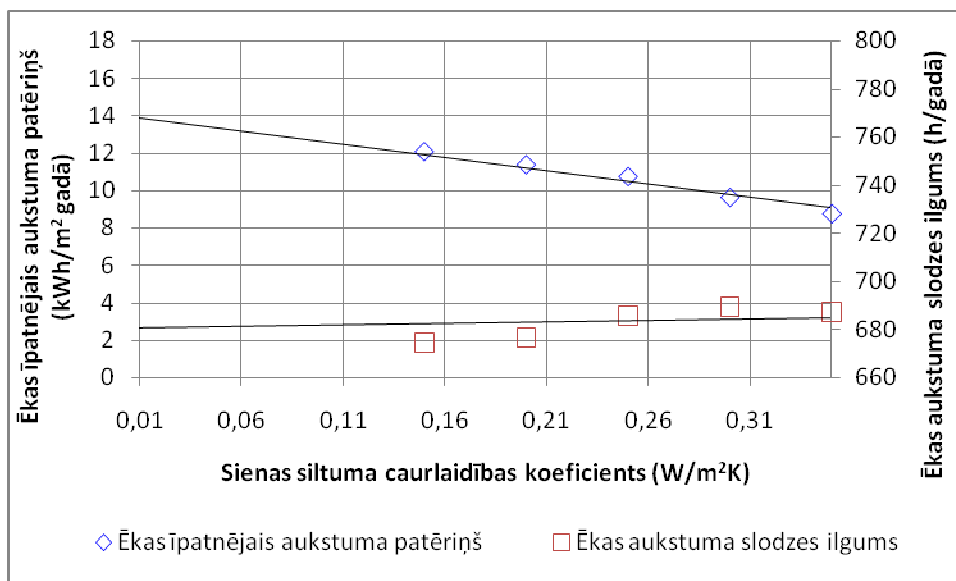
grāds. Jo lielāka šī koeficienta vērtība, jo lielāks siltuma daudzums var izplūst caur vienu kvadrātmetru konstrukcijas laukuma.

Veicot skaitlisko eksperimentu, tika modelēta ēkas īpatnējā aukstuma enerģijas patēriņa un ēkas aukstuma slodzes ilguma izmaiņas atkarībā no ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības vērtībām. 2.2. attēlā ir apkopota izpētes mērķa ēkas aukstuma enerģijas patēriņa un ēkas aukstuma slodzes ilguma izmaiņas pie dažādām ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta vērtībām. Var secināt, ka nav vērojama ēkas īpatnējā aukstuma enerģijas patēriņa un ēkas aukstuma slodzes ilguma savstarpējā korelācija pie dažādām norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta vērtībām, kas ir skaidrojama ar ēkā un ēkas konstrukcijās notiekošajiem nestacionārajiem siltuma apmaiņas procesiem.



2.2. att. Ēkas īpatnējā aukstuma patēriņa un ēkas aukstuma slodzes ilguma izmaiņas atkarībā no skaitliskā eksperimenta režīma

Ēkas īpatnējā aukstuma patēriņa un ēkas aukstuma slodzes ilguma izmaiņas atkarībā no sienas siltuma caurlaidības koeficienta ir redzama 2.3. attēlā. Palielinoties sienas siltuma caurlaidības koeficienta vērtībai, ēkas īpatnējais aukstuma patēriņš samazinās, bet aukstuma slodzes ilgums nebūtiski pieaug. To var skaidrot ar siltuma plūsmas palielināšanos starp ēkas iekšējām un apkārtējo vidi, kas veicina ēkas dabisku atdzišanu, ja āra gaisa temperatūra ir zemāka par ēkas faktisko iekšējā temperatūru.



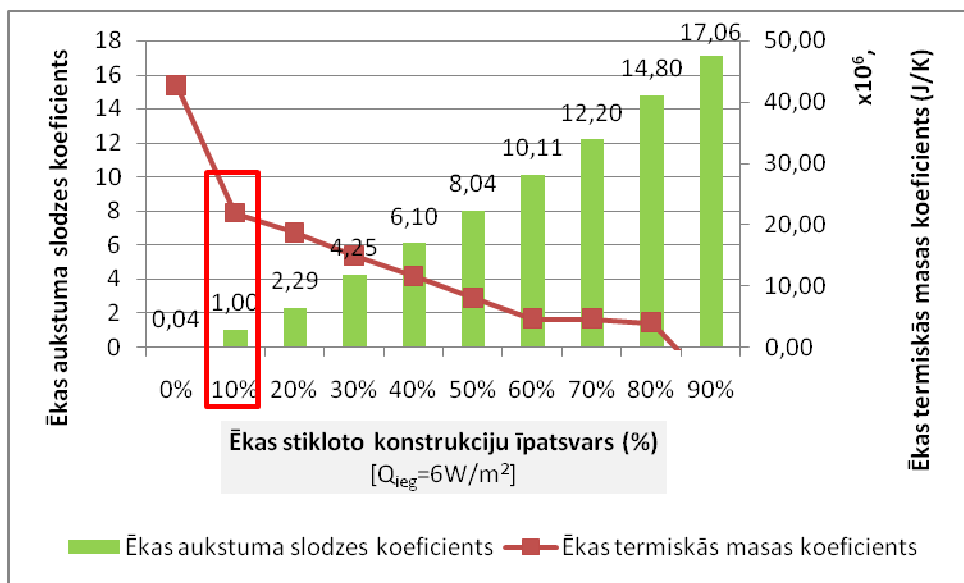
2.3. att. Ēkas īpatnējā aukstuma patēriņa un ēkas aukstuma slodzes ilguma izmaiņas atkarībā no sienas siltuma caurlaidības koeficienta

Gadījumos, kad ēkas siltuma ieguvumi ir vairāk par  $10 \text{ W/m}^2$ , vasaras sezonā zemas ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu vērtības būtiski var ietekmēt ēkas aukstuma enerģijas patēriņu un ēkas aukstuma slodzes ilgumu, jo tiks ierobežota dabiskie siltuma apmaiņas procesi un siltuma plūsmas starp ēkas iekšējām un apkārtējo vidi, t.i. ēka nevarēs dabiski atdzist.

### 2.3.2. Ēkas ārējo caurspīdīgo norobežojošo konstrukciju virsmas laukuma īpatsvara ietekme

Stikloto ēkas norobežoto konstrukciju virsmas laukuma īpatsvars ir vērā ņemams parametrs, ar ko var raksturot ēkas. Īpatsvara ietekme ir būtiska, jo palielinās saules starojuma radītās siltuma plūsmas ietekme uz ēkas siltuma ieguvumu apjomu.

Kā redzams no 2.4. attēla, palielinoties caurspīdīgo ārējo norobežojošo konstrukciju virsmas īpatsvaram, palielināsies ēkas aukstuma slodze, bet samazināsies ēkas termiskās masas koeficients. Tas nozīmē, ka ēkas iekšējumu temperatūras svārstības vairāk ietekmēs saules starojums un āra gaisa temperatūra un sagaidāms, ka ēkas iekšējumu mikroklimats un komforts pasliktināsies, jo pieaugs iekšējumu temperatūru svārstību amplitūda. Turklāt, kļūs sarežģītāk nodrošināt noteiktu temperatūru ēkas iekšējās, jo diennakts griezumā palielināsies ēkas aukstuma slodzes pīķis.



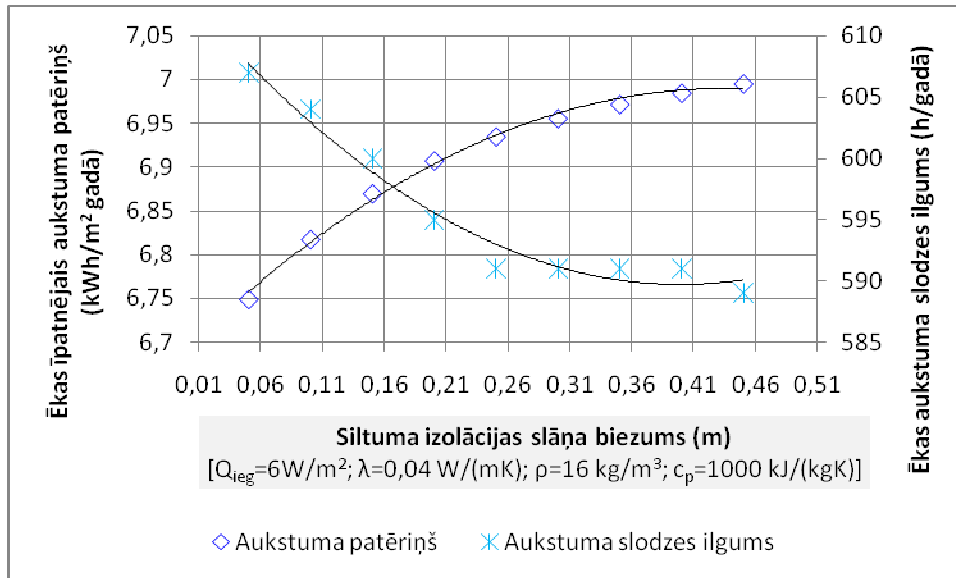
2.4. att. Ēkas aukstuma slodzes koeficienta un ēkas termiskās masas koeficienta izmaiņas atkarībā no ēkas caurspīdīgo konstrukciju virsmas platības īpatsvara

Palielinot ēkas caurspīdīgo konstrukciju virsmas platības īpatsvaru, var panākt dabiskā apgaismojuma palielināšanos, tomēr būtu jāievēro caurspīdīgo konstrukciju ietekmi un siltuma pretestību ziemas sezonā.

