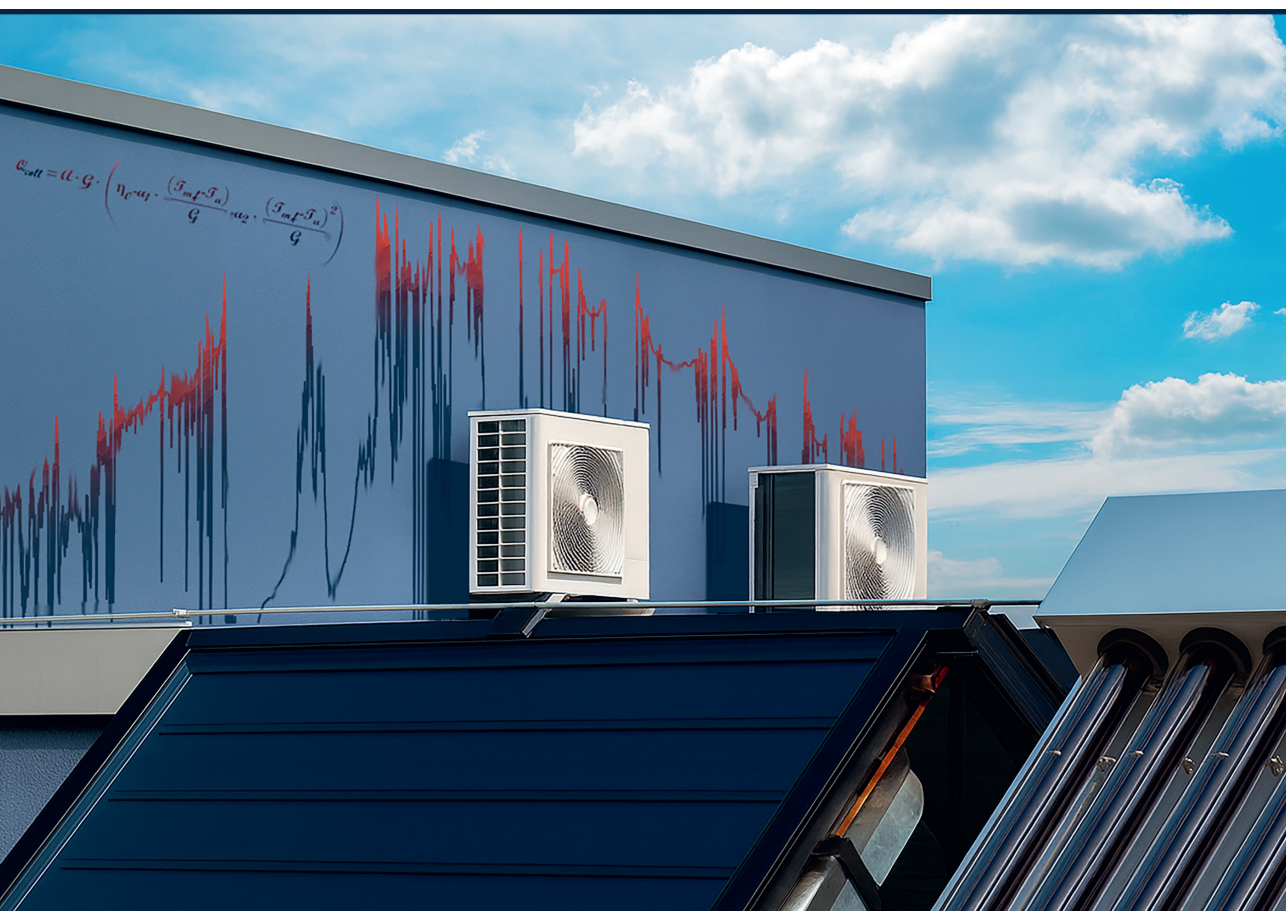


Raimonds Bogdanovičs

SAULES KOLEKTORU UN SILTUMSŪKŅU TEHNOLOĢIJAS VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA CENTRALIZĒTAJĀ SILTUMAPGĀDĒ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības un mašīnzinību fakultāte
Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūts

Raimonds Bogdanovičs

Doktora studiju programmas “Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija”

**SAULES KOLEKTORU
UN SILTUMSŪKŅU TEHNOLOĢIJAS
VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA
CENTRALIZĒTAJĀ SILTUMAPGĀDĒ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
asociētais profesors, *Dr. sc. ing.*
JURĢIS ZEMĪTIS

Zinātniskais līdzvadītājs
asociētais profesors, *Dr. sc. ing.*
ALEKSANDRS ZAJACS

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Bogdanovičs R. Saules kolektoru un siltumsūkņu tehnoloģijas veiktspējas novērtēšana centralizētajā siltumapgādē. Promocijas darba kopsavilkums.
Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 34 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-06”
2025. gada 27. maija lēmumu Nr. 04030-9.6/1.

Vāka attēla autors – Raimonds Bogdanovičs, attēla grafisko apstrādi veica Veronika Jonova.

<https://doi.org/10.7250/9789934372001>
ISBN 978-9934-37-200-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 18. septembrī plkst. 13 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības un mašīnzinību fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 546. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. Hatef Madani Larijani*,
Karaliskais Tehnoloģiju institūts, Zviedrija

Vadošais pētnieks *Dr. Apostolos Michopoulos*,
Kipras Universitāte, Kipra

Emeritētais profesors *Dr. sc. ing. Arturs Lešinskis*,
Rīgas Tehniskā universitāte

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.

Raimonds Bogdanovičs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 96 attēli, 32 tabulas, kopā 133 lappuses. Literatūras sarakstā ir 177 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI	5
IEVADS.....	6
1. Saules enerģijas utilizācija.....	11
2. Ar saules enerģiju papildinātā centralizētā siltumapgāde.....	15
3. Ar saules enerģiju papildināts siltumsūknis centralizētās siltumapgādes sistēmā	19
4. Siltumnesēja temperatūras svārstību ietekme uz ūdens-ūdens siltumsūkņa veikspēju	23
SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI	29
PATEICĪBAS.....	31
LITERATŪRAS SARAKSTS	32

PROMOCIJAS DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

<i>AWHP</i>	gaiss-ūdens siltumsūknis (<i>air-to-water heat pump</i>)
<i>BWHP</i>	ūdens-ūdens siltumsūknis (<i>brine-to-water heat pump</i>)
<i>COP</i>	veiktspējas koeficients (<i>coefficient of performance</i>)
<i>DH</i>	centralizētā siltumapgāde (<i>district heating</i>)
<i>DHW</i>	dzeramais karstais ūdens (<i>domestic hot water</i>)
<i>ETC</i>	vakuuma caurules saules kolektors (<i>evacuated tube collectors</i>)
<i>FPC</i>	plakanās virsmas saules kolektori (<i>flat-plate collectors</i>)
<i>LTDH</i>	zemas temperatūras centralizētā siltumapgāde (<i>low temperature district heating</i>)
<i>MAD</i>	vidējā absolūtā novirze (<i>mean absolute deviation</i>)
<i>HP</i>	siltumsūknis (<i>heat pump</i>)
<i>PV</i>	fotoelektriskie (<i>photovoltaic</i>)
<i>PVT</i>	fotoelektriskie termiskie (<i>photovoltaic-thermal</i>)
<i>RES</i>	atjaunīgie energoresursi (<i>renewable energy sources</i>)
<i>SD</i>	standartnovirze (<i>standard deviation</i>)
<i>ST</i>	saules siltumenerģija (<i>solar thermal</i>)
<i>TRNSYS</i>	dinamiskās simulācijas datorprogramma
<i>ULTDH</i>	īpaši zemas temperatūras centralizētā siltumapgāde (<i>ultra-low temperature district heating</i>)

IEVADS

Promocijas darba izstrādi autors sāka ar praktisku inženiertehnisku uzdevumu, kā maksimāli izmantot saules enerģiju centralizētās siltumapgādes nozarē. Tas radīja koncepciju kombinēt saules enerģiju ar ūdens-ūdens siltumsūkņiem, nosakot galveno tehnoloģisko jautājumu – vai saules enerģijas svārstības ietekmē siltumsūkņa veikspēju kombinētājā sistēmā? Tas savukārt radīja zinātniskās pētniecības jautājumu – kā izmērīt un novērtēt saules enerģijas mainīguma radīto siltumnesēja temperatūras svārstību ietekmi uz ūdens-ūdens siltumsūkņa darbību.

Pētījuma nozīmīgums

Pēdējos gados ir ievērojami palielinājis zinātnisko pētījumu skaits par siltumsūkņiem, kombinētiem ar saules enerģiju, izmantojot saules kolektorus, saules paneļus un kombinētās sistēmas. Tomēr šo tehnoloģiju integrācijai ar centralizētās siltumapgādes tīkliem, īpaši Ziemeļeiropas klimatiskajos apstākļos, ir pievērsta maza uzmanība.

Lai līdz 2050. gadam sasniegtu Parīzes nolīgumā noteikto oglekļa neitralitāti, ir jāatsakās no fosilā kurināma izmantošanas siltumenerģijas ražošanā. Siltumsūkņu un saules enerģijas integrēšana zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmās ir daudzsološs risinājums siltumenerģijas ražošanai un uzglabāšanai ilgtspējīgā un efektīvā veidā. Siltumsūkņu efektivitāti var uzlabot vēl vairāk, izmantojot saules siltumenerģiju, savukārt fotoelektriskie paneļi var nodrošināt atjaunojamo elektroenerģiju siltumsūkņu darbināšanai.

Šāda kombinācija ne tikai ļauj ražot siltumenerģiju bez siltumnīcefekta gāzu emisijām, bet arī sniedz iespēju dzesēt telpas, kas kļūst arvien svarīgāks aspekts, jo Latvija izjūt klimata izmaiņu ietekmi. Pētījumā pievērsta uzmanība saules siltuma maksimālai izmantošanai centralizētās siltumapgādes tīklos, atbalstot plašākus mērķus dekarbonizēt siltumapgādes nozari un veicināt atjaunojamo energoresursu integrāciju.

Promocijas darba mērķis ir izpētīt stratēģijas saules siltuma izmantošanas maksimizēšanai Ziemeļeiropas klimata apstākļos centralizētās siltumapgādes sistēmās, integrējot saules siltumenerģijas un siltumsūkņu tehnoloģijas.

Galvenie uzdevumi

1. Novērtēt saules enerģijas potenciālu un mainīgumu Latvijā, lai integrētu to ar saules siltuma un siltumsūkņu balstītu centralizēto siltumapgādi.
2. Izpētīt saules kolektoru veikspēju dažādos siltumnesēja temperatūras režīmos un analizēt siltumnesēja temperatūras svārstības mainīgos apstākļos.
3. Izpētīt saules enerģijas integrēšanas iespējas centralizētās siltumapgādes sistēmās un izvērtēt centralizētās siltumapgādes efektivitāti saules kolektoru saražotās siltumenerģijas uzkrāšanā, lai novērtētu iespējas šo enerģiju sadalīt tuvumā esošajām mājām.
4. Izpētīt saules enerģijas, siltumsūkņu un centralizētās siltumapgādes sistēmas kombināciju, lai identificētu stratēģijas saules siltuma maksimizēšanai uz ierobežotas jumtu platības.
5. Analizēt siltumnesēja temperatūras svārstību ietekmi uz ūdens-ūdens siltumsūkņa darbību.
6. Izvērtēt saules kolektora temperatūras un plūsmas svārstību ietekmi uz ūdens-ūdens siltumsūkņa darbību.

Aizstāvamās tēzes

- Saules enerģijas un siltumsūkņu tehnoloģiju integrēšana zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes tīklos ir efektīva stratēģija, lai maksimāli palielinātu saules siltuma utilizāciju.
- Saules kolektoros siltumnesēja temperatūras svārstības galvenokārt izraisa saules starojuma mainīgums; svārstības var samazināt, darbinot sistēmu zemākās temperatūrās.
- Siltuma avota puses temperatūras svārstības samazina ūdens-ūdens siltumsūkņu veiktspējas koeficientu (*COP*), savukārt temperatūras svārstībām patērētāja pusē ir minimāla ietekme.
- Ūdens-ūdens siltumsūkņu veiktspējas koeficients ir īpaši jutīgs pret temperatūras svārstībām avota pusē, ja temperatūra ir zemāka par 20 °C. Tāpēc pētījuma rezultāti ir īpaši nozīmīgi gadījumos, kad siltumsūkņi tiek izmantoti īpaši zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmās vai kad par siltuma avotu kalpo fotoelektriskie termiskie kolektori.

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir integrētas metodoloģijas izstrāde, kas apvieno eksperimentālos testus, simulācijas modeļus un energoefektivitātes aprēķinus, lai novērtētu un maksimāli palielinātu saules siltumenerģijas un ūdens-ūdens siltumsūkņu tehnoloģijas veiktspēju zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmā apstākļos ar svārstīgu siltumnesēja temperatūru. Atšķirībā no tradicionālajiem siltuma avotiem, piemēram, ģeotermālā siltuma vai gruntsūdeņiem, kas nodrošina stabilus termiskos apstākļus, šajā pētījumā īpaša uzmanība pievērsta dinamiskām temperatūras izmaiņām, ko izraisa saules enerģijas mainīgums – aspektam, kas līdz šim zinātniskajā literatūrā ir aplūkots ļoti maz.