### 2.3.3. Ēkas siltināšanas ietekme

Ēkas siltināšanas mērķis ir uzlabot ēkas siltumnoturību, kas īpaši ir aktuāla ziemas sezonā, kad āra gaisa temperatūra ir zemāka par ēkas iekšējās nepieciešamās temperatūras minimālajai vērtībai. Ēkas siltināšana ļauj samazināt siltuma zudumus no ēkas, turklāt būtiski nemainot ēkas termisko masu. Tomēr ēkas siltināšanas ietekme uz ēkas aukstuma slodzi netiek analizēta.

Izpētes mērķa ēku siltina ar siltināšanas soli 5 cm. Par siltināšanas materiālu izmanto tirgū brīvi pieejamu siltuma izolācijas materiālu ar siltumvadītspēju  $\lambda=0,4$  W/(mK), blīvumu  $\rho=16$  kg/m<sup>3</sup>, un īpatnējo siltumietilpību  $c_p=1000$  kJ/(kgK).



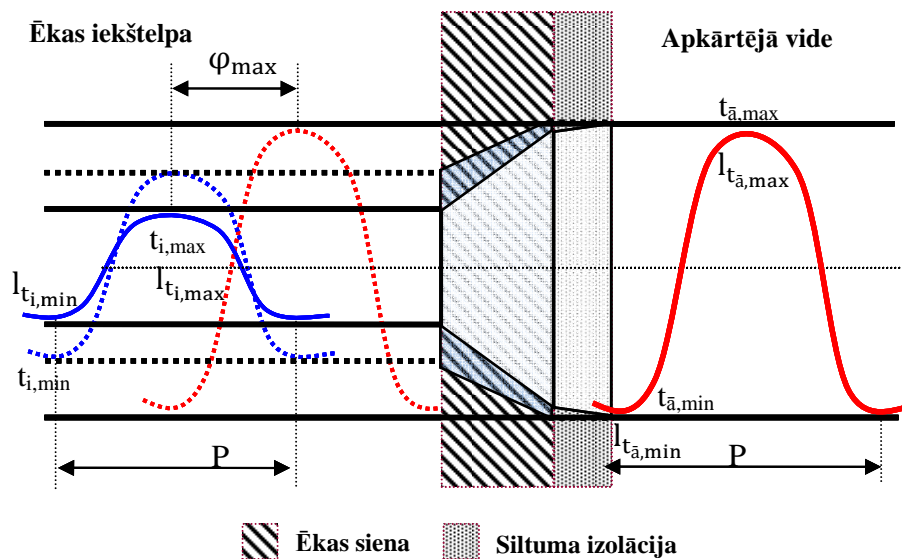
2.5. att. Ēkas īpatnējā aukstuma patēriņš un ēkas aukstuma slodzes ilgums izmaiņas atkarībā no siltuma izolācijas slāņa biezuma

Kā redzams no 2.5. attēla, pieaugot siltuma izolācijas slāņa biezumam, palielinās ēkas īpatnējais aukstuma patēriņš, savukārt samazinās ēkas aukstuma slodzes ilgums. Tas ir skaidrojams ar to, ka saules starojuma un āra gaisa temperatūras ietekme samazinās, pieaugot sienas siltuma izolācijas pakāpei.

Ēkas aukstuma slodzes palielināšanās ir saistīta ar to, ka tiek ietekmēta siltuma plūsma no ēkas iekštelpas uz apkārtējo vidi. Ēkas aukstuma slodzes maksimums palielinās, bet ēkas aukstuma slodzes ilgums samazinās, kas nozīmē to, ka ir nepieciešama lielākas jaudas aukstuma iekārta, kas strādātu īsāku laiku, lai nodrošinātu nepieciešamo ēkas iekštelpu temperatūru. Ziemas sezonā, siltuma izolācijas palielināšana veicinātu ēkas īpatnējā siltuma patēriņa samazināšanos.

#### 2.3.4. Ēkas dinamiskie parametri

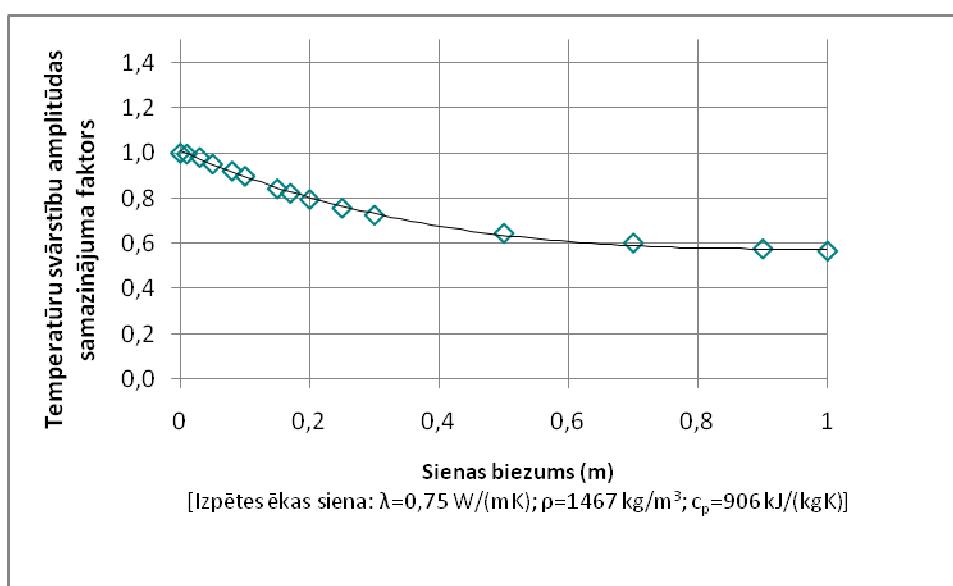
Ēkas termiskās inerces faktori parāda ēkas termiskās masas izmaiņas ietekmi, ņemot vērā ēkas iekštelpu temperatūras izmaiņas dinamisko raksturu. Vispārīgas ēkas termiskās inerces faktoru izmaiņas, veicot sienas siltināšanu, parādītas 2.6. attēlā.



2.6. att. Samazināšanās faktora  $f$  un āra gaisa un iekštelpu temperatūru maksimumu un minimumu laika nobīdes  $\varphi$  shematiskais grafiks ēkas sienai ar siltuma izolācijas slāni un bez

Ēkas iekštelpas temperatūras svārstības amplitūta, kā arī maksimumu un minimumu nobīde laikā ir atkarīga no āra gaisa temperatūras un ēkas norobežojošo konstrukciju siltumfizikalajām un ģeometriskajām īpašībām. Veicot ēkas siltināšanu, var panākt ēkas iekštelpas temperatūras svārstību amplitūdu samazinājumu un mazināt āra gaisa temperatūras ietekmi uz ēkas iekštelpu mikroklimata izmaiņām.

2.7. attēlā ir redzams temperatūras svārstību amplitūdas samazināšanās indikatora  $f$  izmaiņas atkarībā no izpētes ēkas sienas biezuma. Šīs izmaiņas nav lineāras, kas liecina par to, ka palielinoties ēkas termiskajai masai, attiecīgi palielinās ēkas termiskā inerce, līdz ar to ir novērojama ēkas iekštelpas temperatūras svārstību amplitūda samazināšanās, t.i. iekštelpas temperatūra diennakts griezumā sāk izlīdzināties.



2.7. Temperatūras svārstību amplitūdas samazināšanās faktora izmaiņas atkarībā no izpētes ēkas sienas biezuma

### 3. Saules kolektora eksperimentālā izpēte

Eksperimentālā saules siltuma sistēmas izpēte tika veikta laika periodā no 2010. gada 13. augusta līdz 2010. gada 17. septembrim. Visā izpētes perioda garumā tika mērīti un noteikti sekojoši saules kolektora darbības parametri:

- 1) Saules starojuma intensitāte  $S_{kol}$ ,  $W/m^2$ ;
- 2) Āra gaisa temperatūra  $T_{ā}$ ,  $^{\circ}C$ ;
- 3) Saules kolektora siltumnesēja atgaitas temperatūra  $T_{ag}$ ,  $^{\circ}C$ ;
- 4) Saules kolektora siltumnesēja turpgaitas temperatūra  $T_{tg}$ ,  $^{\circ}C$ ;
- 5) Saules kolektora siltuma jauda  $Q_{kol}$ , kW;
- 6) Saražotās siltuma enerģijas apjoms  $Q_{kol}$ , kWh;
- 7) Siltumnesēja caurplūde  $v_{kol}$ ,  $m^3/h$ ;
- 8) Siltumnesēja apjoms  $V_{kol}$ ,  $m^3$ ;
- 9) Saules kolektora darba ilgums  $t_{kol}$ , h.