Promocijas darba pētījums aplūko dinamisko mijiedarbību starp saules siltumenerģijas kolektoriem, centralizētās siltumapgādes sistēmu un siltumsūkņiem, īpašu uzmanību pievēršot tam, kā saules izraisītās temperatūras svārstības ietekmē siltumsūkņa darbības veiktspēju (*COP*) dažādās siltumnesēja temperatūrās. Siltumsūkņu ražotāji šādos apstākļos parasti testus neveic, tāpēc šis pētījums aizpilda būtisku zināšanu trūkumu, piedāvājot eksperimentālu novērtējumu un inovatīvu metodoloģiju šo ietekmju mērīšanai un izvērtēšanai reālos ekspluatācijas apstākļos. **Tiek izvirzīta hipotēze**, ka temperatūras svārstībām, ko izraisa saules enerģijas integrācija, ir būtiska ietekme uz ūdens-ūdens siltumsūkņu veiktspēju.

Piedāvātā metodoloģija apvieno vairākas metodes, tostarp statistisko analīzi, literatūras apskatus, lauka mērījumus, divu eksperimentālo testēšanas iekārtu izstrādi un plašu datoru simulāciju veikšanu, izmantojot dinamisko simulācijas programmatūru *TRNSYS 18*. Pētot dažādas sistēmas konfigurācijas un temperatūras režīmus, tika atklāts, kā var maksimāli izmantot saules siltumenerģiju, sniedzot pierādījumus par tās piemērotību praktiskai ieviešanai.

Praktiskais nozīmīgums izpaužas kā atbalsts centralizētās siltumapgādes nozares attīstībai, sniedzot vērtīgu ieskatu atjaunojamo energoresursu – īpaši saules enerģijas un siltumsūkņu – integrācijā. Pētījuma rezultāti, tostarp statistiskā analīze, eksperimentālie dati un simulāciju rezultāti, var kalpot kā pamats stratēģiskiem lēmumiem siltumapgādes tīklu modernizācijā, saules siltuma ražošanas optimizēšanā un sistēmas efektivitātes uzlabošanā. Lai gan pētījums koncentrējas uz Ziemeļeiropas, īpaši Latvijas klimatiskajiem apstākļiem, piedāvātās metodes un secinājumi ir pielāgojami arī citām reģionālām īpatnībām, veicinot ilgtspējīgu un noturīgu centralizētās siltumapgādes sistēmu attīstību plašākā mērogā.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs ir sadalīts četrās nodaļās. Katra nodaļa ir neatkarīgs pētījums ar savām metodēm, rezultātiem un secinājumiem. Nodaļas savstarpēji ir saistītas, viena pētījuma daļas secinājumi tiek izmantoti citās daļās atbilstoši izstrādātajai pētījuma metodoloģijai. Kopā tās sniedz plašāku pētījuma tēmas aptvērumu.

1. nodaļa. Saules enerģijas utilizācija

- Lai izpildītu pirmo uzdevumu, tika analizēti statistiskie un klimatiskie dati, kā arī veikti lauka mērījumi saules kolektoru sistēmā, kas uzstādīta viengīmenes mājā, un mērījumi saules kolektoru eksperimentālajā testēšanas stendā.
- Lai īstenotu otro uzdevumu, tika izstrādāts, uzbūvēts un dažādos laika un darbības apstākļos darbināts saules kolektoru testēšanas stends, kā arī izveidots to datoru simulācijas modelis, izmantojot *TRNSYS 18* simulācijas programmatūru.

2. nodaļa. Ar saules enerģiju papildinātā centralizētā siltumapgāde

- Lai izpildītu trešo uzdevumu, tika veikts padziļināts zinātniskās literatūras apskats un izstrādāti divi datoru simulācijas modeļi, izmantojot *TRNSYS 18*.

3. nodaļa. Ar saules enerģiju papildināts siltumsūknis centralizētās siltumapgādes sistēmā

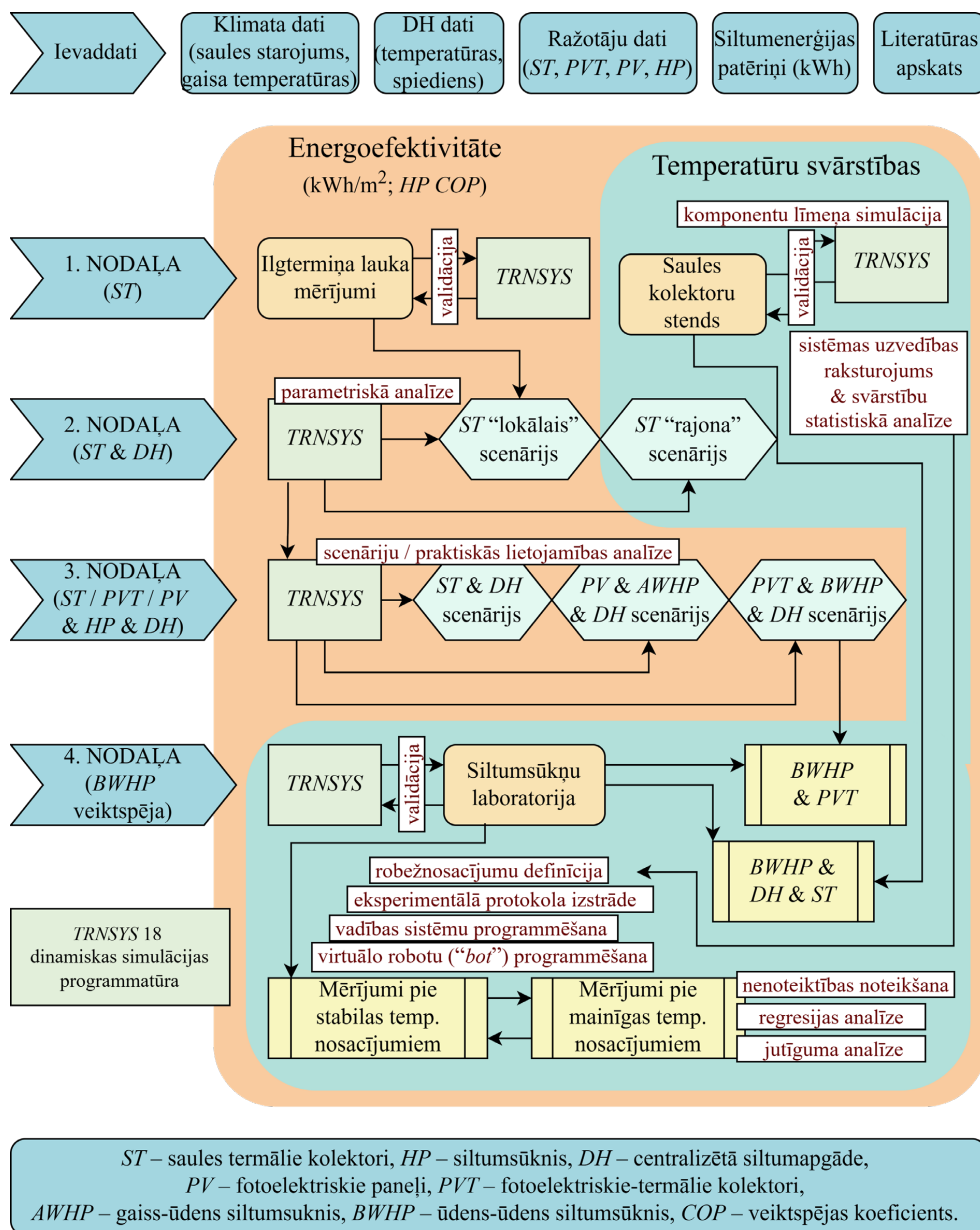
- Ceturtā uzdevuma izpildei tika veikts plašs zinātniskās literatūras pārskats un izstrādāti trīs datoru simulācijas modeļi, izmantojot *TRNSYS 18*.

4. nodaļa. Siltumnesēja temperatūras svārstību ietekme uz ūdens-ūdens siltumsūkņa veikspēju

- Lai īstenotu piekto uzdevumu, tika izstrādāta un uzbūvēta siltumsūkņa testēšanas laboratorija, kā arī izveidots tai atbilstošs *TRNSYS 18* modelis.
- Sestā uzdevuma izpildei siltumsūkņa testēšanas laboratorija tika darbināta, izmantojot datus no saules kolektoru testēšanas stenda.

Šis pētījums veicina Apvienoto Nāciju Organizācijas ilgtspējīgas attīstības mērķu sasniegšanu, īpaši 7. mērķa “Pieejama un tīra enerģija”, 11. mērķa “Ilgtspējīgas pilsētas un kopienas” un 13. mērķa “Cīņa ar klimata pārmaiņām” īstenošanu.

Pētījuma metodoloģija



0.1. attēls. Pētījuma metodoloģija.

Ar šo pētījumu saistīto publikāciju saraksts

Raksti (SCOPUS)

1. **Bogdanovics, R.**, Zemitis, J., Zajacs, A., Borodinecs, A., 2024. Small-Scale District Heating System as Heat Storage for Decentralized Solar Thermal Collectors during Non-Heating Period. *Energy*. Vol. 298.
2. Zajacs, A., Lebedeva, K., **Bogdanovics, R.**, 2023. Evaluation of Heat Pump Operation in a Single-Family House. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. Vol. 60.
3. Zajacs, A., **Bogdanovics, R.**, Zeiza-Seleznova, A., Valancius, R., Zemitis, J., 2022. Integration of decentralized solar collectors into a district heating system. *Sustainable Cities and Society*. Vol. 83.
4. Zajacs, A., **Bogdanovics, R.**, Borodinecs, A., 2020. Analysis of low temperature lift heat pump application in a district heating system for flue gas condenser efficiency improvement. *Sustainable Cities and Society*. Vol. 57.

Konferenču raksti (SCOPUS)

1. **Bogdanovics, R.**, Zemitis, J., Zajacs, A., Borodinecs, A., 2025. Optimizing the Integration of Booster Heat Pump with Solar Thermal Collectors and Low-Temperature District Heating System in the Baltic Region: Laboratory Measurements. *2025 ASHRAE Winter Conference*. 8.–12. februāris, 2025, Orlando, Florida, ASV.
2. **Bogdanovics, R.**, Zemitis, J., Zajacs, A., 2023. TRNSYS model of district heating system used as heat storage for decentralized solar thermal collectors. *18th IBPSA Conference on Building Simulation, BS 2023*, Building Simulation Conference Proceedings. 4.–6. septembris, 2023, Šanhaja, Ķīna.
3. **Bogdanovics, R.**, Zajacs, A., 2022. Supply Temperature Stabilization of Decentralized Solar Thermal Collectors for Integration into District Heating System. *2022 ASHRAE Virtual Winter Conference*. ASHRAE Transactions. 29. janvāris – 2. februāris, 2022.
4. Zajacs, A., Borodinecs, A., **Bogdanovics, R.**, 2020. Assessment of the efficiency and reliability of the district heating systems within different development scenarios. *11th International Conference on Sustainability and Energy in Buildings, SEB 2019*. 4.–5. jūlijs, 2019, Budapešta, Ungārija.

Konferenču raksti (nav indeksēti)

1. Lebedeva, K., **Bogdanovičs, R.**, Zajecs, D., 2023. Use of Existing Water Tanks for Improvement of Building Heating/Cooling System Using Heat Pumps and Solar Collectors, *International Conference on Innovative Engineering Technologies*, Proceedings of the IRES International Conference. 23.–24. maijs, 2023, Barselona, Spānija.
2. **Bogdanovics, R.**, Zeiza-Seleznova, A., Zemitis, J., Zajacs, A., 2022. TRNSYS model with 3-way valve for heat carrier temperature control of solar thermal collectors integrated into district heating system, *BuildSim Nordic 2022 Technical papers*. 22.–23. augusts, 2022, Kopenhāgena, Dānija.
3. **Bogdanovics, R.**, Zemitis, J., Zubovics, A., 2022. Energy balance of solar collector assisted heat pump in 5th generation DHC system in Northern Europe, 2nd International Sustainable Energy Conference (ISEC 2022) Conference Proceedings. 4.–7. aprīlis, 2022, Grāca, Austrija.

1. Saules enerģijas utilizācija

Saules enerģijas pieejamības, mainīguma un attīstības potenciāla izpēte Latvijā un Ziemeļeiropā atklāja stabilu atjaunojamo energoresursu pieaugumu, kā arī saules fotoelektrisko elektrostaciju skaita palielināšanos ar mērķi turpināt palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru elektroenerģijas ražošanā (Latvijas Republikas Ministru kabinets, 2024). Taču, kā norāda sadales sistēmas operatora AS “Sadales tīkls” valdes priekšsēdētājs (Delfi.lv news portal, 2024), saules enerģijas ražošanas jauda jau līdz 2024. gada beigām bija sasniegusi 660 MW, un līdz 2025. gadam tā varētu pieaugt līdz 900 MW, pārsniedzot Latvijas elektroenerģijas pieprasījumu vasaras sezonā un potenciāli izraisot zemas vai pat negatīvas elektroenerģijas cenas saulainos laikapstākļos.