Saules kolektora sistēmas eksperimentālā izpēte tika veikta divos režīmos:

- a) bez reflektoriem (atstarotājiem);
- b) ar reflektoriem (atstarotājiem).

Katram no režīmiem tika noteikti saules siltuma sistēmas darbības parametri, tādējādi ļaujot savstarpēji salīdzināt vakuuma cauruļu saules kolektoru eksperimentālās izpētes prototipa darbības parametrus un energoefektivitāti abos režīmos. Vakuuma cauruļu saules kolektora eksperimentālās izpētes sistēma ir redzama 3.1. attēlā.



3.1. att. Vakuuma cauruļu saules kolektora eksperimentālās izpētes sistēma

Saules siltuma sistēma sastāv no vakuuma cauruļu saules kolektora, vadības bloka un mērierīcēm, cirkulācijas sūkņa, izplešanās trauka, cirkulācijas plūsmas mērītāja, cauruļu kontūras, drošības, pretspiediena un uzpildīšanas vārstiem, kā arī atgaisotāja.

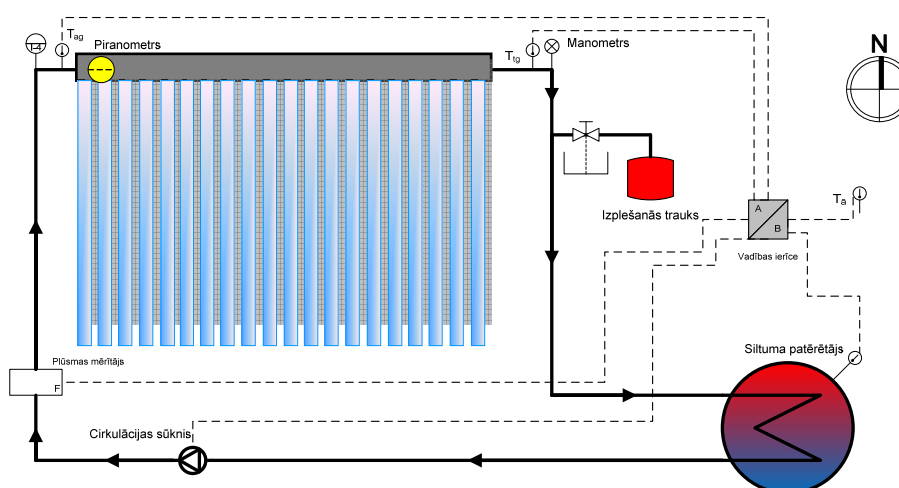
Vakuuma cauruļu saules kolektors tika orientēts precīzi pret dienvidiem  $39^{\circ}$  leņķī pret horizontālo plakni. Saules kolektora sistēma tika uzstādīta Latvijas Republikā, Cēsu novadā, Vaives pagastā, Rāmuļos (globālās pozicionēšanas koordinātes:  $57.21155$  ziemeļu platuma un  $25.414953$  austrumu garuma).

Vakuuma cauruļu saules kolektora energoefektivitātes parametri ir apkopoti 3.1. tabulā.

## Vakuuma cauruļu saules kolektora energoefektivitātes parametri

Saules kolektora optiskās efektivitātes koeficients	$\eta_0 = 0,717$
Siltuma zudumu koeficients	$a_1 = 1,52 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
No temperatūras atkarīgais siltuma zudumu koeficients:	$a_2 = 0,0085 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$

Kā siltumnesējs ir izmantots ūdens un propilēnglikola maisījums ar attiecību 3:1. Sūkņi paredzēti siltumnesēja cirkulācijas nodrošināšanai. Vadības ierīce ir savienota ar turpgaitas un āra gaisa temperatūras sensoriem un regulē cirkulācijas sūkņa darbību. Vakuuma cauruļu saules kolektora eksperimentālās izpētes prototipa principiālā shēma ir redzama 3.2. attēlā.



3.2. att. Vakuuma cauruļu saules kolektora eksperimentālās izpētes prototipa principiālā shēma

Lai veiktu saules siltuma sistēmas eksperimentālo izpēti, tika izmantotas dažādas iekārtas un mērinstrumenti. Un tie bija:

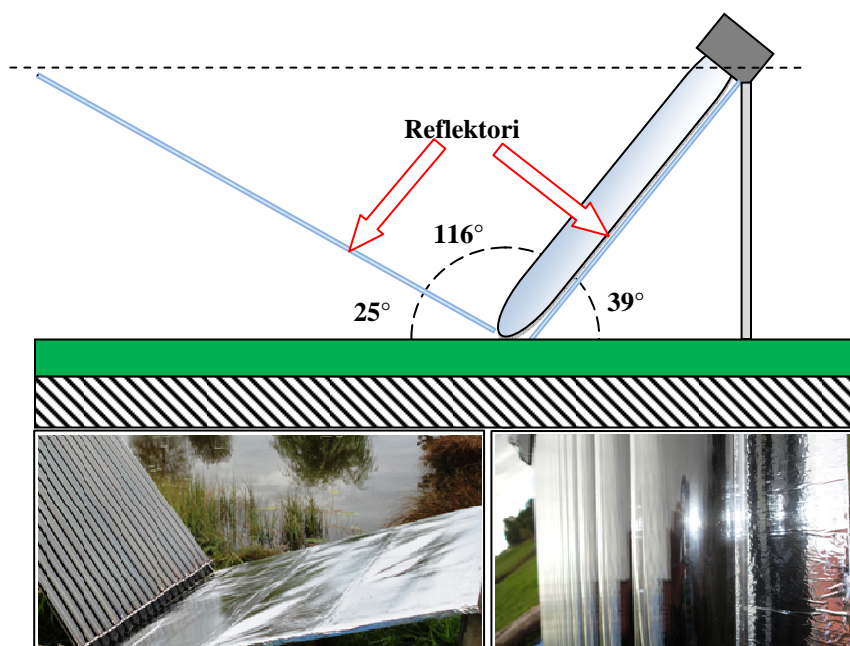
- 1) Piranometrs;
- 2) Temperatūru sensori;
- 3) Siltuma skaitītājs ar plūsmas sensoru un mērītāju;
- 4) Cirkulācijas sūkņi;
- 5) Izplešanas trauks;
- 6) Drošības vārsts;
- 7) Atgaisotājs;
- 8) Uzpildes vārsts;
- 9) Saules kolektora kontūras cirkulācijas sūkņa vadības bloks.

Saules kolektora jaudas mērījumu nenoteiktības analīze parādīja, ka saules kolektora jaudas noteikšanas nenoteiktības samazināšanai ir pirmkārt jāpievērš uzmanība saules

starojuma noteikšanai, jo, kā rāda nenoteiktību bilances analīze, saules starojuma mērījumi dod lielāko ieguldījumu (75,5-99,96 %) nenoteiktību budžetā.

### 3.1. Reflektoru ietekmes uz saules kolektora veiktspēju analīze

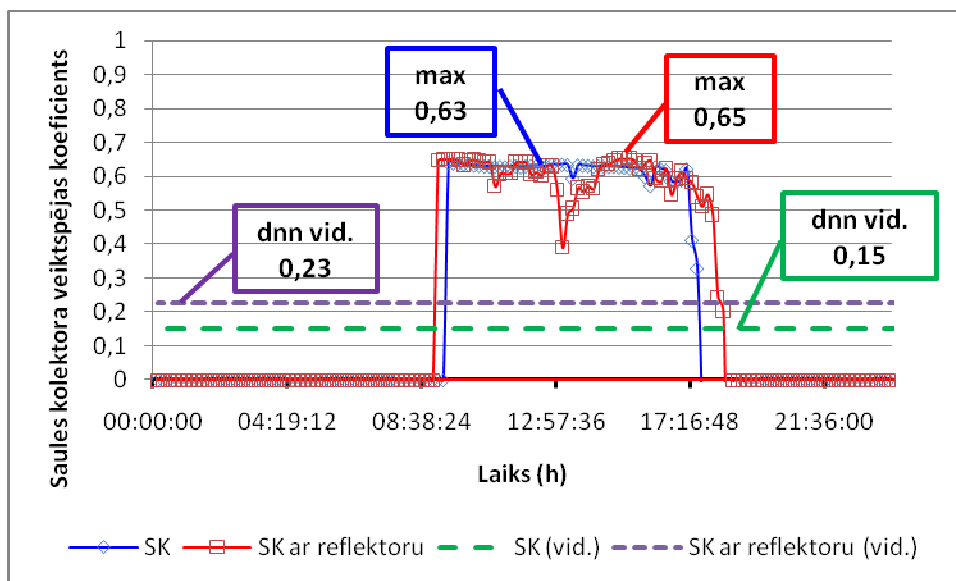
Reflektori ļauj palielināt uz saules kolektora krītošā saules starojuma intensitāti, tā uzlabojot esoša saules kolektora energoefektivitātes rādītājus. Ņemot vērā Latvijas klimata apstākļus un saules aukstuma sistēmu darbības aspektus, optimāla reflektoru izmantošana var uzlabot saules kolektora veiktspējas koeficientu, kā arī ietekmēt ekonomisko izpildījumu.