Promocijas darbs ir veltīts saules siltumenerģijas kolektoriem, jo atšķirībā no fotoelektriskiem (*PV*) paneļiem saules enerģijas izmantošana siltuma ražošanai joprojām ir minimāla. Pastāv izaicinājumi, uz kuriem šis pētījums sniedz atbildi – kā padarīt saules siltumapgādi tehniski un ekonomiski pievilcīgāku patērētājiem. Šajā darbā aplūkotas saules siltumenerģijas tehnoloģijas ietver plakanās virsmas kolektorus (*FPC*), vakuuma cauruļu kolektorus (*ETC*) un fotoelektriskos termiskos (*PVT*) kolektorus, kas vienlaikus nodrošina gan siltumenerģiju, gan elektroenerģiju vienā ierīcē, tādējādi piedāvājot augstāku enerģijas ieguvu uz platības vienību (Weiss & Spörk-Dür, 2024). *PVT* kolektoru dubultā funkcionalitāte ir īpaši izdevīga gadījumos, kad pieejamā jumta platība ir ierobežota, veicinot integrētus saules enerģijas risinājumus, kas ir būtiski klimata neitralitātes sasniegšanai dzīvojamo un komerciālo ēku sektorā.

Lai arī šis pētījums galvenokārt balstās Latvijas statistikas datos, tā rezultāti lielā mērā ir piemērojami arī citām Ziemeļeiropas valstīm, ņemot vērā līdzīgos klimatiskos apstākļus, normatīvo regulējumu un kopīgo uzsvāru uz atjaunojamo energoresursu veicināšanu.

Saules kolektoru veikspēja

Vienu gadu ilgi lauka mērījumi un *TRNSYS 18* simulācijas, pētot saules kolektoru veikspēju, parādīja, ka reālais saules kolektoru (*ST*) sistēmas akumulētais siltuma apjoms bija vismaz divas reizes zemāks nekā literatūrā norādīts (Lebedeva et al., 2023; Weiss & Spörk-Dür, 2024). Mērījumos iegūtā saules siltumenerģijas izmantošana *ST* sistēmā bija par 17,5 % zemāka nekā simulācijas rezultātos – 178 kWh/m² pret 216 kWh/m². Tomēr siltumnesēja temperatūras analīze rāda, ka mērījumos siltumnesēja temperatūras bieži bija augstākas par prognozētajām, liecinot par sistēmas pārkaršanu, kas, iespējams, ir saistīts ar zemu siltumenerģijas patēriņu atsevišķās dienās. Maksimālā izmērītā diennakts saules enerģijas izmantošana bija 2,8 kWh/m², maksimālā kolektora temperatūra (+86 °C) tika fiksēta 15. jūlijā, kad siltumenerģijas ražošana bija 1,4 kWh/m², un 16. jūlijā – 2,2 kWh/m².

76 % no saules starojuma intensitātes tika saņemti no aprīļa līdz septembrim. Šajā periodā lauka mērījumos *ST* utilizēja 90 % no lietderīgās saules siltumenerģijas; *TRNSYS* simulācijās – 83 % tradicionālajām 65 °C *ST* sistēmām. Visvairāk siltumenerģijas utilizēts jūnijā un jūlijā.

Lai uzlabotu sistēmas darbību, tiek ieteikta ekspluatācija ar zemākām siltumnesēja temperatūrām. Samazinot vidējo siltumnesēja temperatūru no 55 °C līdz 25 °C, enerģijas

ražošanu iespējams palielināt par 132 %. Tomēr tas rada izaicinājumu – kā efektīvi izmantot šādu zemas temperatūras siltumu? Šis jautājums tiks aplūkots nākamajās nodaļās.

Saules kolektoru testēšanas stends

Lai iegūtu plašākus datus par saules kolektoru darbību dažādās temperatūras režīmos, tika izstrādāts, uzbūvēts un uz Rīgas Tehniskās universitātes jumta uzstādīts saules kolektoru testēšanas stends (1.1. att.), kurā iekļauti gan plakanās virsmas (*FPC*), gan vakuuma caurules (*ETC*) kolektori, novietoti dienviņu virzienā bez ēnojuma. Lai veiktu padziļinātu analīzi komponentu līmenī, tika izstrādāts testēšanas stenda datormodelis, izmantojot dinamiskās simulācijas programmatūru *TRNSYS 18*. Pirmie rezultāti tika prezentēti autora maģistra darbā (Bogdanovičs, 2021) ar nosaukumu “Decentralizēto saules kolektoru integrēšana pilsētas centralizētajā siltumapgādes sistēmā”, vēlāk darbs tika paplašināts, papildināts un publicēts zinātniskajā žurnālā (Zajacs et al., 2022).



1.1. attēls. Saules kolektoru testēšanas stends (Bogdanovičs, 2021).

Pārkaršanas risks un centralizētās siltumapgādes sistēmas potenciāls

Ārpus apkures sezonas siltumenerģija tiek izmantota tikai karstā ūdens sagatavošanai. Tomēr karstā ūdens patēriņš var būt neregulārs, piemēram, atvaļinājumu laikā, kad patēriņš var būtiski samazināties, radot pārkaršanas risku saules kolektoru sistēmā. Analīze liecina, ka tradicionālās *ST* sistēmas ar lokālajām uzglabāšanas tvertnēm saulainā vasaras dienas vidū var sasniegt temperatūru virs 100 °C jau 30 minūšu laikā pēc enerģijas patēriņa pārtraukšanas. *ETC* uzkarst ātrāk nekā *FPC*, tādēļ tie ir vairāk pakļauti pārkaršanas riskam.

Piedāvātais risinājums, lai padarītu saules siltumapgādi par pievilcīgu risinājumu patērētājiem un samazinātu pārkaršanas risku, ir pieslēgt kolektorus esošajām vai jaunizbūvētajām centralizētās siltumapgādes (*DH*) sistēmām ar ievērojamu tilpumu un enerģijas uzkrāšanas potenciālu, ja ēkai jau ir esošais vai projektētais pieslēgums. Decentralizētu saules kolektoru integrēšana tīklos var būt dārgāka, salīdzinot ar liela mēroga centralizēto saules kolektoru parku būvniecību, tomēr šis risinājums neaizņem pilsētas vai lauksaimniecības zemes, un kopējā potenciālā saules kolektoru platība uz jumtiem pilsētā ir milzīga. Decentralizētais siltuma avots atrodas tuvāk patērētājam, tādējādi samazinās nepieciešamā enerģija siltumtīkla sūkņiem un siltuma zudumi cauruļvados.

Rīgā *DH* sistēma vasaras sezonā darbojas 65/45 °C temperatūras režīmā ar definētu piegādes temperatūras svārstību 65 ± 3 °C robežās. Mērījumi saules testēšanas stendā pie šādas

iestatītās temperatūras rāda, ka maza mēroga saules kolektori spēj nodrošināt prasīto piegādes temperatūru.

Lai nodrošinātu 65 °C piegādes temperatūru vismaz 98 % laika, iestatījuma temperatūrai jābūt 69,6 °C, bet, lai minimālā piegādes temperatūra 62 °C tiktu sasniegta vismaz 98 % laika, iestatījumam jābūt 66,5 °C. Šajā gadījumā padeves temperatūra 2–8 % no laika pārsniegs 68 °C.

Galvenie izaicinājumi, kas saistīti ar piedāvāto risinājumu, ir šādi:

- mainīgā saules intensitāte dienas laikā;
- svārstīgais diferenciālais spiediens centralizētās siltumapgādes tīklos;
- nepieciešamība uzturēt stabilu piegādes temperatūru saskaņā ar centralizētās siltumapgādes operatora tehniskajiem noteikumiem.

Komponentu līmeņa simulācijas analīze

Lai veiktu detalizētus saules kolektoru veiktspējas un temperatūras svārstību mērījumus, tika izveidots testēšanas stends un izstrādāts *TRNSYS* datormodelis, kas vēlāk tika validēts. Validācijas rezultāti liecināja, ka modelis prognozē līdzīgu utilizēto siltumenerģijas apjomu augstās (65 °C) siltumnesēja temperatūrās, bet zemākās temperatūrās (35 °C) *ETC* kolektoriem tika konstatēta par 8 % zemāks siltumenerģijas potenciāls, savukārt *FPC* – par 15 % augstāks.

ST sistēmas darbības simulācija parādīja, ka *TRNSYS* modelī iespējams radīt temperatūras svārstības ar līdzīgu periodu kā reālajos mērījumos, taču simulētajām svārstībām standartnovirze bija 1,7–2,4 reizes mazāka. Ņemot vērā visas pieņēmumu un vienkāršošanu ietekmes, modelis ir piemērots komponentu līmeņa simulācijām.

Simulācijas rezultāti rāda, ka vislielāko ietekmi uz piegādes temperatūras svārstībām atstāj vadības algoritma izvēle. Ieteicams samazināt trīscēļu vārsta gaidīšanas laiku, lai vārsts ātrāk reaģētu uz temperatūras izmaiņām. Tomēr pārāk ilgs vārsta darbības laiks var veicināt papildu plūsmas un temperatūras svārstības. Lai mazinātu svārstības, ieteicams izvēlēties vārstu ar mazāku aizvēršanās ātrumu un zemāku histēzi.

Temperatūras svārstību analīze

Lai raksturotu temperatūras svārstības, var izmantot standartnovirzes (*SD*) un vidējās absolūtās novirzes (*MAD*) statistikas parametrus. Tomēr novērotajām temperatūras svārstībām nav normālais sadalījums, tāpēc turpmākai analīzei priekšroka tiek dota *MAD* parametram. *SD* ir jutīgs pret novirzēm un labi apraksta simetrisku, zvanveida (normālu) sadalījumu, savukārt *MAD* ir noturīgāks un precīzāk atspoguļo svārstības, ja dati ir izklaidēti vai neregulāri.

Uz saules kolektoru stenda izmērītais siltumnesēja temperatūras *MAD* mainījās atkarībā no temperatūras līmeņa, kontroles režīma un laikapstākļiem. Augstā temperatūrā (80/50 °C) *MAD* svārstījās no 1,02 K līdz 2,20 K; vidējā temperatūrā (65/42 °C) tā svārstījās no 1,03 K līdz 1,61 K; zemā temperatūrā (50/30 °C) tā bija no 0,47 K līdz 0,96 K. Kopumā *MAD* ir augstāks mainīgās mākoņainības stundās un dienas sākumā un beigās.

Tika izmērīts, ka tipiskais svārstību periods ir aptuveni 13–15 minūtes “normālās” un aptuveni 8–9 minūtes “ātrās” kontroles režīmā.

Nav viena universāla regulēšanas režīma, kas būtu vislabākais visos temperatūras režīmos un laikapstākļos, bet ir skaidrs, ka, samazinoties padeves temperatūras iestatītajai vērtībai, kļūst vieglāk kontrolēt siltumnesēja temperatūru.

Ierobežojumi

Šajā pētījumā aplūkotās *ST* sistēmas jauda ir ļoti maza, salīdzinot ar literatūrā aprakstītajām sistēmām. Mazākām sistēmām ir mazāka siltuma inerce, kas var ietekmēt vadības algoritmu izvēli un veikspēju.

Lai gan literatūrā (Schäfer & Thomas, 2018) ir uzsvērts, ka siltumtīklos pastāv diferenciālā spiediena svārstību ietekme, šādas svārstības nebija iespējams fiziski atkārtot uz stenda. Tā vietā tās tika simulētas ar *TRNSYS* programmatūru, kas parādīja, ka augsta spiediena svārstības palielina padeves temperatūras standartnovirzi tikai 1,2 reizes, salīdzinot ar “normāliem” spiediena apstākļiem. Šo ietekmi būtu jāturpina pētīt, izmantojot sistēmas, kas savienotas ar reāliem siltumapgādes tīkliem.

Mērījumi tika veikti reālos āra apstākļos, kas mainījās katru dienu (saules starojums, gaisa temperatūra, vējš). Tāpēc dažādas kontroles stratēģijas un temperatūras iestatījumus nevarēja pārbaudīt pilnībā vienādos apstākļos. Tomēr šo laikapstākļu ietekme tika mazināta, veicot ilgtermiņa mērījumus, lai nodrošinātu ticamus rezultātus.

Turpmākie pētījumi

Turpmākajos pētījumos būtu jāparedz saules siltuma iekārtas pieslēgšana reālai centralizētās siltumapgādes sistēmai un jāveic ilgtermiņa veikspējas mērījumi. Jāturpina pētīt mainīgas temperatūras un vadības algoritmu izmantošana atkarībā no diennakts laika, laikapstākļiem, meteoroloģiskajām prognozēm un spiediena starpības. Turklāt jāizvērtē mašīnmācīšanās algoritmu potenciāls, lai uzlabotu sistēmas kontroli un efektivitāti.

Pamatojoties uz pašreizējiem secinājumiem, turpmākajā darbā var izmantot vairākus ieteikumus, lai uzlabotu saules kolektoru veikspēju un samazinātu temperatūras svārstības.

- Saules kolektoru sistēmu vadības algoritma izstrādātājam jāņem vērā ne tikai temperatūras starpība starp iestatīto un faktisko vērtību, bet arī laikapstākļi, jo īpaši mākoņainība.
- Tehniskajos noteikumos, kas izdoti pieslēgšanai centralizētās siltumapgādes sistēmai, būtu jāņem vērā mazas jaudas saules kolektoru ierobežojumi. Centralizētās siltumapgādes sistēmas operators var apsvērt iespēju nodrošināt elastīgāku temperatūras grafiku, nosakot lielāku temperatūras novirzi. Piemēram, $+65 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, nevis $+65 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ja vien tas var apdraudēt visa siltumapgādes tīkla uzticamību, kas jāizpēta turpmākajos pētījumos.