3.3. att. Vakuuma cauruļu saules kolektora ar reflektoriem un reflektoru izvietojuma principiālā shēma

3.3. attēlā ir redzama vakuuma cauruļu saules kolektora ar reflektoriem principiālā shēma. Optimālā reflektora leņķa pret horizontu vērtība tika balstīta uz literatūras apskatu un tika pieņemta 25°. Attiecīgi, ievērojot gan saules kolektora, gan reflektora leņķi pret horizontu un balstoties uz saules kolektora ģeometriskajiem parametriem, tika noteikti reflektoru ģeometriskie izmēri.

Izvērtējot saules kolektora faktisko veiktspējas koeficientu izmaiņu (skatīt 3.4. attēlu), var secināt, ka reflektora izmantošanas gadījumā ir iespējams palielināt saules kolektora veiktspējas rādītāju. Tas nozīmē, ka saules kolektors ar reflektoriem no vienas saņemtas saules starojuma enerģijas vienības spēs saražot vidēji par 7-10 % vairāk siltuma enerģijas, ja salīdzina ar saules kolektoru bez reflektora.



3.4. att. Saules kolektora veiktspējas koeficienta izmaiņas ar un bez reflektora diennakts griezumā

Lai arī reflektoru izmantošana ir saistīta ar papildus investīcijām, dažādiem tehniska rakstura un estētiskiem ierobežojumiem, tomēr tie ļauj palielināt saules kolektora veiktspēju un ražību, kā arī var tikt izvērtēta kā tehniski un ekonomiski pamatota saules kolektoru energoefektivitātes paaugstināšanas alternatīva, it īpaši salīdzinoši lielu saules siltuma sistēmu gadījumos ( $F_{kol} > 20 \text{ m}^2$ ).

### 3.2. Laika rindu datu apstrāde

Iegūtā secīgo datu un mērījumu rezultātu kopa tika balstīta uz eksperimentālās saules siltuma sistēmas izpēti, kas tika uzstādīta un darbināta laika periodā no 2010. gada 12. augusta līdz 2010. gada 19. septembrim. Datu mērījumu solis bija 10 minūtes. Galvenie mērījumu parametri bija saules starojuma intensitāte, siltumnesēja turpgaitas un atgaitas temperatūra no saules kolektora, kā arī āra gaisa temperatūra.

Ievērojot eksperimentālās izpētes uzdevumus un lai varētu efektīvāk veikt datu apstrādi, tika izvēlēti divi laika periodi:

- 1) 2010. gada 15. – 17. augusts (saules siltuma sistēma bez reflektoriem);
- 2) 2010. gada 12. – 14. septembris (saules siltuma sistēma ar reflektoriem).

Tika izmantotas trīs laika rindu statistiskās datu apstrādes metodes:

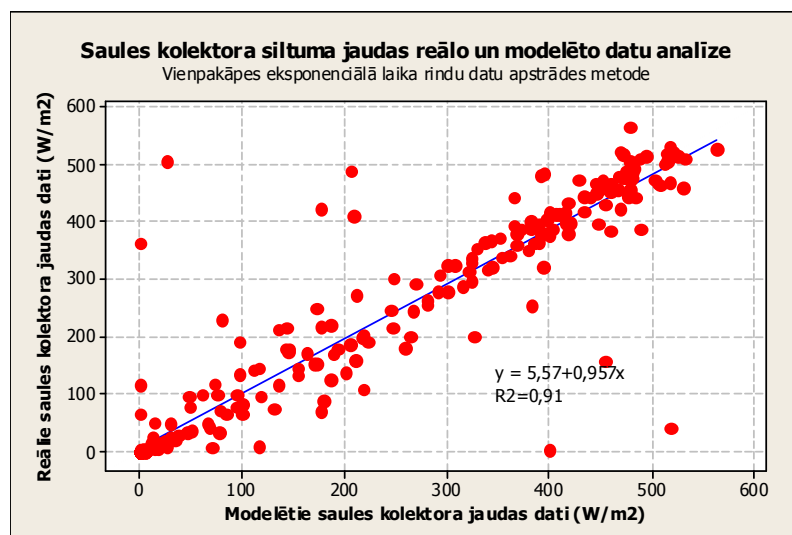
- 1) Laika rindu dekompozīcijas metodes multiplikatīvais un aditīvais modelis;
- 2) Laika rindu datu vidējā mainīgā metode ar un bez vidējā mainīgā centrēšanas;
- 3) Vienpakāpes un divpakāpes eksponenciālās izlīdzināšanas metode.

Laika rindu datu apstrāde tika veikta ar statistikas programmu MINITAB, ko plaši izmanto dažādu statistisko datu apstrādei. Visu trīs izmantoto dinamisko laika rindu datu apstrādes metožu precizitātes parametri ir apkopoti 3.2. tabulā.

## Dinamisko laika rindu datu apstrādes precizitātes parametri

Precizitātes parametri	Laika rindu dekompozīcijas metode		Laika rindu datu mainīgā vidējā metode		Eksponenciālās izlīdzināšanas metode	
	Multiplikatīvais modelis	Aditīvais modelis	Ar centrēšanu	Bez centrēšanas	Vienpakāpes	Divpakāpes
VAPN	226,57	204,46	318,25	210	177,33	185,01
VAN	47,0	34,07	34,3	23,73	18,94	20,48
VKN	7200,20	4027,04	5563,28	2894,45	3081,74	3407,26

Vienpakāpes eksponenciālā izlīdzināšanas metodei ir labākie precizitātes parametru rādītāji, kas nozīmē to, ka šī metode visprecīzāk apraksta saules kolektora siltuma jaudas izmaiņas. Izmantotās laika rindu datu apstrādes metodes reālo un iegūto datu analīze ir redzama 3.5. attēlā.



3.5. Saules kolektora siltuma jaudas reālie dati attiecībā pret modelētajiem datiem

Balstoties uz iepriekš veikto trīs laika rindu datu apstrādes metožu analīzi, lai aprakstītu saules kolektora siltuma jaudas izmaiņas atkarībā no āra gaisa temperatūras, saules starojuma intensitātes, saules kolektora optiskajiem un siltumfizikālajiem parametriem Latvijas klimata apstākļos, var izmantot vienpakāpes eksponenciālā izlīdzināšanas laika rindas datu apstrādes metodi un tās sakarības. Līdz ar to saules kolektora jaudu laika rindas  $n$  punktā var izteikt sekojošā formā:

$$Q_{kol,modl_n} = \alpha Q_{kol,l_n} + (1 + \alpha) Q_{kol,modl_{n-1}} = \alpha \left( 0,53 S_{l_n} + 2,11 \left( T_{\bar{a}_n} - \frac{T_{ag_n}}{2} \right) + 4,02 \right) + (1 + \alpha) \cdot \left( F_{kol} \left[ S_{l_{n-1}} \eta_o - a_1 \left( T_{\bar{a}_{l-1}} - \frac{T_{tg_{l-1}} + T_{ag_{l-1}}}{2} \right) - a_2 \left( T_{\bar{a}_{l-1}} - \frac{T_{tg_{l-1}} + T_{ag_{l-1}}}{2} \right)^2 \right] \right), \quad (3.1.)$$

kur  $Q_{kol,l_n}$  – saules kolektora siltuma jauda laika rindas  $n$  punktā, W.