2. Ar saules enerģiju papildinātā centralizētā siltumapgāde

Eiropas Savienība (ES) ir izvirzījusi vērienīgus mērķus – līdz 2050. gadam kļūt par pirmo klimatneitrālo reģionu uz planētas (European Commission, 2020). Ir daudz iespēju, kā ražot un nodot siltumenerģiju mājāsaimniecību un rūpniecības vajadzībām. Viens no videi draudzīgiem, finansiāli pamatotiem un rentabliem risinājumiem apdzīvotās vietās ir centralizētās siltumapgādes (DH) sistēma (Lake et al., 2017). Saskaņā ar *Euroheat & Power* apkopojuma par centralizētās siltumapgādes un dzesēšanas nozari datiem, ES bija aptuveni 6000 centralizētās siltumapgādes tīklu, kas nodrošina 11–12 % no kopējā siltumenerģijas pieprasījuma. Dažos reģionos DH sistēmu vispār nav, savukārt citos šī sistēma nodrošina vairāk nekā 50 % siltumenerģijas (Buffa et al., 2019; Werner, 2017). DH sistēmas tiek pozicionētas kā nākotnes risinājums pilsētu siltumapgādei Eiropā ar lielu potenciālu veicināt atjaunojamās enerģijas integrāciju.

Rīgā ir plaša DH sistēma, kas nodrošina siltumapgādi 70 % no Rīgas ēkām ar kopējo enerģijas patēriņu 3 TWh, tāpēc šajā jomā būtu jāīsteno energoefektivitātes uzlabošanas pasākumi. Latvijas vidēja termiņa un ilgtermiņa siltumapgādes nozares plānošanas dokumenti paredz palielināt saules enerģijas izmantošanu, elektrificēt nozari, palielinot siltumsūkņu (HP) īpatsvaru, un īstenot ēku fonda renovācijas pasākumus (Directorate-General for Communication, 2024; International Energy Agency, 2024; Latvijas Republikas Ministru kabinets, 2022).

Rīgā esošā DH ir trešās paaudzes sistēma (65 °C ārpus apkures periodā, vidēji 70–80 °C apkures sezonā un līdz pat 118 °C ekstremāli aukstā laikā). Saskaņā ar (Lund et al., 2014, 2021) ceturtās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas tiek klasificētas kā zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes tīkli (LTDH), kas darbojas ar siltumnesēja temperatūru 50–60 °C padeves cauruļvadā un aptuveni 25 °C atpakaļgaitas cauruļvadā. Piektās paaudzes sistēmas ir īpaši zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes tīkli (ULTDH), kas darbojas pie zemei tuvās temperatūras (zem 30 °C), un lokāli temperatūra tiek pacelta ar siltumsūkņu palīdzību.

Lai gan Baltijas valstīs pāreja no esošā trešās paaudzes modeļa uz piektās paaudzes modeli rada izaicinājumus, jo īpaši ievērojamo nepieciešamo investīciju apjomu, reģiona vērienīgie enerģētikas un klimata mērķi (Volkova et al., 2022) paver iespēju integrēt dažus piektās paaudzes koncepcijas elementus. Tas varētu uzlabot Latvijas siltumapgādes sistēmas efektivitāti, neprasot būtiskus kapitālieguldījumus.

Centralizētās siltumapgādes tīkli parasti balstās centralizētos siltumenerģijas ražošanas avotos vienuviet, kas ir ierobežoti ar uzstādīto jaudu. Savukārt centralizētās siltumapgādes sistēmas ar decentralizētiem siltuma avotiem ļauj integrēt vairākus videi draudzīgus enerģijas avotus un tehnoloģijas, piemēram, saules siltumenerģiju, ģeotermālos resursus, rūpnieciskā siltuma atgūšanu, nodrošināt rezerves jaudu uzturēšanu un sezonālo enerģijas uzglabāšanu (Bertelsen et al., 2021). Piektās paaudzes siltumapgādes sistēmas koncepcija ietver iespēju izmantot tīklu kā enerģijas uzkrāšanas sistēmu un vienlaikus kā siltuma un aukstuma avotu ēku apkurei un dzesēšanai, izmantojot siltumsūkņus. Tāpat tiek ieviests jēdziens “proaktīvais lietotājs” jeb “autonomais ražotājs”, kas vienlaikus patērē un ražo enerģiju (Buffa et al., 2019; Millar et al., 2021; Revesz et al., 2020). Proaktīvo lietotāju iesaiste varētu būt viens no

efektīvākajiem veidiem, kā modernizēt esošos tīklus, kas sasnieguši savas tehniskās vai ekonomiskās robežas (Lichtenegger et al., 2017).

Lielā mēroga saules kolektoru parki, kas pieslēgti *DH* sistēmām, jau ilgstoši veiksmīgi darbojas Dānijā, Zviedrijā, Vācijā, kā arī Latvijā, Salaspilī (Lebedeva et al., 2023). Tomēr joprojām ir tikai daži piemēri, kad mājāsaimniecības būtu pieslēgtas centralizētās siltumapgādes sistēmai kā proaktīvie lietotāji. Stagnācijas un pārkaršanas problēmas ir īpaši nozīmīgas nelielām lokālām saules kolektoru sistēmām, kurām raksturīgs nevienmērīgs siltuma pieprasījums un ierobežota siltuma akumulācijas jauda. Saules kolektoru integrācija ceturtās vai piektās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmā ļauj samazināt šos riskus un nodrošina iespēju maksimāli palielināt kolektoru uzstādīto jaudu, izmantojot visas pieejamās jumta platības.

Lai integrētu decentralizētus atjaunojamās siltumenerģijas avotus siltumapgādes sistēmās, nepieciešami stabili un uzticami risinājumi ar precīzu temperatūras kontroli, attālinātu piekļuvi un zemām uzturēšanas izmaksām (Brand et al., 2014; Brange et al., 2017; Huang et al., 2020). Lai mazinātu siltumnesēja temperatūras svārstības, saules kolektori var sildīt siltumnesēju no atpakaļgaitas cauruļvada un novadīt to padeves cauruļvadā atbilstoši noteiktam temperatūras režīmam (Lennermo et al., 2019). *DH* sistēmas nodrošina gan karstā ūdens sagatavošanu, gan telpu apsildi, tāpēc būtiski ir ņemt vērā tādus faktorus kā ēku renovācija ar mērķi uzlabot energoefektivitāti (Hamburg et al., 2020), prognozēs balstīta vadības sistēma (Cholewa et al., 2022), kā arī saules enerģijas kombinēšana ar citiem enerģijas avotiem.