Ievērojot to, ka katra nākošā modelētā saules kolektora siltuma jaudas vērtība ir atkarīga no iepriekšējās vērtībās, vispārīgi saules kolektora jaudas izmaiņu, izmantojot vienkāpāpes eksponenciālās laika rindu datu izlīdzināšanas metodi, var uzrakstīt sekojoši:

$$Q_{kol,mod_{l_n}} = \alpha Q_{kol_{l_n}} + (1 + \alpha) Q_{kol,mod_{l-n}}, \quad (3.2.)$$

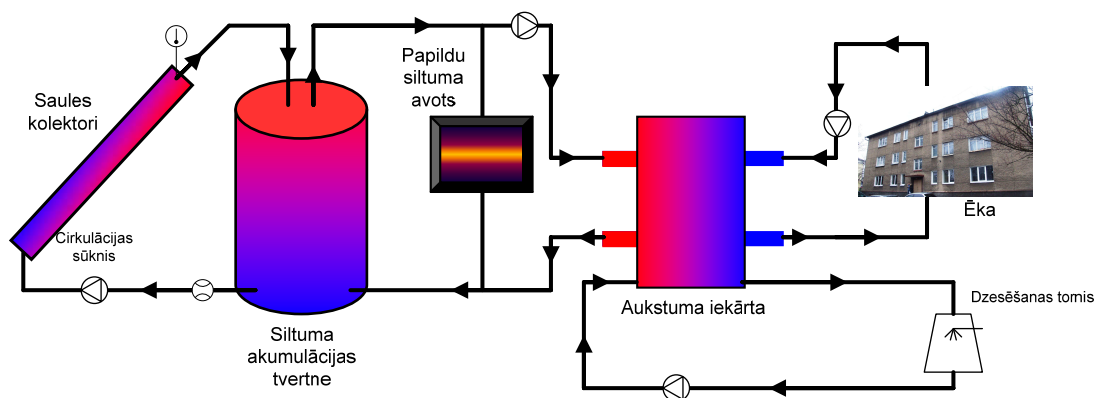
kur  $n$  – laika rindas punkts.

Iegūtās empīriskās sakarības (3.1.) un (3.2.) var tikt izmantotas saules kolektora siltuma jaudas noteikšanai un saules kolektora komponentes parametru ģenerācijai Latvijas klimata apstākļos, atkarībā no saules starojuma intensitātes, āra gaisa temperatūras un saules kolektora optiskajiem un siltumfizikālajiem parametriem.

#### 4. Saules aukstuma sistēmas modelēšana

Šajā nodaļā ir veikta izpētes ēkas aukstuma slodzes noseģšanai nepieciešamās saules aukstuma sistēmas parametru izvēle un tās darbības modelēšana.

Saules aukstuma sistēmas modelēšana tika balstīta apskatīto izpētes mērķa ēku, kuras maksimālā aukstuma slodze ir  $Q_{a,max}$  17,8 kW<sub>a</sub>, aukstuma slodzes ilgums  $t_a$  ir 692 h/gadā un īpatnējais ēkas aukstuma patēriņš  $Q_{i,a}$  ir 6,97 kWh/m<sup>2</sup> gadā, ja ēkas noteiktā iekštelpu temperatūra  $t_{not}$  ir 24 °C. Saules aukstuma sistēmas principiālo shēmu var redzēt 4.1. attēlā.

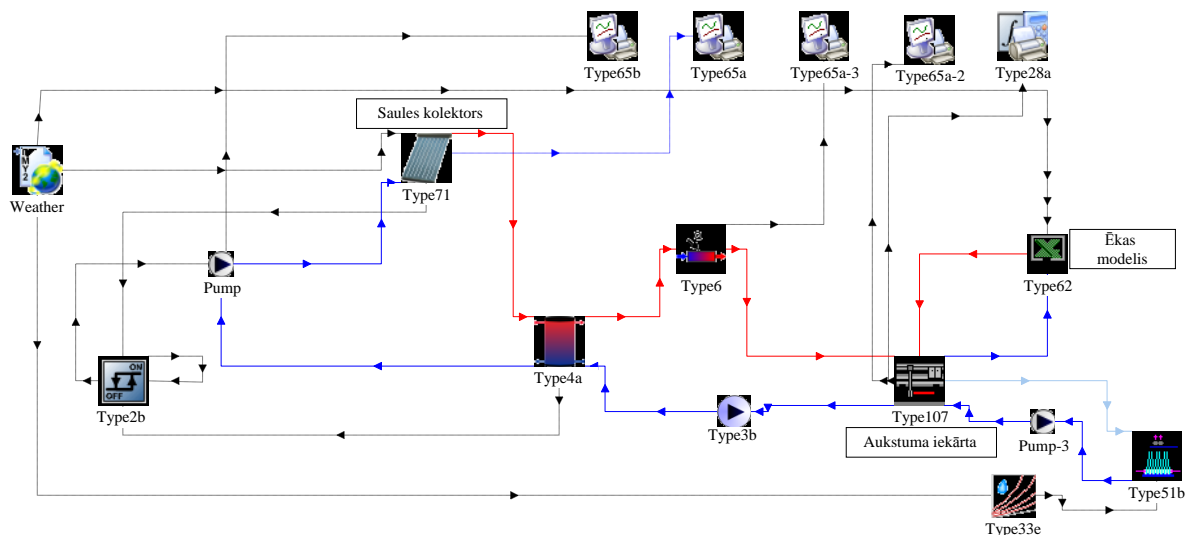


4.1. att. Modelētās saules aukstuma sistēmas principiālā shēma

Lai nosegtu ēkas aukstuma slodzi, balstoties uz literatūras apskatu, tika nolemts izmantot absorbcijas tipa aukstuma iekārtu ar nominālo aukstuma jaudu 20 kW<sub>a</sub>, bet nepieciešamo saules kolektoru platību izvēlēties, lai sasniegtu 80 % saules enerģijas nodrošinājuma daļu. Modelētās saules aukstuma sistēmas principiālā shēma ir redzama 4.1. attēlā.

#### 4.1. Saules aukstuma sistēmas modelis TRNSYS vidē

Lai varētu veikt saules aukstuma sistēmas modelēšanu un izvērtētu šādas sistēmas darbību, tika izmantota modelēšanas programma TRNSYS. Šī modelēšanas programma ir ar modulāru struktūru, kas ļauj sadalīt esošo sistēmu komponentēs, kas savā starpā ir savienotas. Saules aukstuma sistēmas principiālā shēma un modelis programmas TRNSYS vidē ir redzams 4.2. attēlā.



4.2. att. Saules aukstuma sistēmas principiālā shēma modelēšanas programmas TRNSYS vidē

Katra komponente tiek modelēta atsevišķi izmantojot matemātiskās sakarības, kas ir pieejamas TRNSYS datu bāzē vai var tikt veidotas no jauna, izmantojot dažādas datu apstrādes programmas vai programmēšanas valodas, piem., MS Excel, Matlab vai C++.

Katrs no sistēmas elementiem tiek raksturots ar dažādiem konstantiem parametriem, savukārt ievaddati un izvaddati ir atkarīgi no modelēšanas laika. Viena elementa izvaddati var tikt izmantoti kā cita elementa vai elementu ievaddati.

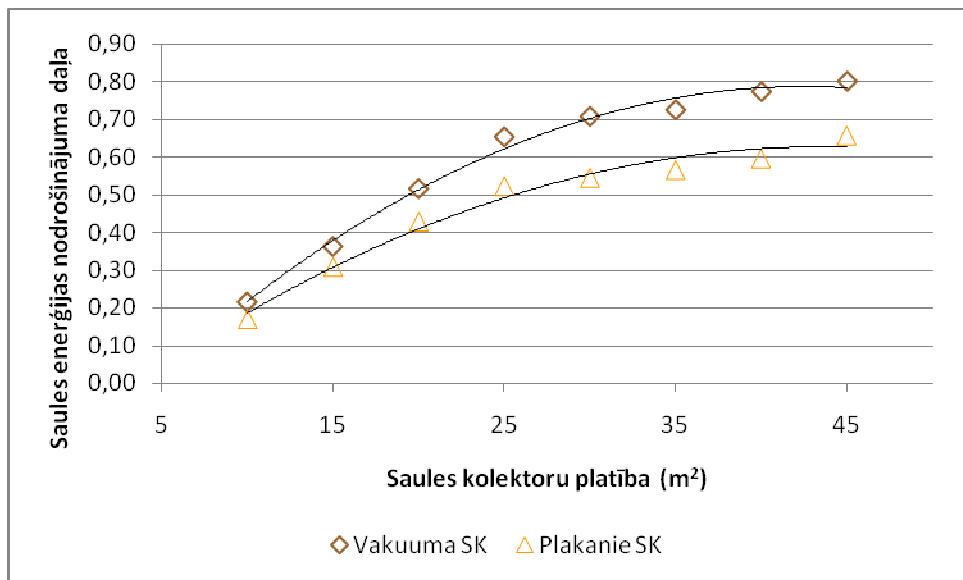
#### 4.2. Saules aukstuma sistēmas modelēšanas rezultātu analīze

Aukstuma iekārtai nepieciešamā nominālā siltuma jauda ir atkarīga no ēkas aukstuma slodzes, attiecīgās aukstuma iekārtas nominālās jaudas un aukstuma iekārtas nominālās veiktspējas koeficienta. Aukstuma iekārtas parametri tiek norādīti iekārtas tehniskajā specifikācijā vai citos pavadošajos dokumentos.

Lai nodrošinātu saules enerģijas lietojuma daļu 80 % apmērā Latvijas klimata apstākļos, īpatnējā uzstādītā saules kolektoru platība, atkarībā no saules kolektoru veida un esošajiem optiskajiem un siltumfizikālajiem parametriem, ir robežās no 3-5 m<sup>2</sup>/kW<sub>aukst.</sub>. Savukārt siltuma akumulācijas tvertnes tilpums ir atkarīgs no saules siltuma sistēmas un ir robežās no 40-75l/m<sup>2</sup>. Siltuma nesēja plūsmu nodrošina cirkulācijas sūkņi (maksimālā plūsma 200 kg/h).

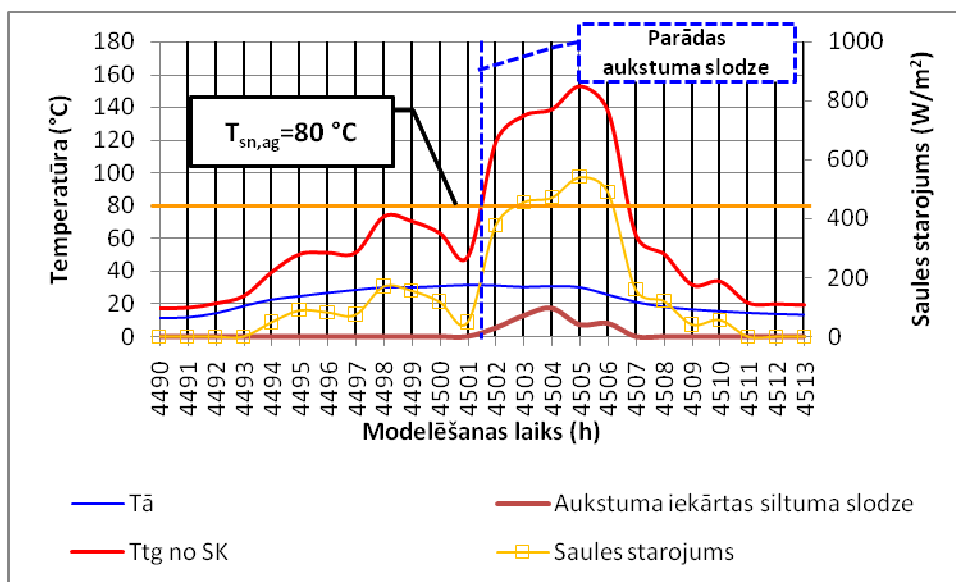
Savukārt saules enerģijas nodrošinājuma daļa raksturo cik no visa aukstuma iekārtai nepieciešamā siltuma ar noteiktu temperatūras līmeni nodrošinās ar saules siltuma sistēmu.

Pārējo nepieciešamo siltuma enerģiju būtu jānodrošina ar papildus siltuma avotu. Kā redzams no 4.3. attēla apkopotajiem saules siltuma sistēmas modelēšanas rezultātiem, saules enerģijas nodrošinājuma daļa ir atkarīga no saules kolektoru veida un uzstādītās platības.



4.3. att. Saules enerģijas nodrošinājuma daļas izmaiņas atkarībā no saules kolektoru veida un uzstādītās platības

Lai nodrošinātu saules enerģijas nodrošinājuma daļu 80 % apmērā, aukstuma iekārtai ar 20 kW<sub>a</sub> nominālo jaudu, nepieciešams 45 m<sup>2</sup> liela vakuuma cauruļu saules kolektora platība.



4.4. att. Saules kolektora turpgaitas temperatūras ar platību 45 m<sup>2</sup> un aukstuma iekārtas nepieciešamo siltuma slodzes izmaiņas

4.4. attēlā ir redzama modelētā turpgaitas temperatūra no saules kolektora ar platību 45 m<sup>2</sup> un aukstuma iekārtas nepieciešamo siltuma slodzes izmaiņas. Ja saules siltuma sistēma

būtu ar mazāku saules kolektoru virsmu vai tiktu izmantoti plakanie saules kolektori, tad iespējams būtu jāizmanto papildus siltuma avots, lai nodrošinātu aukstuma iekārtai nepieciešamo siltuma enerģijas temperatūras gradientu.

Ievērojot eksperimentālās izpētes un modelēšanas rezultātus (skatīt 4.3. attēlu), vakuuma cauruļu saules kolektori ir efektīvāki un piemērotāki tieši darbībai augstāku siltumnesēju temperatūru režīmā un spēj nodrošināt nepieciešamo siltuma enerģijas līmeni ar mazāku uzstādīto platību, turklāt šāda veida saules kolektoriem ir augstāks stagnācijas temperatūras līmenis ( $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Saules siltuma sistēma ar  $45\text{ m}^2$  vakuuma cauruļu saules kolektoru platību spēj nodrošināt aukstuma iekārtai nepieciešamo siltuma enerģijas temperatūras gradientu un nosedz gandrīz 4200 kWh, t.i. 80 % no visa aukstuma iekārtai nepieciešamās siltuma enerģijas.

### 4.3. Saules aukstuma sistēmas vides un ekonomisko aspektu analīze

#### 4.3.1. CO<sub>2</sub> samazinājums

Viens no visplašāk pielietotajiem parametriem, ar ko mūsdienās izvērtē kādas tehnoloģijas vai iekārtas ietekmi uz vidi, ir CO<sub>2</sub> emisiju samazinājums, kas raksturo izvērtētās iekārtas CO<sub>2</sub> samazinājuma potenciālu, ņemot vērā aizvietotās enerģijas vai samazinātās enerģijas CO<sub>2</sub> emisiju faktoru.

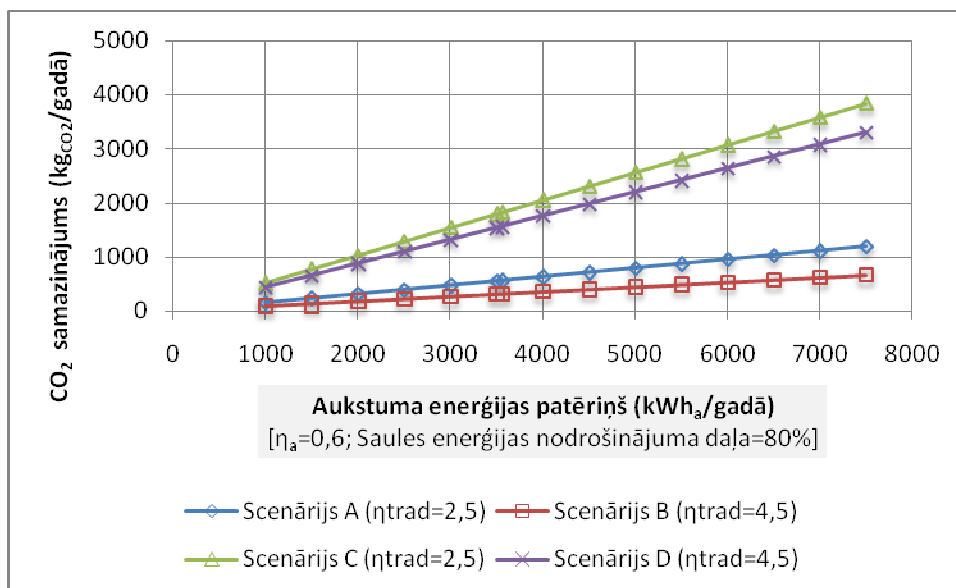
Ievērojot iepriekš minēto, tika analizēti četri iespējamie CO<sub>2</sub> samazinājuma scenāriji:

- 1) Scenārijs A: CO<sub>2</sub> samazinājums ar termiski darbināmo aukstuma iekārtu pie vidējā tradicionālās aukstuma iekārtas veikspējas koeficienta  $\eta_{trad}=2,5$ ;
- 2) Scenārijs B: CO<sub>2</sub> samazinājums ar termiski darbināmo aukstuma iekārtu pie maksimālā tradicionālās aukstuma iekārtas veikspējas koeficienta  $\eta_{trad}=4,5$ ;
- 3) Scenārijs C: CO<sub>2</sub> samazinājums ar saules siltuma sistēmu un termiski darbināmo aukstuma iekārtu pie vidējā tradicionālās aukstuma iekārtas veikspējas koeficienta  $\eta_{trad}=2,5$ ;
- 4) Scenārijs D: CO<sub>2</sub> samazinājums ar saules siltuma sistēmu un termiski darbināmo aukstuma iekārtu pie maksimālā tradicionālās aukstuma iekārtas veikspējas koeficienta  $\eta_{trad}=4,5$ .

Analīzē ir izmantotas sekojošas CO<sub>2</sub> emisiju faktoru vērtības:

- a) Siltuma enerģijai:  $0,264\text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ ;
- b) Elektroenerģijai:  $0,397\text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$ .

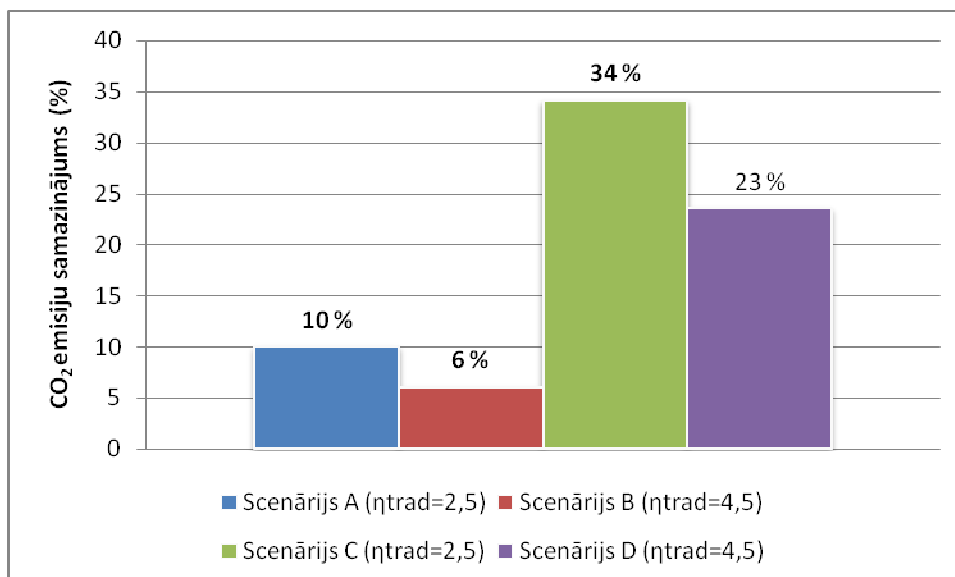
Visos scenārijos ir pieņemts, ka saules enerģijas nodrošinājuma daļa ir 80 % un termiski darbināmās aukstuma iekārtas veikspējas koeficients  $\eta_a=0,6$ .



4.5. att. CO<sub>2</sub> samazinājums atkarībā no aukstuma enerģijas patēriņa

Kā ir redzams no 4.5. attēla, pie pieņemtajām termiski darbināmās aukstuma iekārtas veikspējas koeficienta  $\eta_a$  un saules enerģijas nodrošinājuma daļas vērtībām, kā arī tradicionālās aukstuma iekārtas veikspējas koeficienta vērtībām, CO<sub>2</sub> samazinājums ir atkarīgs no aukstuma enerģijas patēriņa.

Situācijā, kad saules aukstuma sistēma tiek ekspluatēta ar lielāku noslodzi, sagaidāmie CO<sub>2</sub> ietaupījumi pieaugs. Vidējais CO<sub>2</sub> samazinājums izmantojot saules aukstuma sistēmu, ņemot vērā aprēķinu pieņēmumus, ir robežās no 0,088 līdz 0,511 kg<sub>CO2</sub>/kWh<sub>a</sub>.



4.6. att. CO<sub>2</sub> emisiju samazinājums

Kā ir redzams no 4.6. attēla, saules aukstuma sistēmas izmantošana tradicionālo aukstuma iekārtu vietā, samazina radīto CO<sub>2</sub> emisiju apjomu par 10-30 %. Līdz ar to var secināt, ka saules aukstuma sistēmas ir augstu CO<sub>2</sub> samazināšanas potenciālu un var tik

izmantotas, lai samazinātu CO<sub>2</sub> emisijas un sasniegtu noteiktos enerģētikas nozares attīstības mērķus.

#### 4.3.2. Anuitātes metode

Ekonomisko aspektu analīzē, kas ir balstīta uz anuitātes metodi, visas ar saules aukstuma sistēmas uzstādīšanu saistītās naudas plūsmas ir konvertētas virknē ikgadējos vienāda apmēra maksājumos  $A$ , kurus iegūst, pirmkārt, aprēķinot visu izmaksu pašreizējā neto vērtību dažādos laika posmos, diskontējot visas izmaksas uz sākuma laiku ( $t = 0$ ).

Aukstuma iekārtu un saules siltuma sistēmas cenas tika balstītas uz literatūras apskatu un tirgus analīzi. Īpatnējās saules aukstuma sistēmas sākuma investīcijas ir robežās no 1700-3500 LVL/kW<sub>a</sub>, kas, salīdzinot ar tradicionālajām aukstuma iekārtu īpatnējām sākuma investīcijām 45-1000 LVL/kW<sub>a</sub>, joprojām ir salīdzinoši augstas un nav pievilcīgas potenciālo lietotāju skatījumā, ja vien netiek piemēroti dažādi finansiālā atbalsta mehānismi vai subsīdijas.

Pēc Latvijas Bankas datiem 2010. gada vidējā inflācija Latvijas Republikā bija 3,7%. Diskonta likme tika pieņemta 4%. Balstoties uz ražotāju informāciju, absorbcijas tipa aukstuma iekārtām ekspluatācijas laiks tiek pieņemts 25 gadi. Savukārt visas saules aukstuma sistēmas ekspluatācijas laiks  $N$  pieņemts ir 20 gadi.

Lai noteiktu ikgadējos izdevumus  $A$ , pašreizējā neto vērtība tiek reizināta ar iepriekšējās vērtības atgūšanas faktoru  $r_f$ , ko izsaka no diskonta likmes  $d$  un sistēmas ekspluatācijas laika  $N$ .

$$A = PNV \cdot r_f(N, d) = PNV \cdot \frac{d(1 + d)^N}{(1 + d)^N - 1}, \quad (5.6.)$$

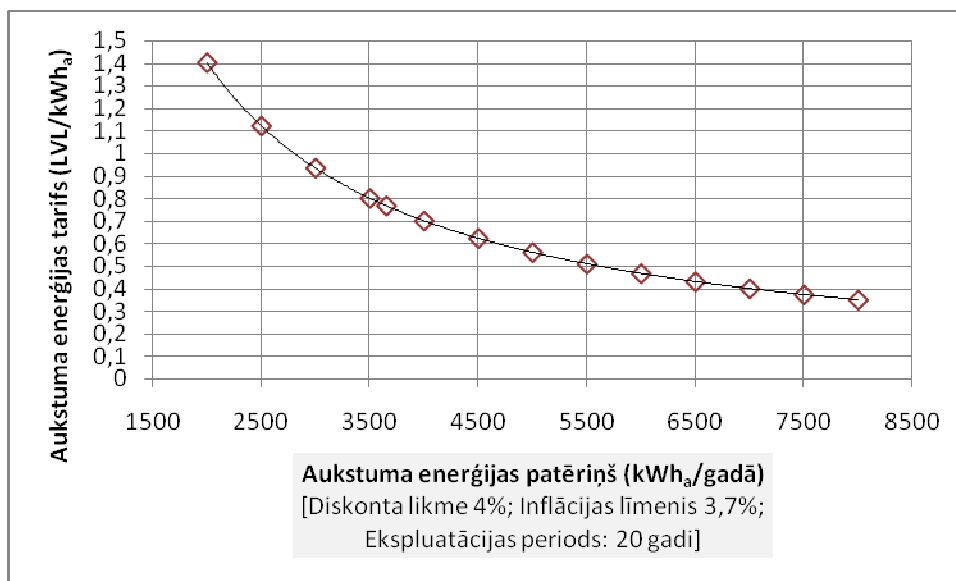
kur  $PNV$  – pašreizējā neto vērtība, LVL;

$r_f$  – iepriekšējās vērtības atgūšanas faktoru;

$d$  – diskonta likme, %;

$N$  – ekspluatācijas laiks, gadi.

Lai būtu iespējams salīdzināt saules aukstuma sistēmu ar tradicionālajiem aukstuma apgādes risinājumiem, izmanto t.s. normalizētās aukstuma enerģijas izmaksas. Normalizēto aukstuma enerģijas izmaksas izsaka kā ikgadējo izdevumu  $A$  un aukstuma enerģijas patēriņa  $Q_a$  attiecību.



4.7. att. Aukstuma enerģijas izmaksas atkarībā no gada aukstuma enerģijas patēriņa

Kā var redzēt 4.7. attēlā, analizētās saules aukstuma sistēmas ekonomisko izdevīgumu ietekmē gada aukstuma enerģijas patēriņš. Pieaugot gada aukstuma patēriņam, saražotās aukstuma enerģijas vienības izmaksas samazinās. Tomēr ņemot vērā izteiktas saules energotehnoloģiju tirgus cenu straujās samazināšanās un elektroenerģijas tarifa nepārtrauktā pieauguma tendences, kā arī CO<sub>2</sub> kvotu cenas biržā, makroekonomisko parametru izmaiņas un zinātniskās izpētes progresu šajā jomā pēdējos divdesmit gados, ir sagaidāms, ka saules aukstuma sistēmas kļūs ekonomiski pamatotas un veicinās atjaunojamo energoresursu izmantošanu, tādējādi palīdzot sasniegt enerģētikas nozares attīstības mērķus.

## Secinājumi

1. Izstrādāta un uz izpētes mērķa ēkas piemēra aprobēta iekštelpas temperatūras nodrošināšanai vasarā nepieciešamā saules siltuma enerģiju izmantojošās aukstuma iekārtas izvēles metodika, kuras palīdzību iespējams:
  - Modelēt ēkas norobežojošo konstrukciju ģeometrisko, optisko, stacionāro un dinamisko parametru un energoefektivitātes pasākumu ietekmi uz ēkas aukstuma slodzi, ēkas aukstuma slodzes ilgumu un ēkas iekštelpas temperatūru.
  - Noteikt optimālo aukstuma iekārtas aukstuma jaudu un prognozēt tās noslodzi.
  - Izvērtēt saules kolektoru veiktspējas un siltuma ražību Latvijas klimata apstākļos.
  - Modelēt saules aukstuma sistēmas darbību un analizēt pielietojuma vides un ekonomiskos aspektus.
2. Izstrādāts un validēts Latvijas klimata apstākļiem piemērots ēkas dinamiskās aukstuma slodzes aprēķinu modelis „Cool”. Izmantojot izpētes mērķa ēku, ir modelēti dažādu energoefektivitātes pasākumu un parametru izmaiņu ietekme uz ēkas aukstuma

- slodzi, ēkas aukstuma slodzes ilgumu un iekštelpas temperatūras svārstībām, ja ēkas iekštelpu noteiktā temperatūra  $t_{not} \leq 24 \text{ }^\circ\text{C}$ .
3. Ietekmes uz ēkas aukstuma slodzi, ēkas aukstuma slodzes ilgumu un iekštelpas temperatūras svārstībām modelēšanas rezultātu analīze rāda, ka:
    - Iekšējo siltuma ieguvumu palielināšanās ietekmei nav lineārs raksturs. Ja siltuma ieguvumu vērtība pārsniedz  $10 \text{ W/m}^2$  pie nemainīgiem ēkas norobežojošo konstrukciju parametriem, vērojams straujāks ēkas aukstuma slodzes pieaugums, jo siltuma ieguvumi kļūst par dominējošo ēkas aukstuma slodzes avotu. Līdz siltuma ieguvumu apjomam  $10 \text{ W/m}^2$ , ēkas aukstuma slodzi ietekmē dominē āra gaisa temperatūra un saules starojums.
    - Ēkas norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta palielināšanās pie nemainīgiem siltuma ieguvumiem, nelineāri samazina īpatnējo ēkas aukstuma enerģijas patēriņu un nebūtiski ietekmē ēkas aukstuma slodzes ilgumu, jo notiek intensīvāka ēkas dabiskā atdzišana. Samazinoties ēkas norobežojošo konstrukciju termiskai pretestībai, palielinās siltuma apmaiņas procesi starp ēkas iekšējām un apkārtējo vidi.
    - Ēkas ārējo caurspīdīgo norobežojošo konstrukciju virsmas laukuma īpatsvara palielināšanās samazina ēkas termisko masu un veicina ēkas aukstuma slodzes palielināšanos. Stikloto virsmu īpatsvaram pārsniedzot 60 % ir lielākas ēkas iekštelpu temperatūras svārstības, jo samazinās siltuma enerģijas akumulācija ēkas norobežojošās konstrukcijās.
    - Veicot ēkas siltināšanu, ēkas aukstuma enerģijas patēriņš, pie nemainīgiem siltuma ieguvumiem, nelineāri pieaug atkarībā no uzliktā siltuma izolācijas slāņa biezuma, bet ēkas aukstuma slodzes ilgums samazinās. To veicina sliktāka siltuma apmaiņa starp ēkas iekšējām un apkārtējo vidi.
    - Pieaugot ēkas sienas biezumam, pieaug ēkas termiskā masa, samazinās ēkas iekštelpas temperatūras svārstības pie nemainīgiem siltuma ieguvumiem, un tas pozitīvi ietekmē ēkas iekštelpu mikroklimatu. Savukārt liels siltuma izolācijas slāņa biezums ( $>0,1-0,15 \text{ m}$ ) pie nemainīgiem siltuma ieguvumiem veicina ēkas iekštelpu temperatūras svārstību palielināšanos, jo siltuma ieguvumu radītās siltuma plūsmas no ēkas iekšējām uz apkārtējo vidi samazinās.
  4. Darbā veikta eksperimentālā izpēte, izmantojot vakuuma cauruļu saules kolektoru, lai noteiktu tā siltuma jaudu atkarībā no āra gaisa, siltumnesēja turpgaitas un atgaitas temperatūrām un saules starojuma intensitātes. Eksperimentālajiem datiem ir raksturīga tendence, cikliskums, sezonālitate un gadījuma komponentes, tāpēc eksperimentālie dati ir apstrādāti, izmantojot laika rindu datu apstrādes metodes: laika rindu dekompozīcijas metode ar multiplikatīvo un aditīvo modeli, laika rindu datu vidējā mainīgā metode ar un bez vidējā mainīgā centrēšanu, kā arī vienpakāpes un divpakāpes eksponenciālās izlīdzināšanas metode. Izmantojot precizitātes kritērijus: vidējo absolūto procentuālo kļūdu, vidējo absolūto novirzi un vidējā kvadrātisko novirzi, tika noteikts, ka precīzākus rezultātus nodrošina laika rindu datu vienpakāpes

eksponenciālā izlīdzināšanas metode. Iegūtā empīriskā sakarība ir piemērota un izmantota saules kolektora darbības izvērtēšanai Latvijas klimata apstākļos un saules aukstuma sistēmas modelēšanai programmas TRNSYS vidē.

5. Veikta izpēte ēkas aukstuma slodzes noseģšanai ar saules siltuma enerģiju darbināmu absorbcijas tipa aukstuma iekārtu. Saules aukstuma sistēmas izpēte veikta ar modelēšanas programmas TRNSYS palīdzību, tajā kā ārējo datu avotu integrējot modeli „CooL” un iestrādājot saules kolektora eksperimentālās izpētes rezultātus. Modelēšanas rezultātu analīze liecina, ka no enerģētiskā un tehniskā viedokļa ar saules siltuma enerģiju var nosegt būtisku aukstuma iekārtai nepieciešamās siltuma enerģijas daļu. Izpētes mērķa ēkā, saules aukstuma sistēma ar saules kolektoru platību 45 m<sup>2</sup> un uzstādīto aukstuma iekārtas jaudu 20 kW<sub>a</sub>, var nosegt 80 % no visas aukstuma iekārtai nepieciešamās siltuma enerģijas daudzuma.
6. Veikta plakano saules kolektoru un vakuuma cauruļu saules kolektoru modelēšana, izmantojot saules kolektora eksperimentālās izpētes datus un TRNSYS programmu, lai nodrošinātu aukstuma iekārtai nepieciešamo siltuma enerģijas temperatūras līmeni Latvijas klimata apstākļos. Vakuuma cauruļu saules kolektori ir piemērotāki augstākas siltumnesēja temperatūras režīmam (>70 °C), jo tiem ir mazāki siltuma zudumi no saules kolektora apkārtējā vidē un to stagnācijas temperatūras robeža ir augstāka (190-260 °C), turklāt ir nepieciešama mazāka vakuuma saules kolektoru platība, ja salīdzina ar plakanajiem saules kolektoriem.
7. Saules aukstuma sistēmas vides aspektu analīze rāda, ka salīdzinot ar elektroenerģiju izmantojošajām kompresijas tipa aukstuma iekārtām, ir iespējams samazināt CO<sub>2</sub> emisiju gada apjomu no 10 līdz gandrīz 35 % atkarībā no ēkas aukstuma enerģijas patēriņa.
8. Saules aukstuma sistēmas ekonomisko aspektu analīze rāda, ka pie pašreizējām saules kolektoru un termiski darbināmu aukstuma iekārtu tirgus cenām, elektroenerģijas tarifa un CO<sub>2</sub> kvotu cenām biržā, to sākuma investīcijas un ekspluatācijas izmaksas nav zemākas, ja salīdzina ar tradicionālajām ēkas aukstuma apgādes sistēmās izmantotajām kompresora tipa aukstuma iekārtām. Tomēr ņemot vērā izteiktas saules energotehnoloģiju tirgus cenu straujās samazināšanās un elektroenerģijas tarifa nepārtrauktā pieauguma tendences, kā arī CO<sub>2</sub> kvotu cenas biržā, makroekonomisko parametru izmaiņas un zinātniskās izpētes progresu šajā jomā pēdējos divdesmit gados, saules aukstuma sistēmas ir uzskatāmas par ilgtspējīgu un ekonomiski pamatotu aukstuma apgādes tehnoloģiju un var tikt pilnvērtīgi izmantota enerģētiskas nozares ambiciozo attīstības mērķu sasniegšanai.