Centralizētās siltumapgādes sistēma kā siltuma akumulators saules siltumam

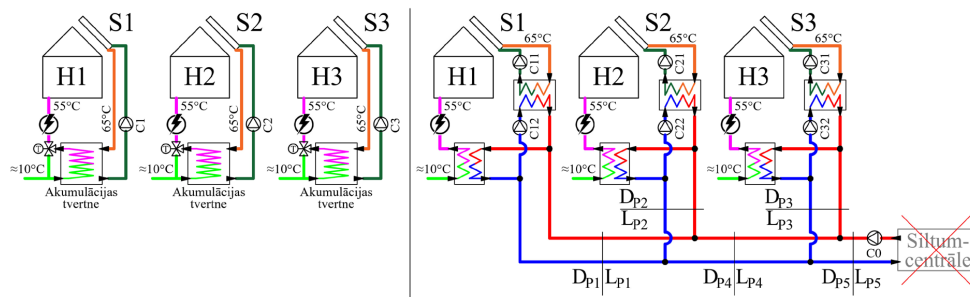
Šajā nodaļā prezentētais pētījums ir publicēts (Bogdanovics et al., 2024).

Esošo trešās paaudzes *DH* tīklu pārveidošana par ceturtās vai piektās paaudzes tīkliem ir sarežģīta un dārga. Latvijā mazpilsētu *DH* tīkli bieži netiek ekspluatēti ārpus apkures perioda zemā pieprasījuma un lielā relatīvo siltuma zudumu cauruļvados dēļ, tāpēc karsto ūdeni mājāsaimniecības silda ar elektrokatlēm. Šādos gadījumos saules siltuma kolektoru integrēšana *DH* tīklos varētu pārveidot to par lielām siltuma uzkrāšanas sistēmām, samazinot atkarību no elektrokatlēm.

Šajā pētījumā ir prezentēta metode, kā novērtēt galveno parametru, tostarp karstā ūdens patēriņa profilu, saules kolektora platības un centralizētās siltumapgādes sistēmas cauruļvada diametra un garuma, ietekmi uz saņemtās saules enerģijas lietderīgo daudzumu iepriekš aprakstītājā sistēmā. Ir veikts parametriskais pētījums, lai novērtētu esošas maza mēroga *DH* sistēmas izmantošanas efektivitāti, izmantojot to kā siltuma uzkrāšanas sistēmu proaktīviem lietotājiem ar saules kolektoriem ziemeļu klimatiskajos apstākļos ārpus apkures periodā (maijs–septembris). Salīdzinot *TRNSYS 18* simulācijas rezultātus “rajona” risinājumam ar “lokālo” sistēmu (2.1. att.), pētījumā izcelts enerģijas koplietošanas potenciāls ar kaimiņu mājām, sniedzot ieskatu turpmākiem simulāciju un sistēmas optimizāciju pētījumiem.

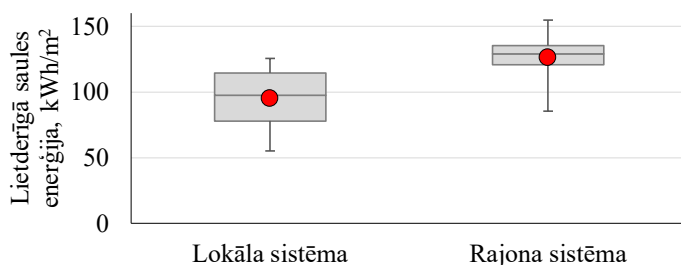
“Lokālā” risinājumā saules kolektoru absorbētais siltums tiek uzkrāts vietējā akumulācijas tvertnē. Ūdens no krāna tiek iepriekš uzsildīts ar saules kolektoriem, izmantojot siltummaini, un pēc tam uzsildīts līdz 55 °C ar elektrisko plūsmas sildītāju. “Rajona” risinājumā decentralizētie saules kolektori darbojas kā vienīgais *DH* sistēmas siltuma avots. Pieaugot

temperatūrai tīklā, krāna ūdeni iepriekš uzsilda ar siltummaiņa palīdzību, tādējādi samazinot papildu sildīšanu ar elektrību ēkas pusē.



2.1. attēls. “Lokālās” sistēmas (pa kreisi) un “rajona” sistēmas (pa labi) principiālais rasējums.

Rezultāti liecina, ka lietderīgās saules enerģijas ražošana ir atkarīga no uzstādīto saules kolektoru daudzuma, siltuma akumulatora lieluma un apkures slodzes profila un var svārstīties no 55,1 kWh/m² līdz 164,6 kWh/m² piecu mēnešu periodā (no maija līdz septembrim) (2.2. att.).



2.2. attēls. Lietderīgā saules enerģija, kWh/m² kolektora laukuma. Maijs–septembris.

Palielinot saules kolektoru sistēmas laukumu “lokālā” risinājumā, samazinās saražotās enerģijas apjoms uz kvadrātmetru, taču šo efektu var mazināt, palielinot akumulācijas tvertnes tilpumu. Tas nozīmē, ka gadījumos, kad ir ierobežota siltuma akumulācijas kapacitāte, pārmērīga kolektoru uzstādīšana var izraisīt pārkaršanu un samazināt sistēmas efektivitāti.

Savukārt “rajona” risinājumā nav nepieciešams atsevišķs lokālais siltuma uzglabāšanas rezervuārs, jo centralizētās siltumapgādes (DH) sistēmas tilpums ir pietiekami liels. Šajā risinājumā iegūtās lietderīgās saules enerģijas apjoms ir lielāks nekā “lokālajā” risinājumā, pateicoties zemākai siltumnesēja temperatūrai DH sistēmā, salīdzinot ar temperatūru lokālajā akumulācijas tvertnē. Īstenojot 40 m² kolektora laukumu katrā mājā “rajona” risinājumā, iespējams palielināt saņemtais saules enerģijas daudzumu par 13–22 %, salīdzinot ar “lokālo” risinājumu ar tādu pašu kolektoru laukumu un 1 m³, 2 m³ vai 3 m³ akumulācijas tvertni.

Pētījumā konstatēts, ka ēkas dzeramā karstā ūdens patēriņa profils var būtiski ietekmēt no “rajona” siltumapgādes sistēmas saņemtais enerģijas apjoms – izdevīgāk ir uzstādīt saules kolektorus uz restorāna jumta, nevis uz dzīvojamās ēkas. Atšķirība starp dzīvojamo un restorāna vai biroja ēku ir statistiski nozīmīga ($p < 0,05$), savukārt atšķirība starp restorāna un biroja ēku nav statistiski nozīmīga ($p = 0,24$).

Lielāks saules enerģijas apjoms tiek saražots, ja saules kolektori ir vienmērīgi izvietoti starp visām ēkām. Tomēr arī ēka, kurai nav uzstādīti kolektori, var saņemt līdz pat 38 % no kopējās saules enerģijas, izmantojot centralizētās siltumapgādes sistēmu. Ja šī ēka atrodas pārāk tālu no enerģijas avota (piemēram, P4 garums = 500 m), tā var saņemt vien 1–4 % saules enerģijas.

Pētījumā tika konstatēts, ka lielāks maģistrālā cauruļvada diametrs un kompaktāks patērētāju izvietojums veicina augstāku sistēmas efektivitāti. Ja blakus esoša ēka bez saules kolektoriem atrodas vairāk nekā 500 m attālumā no proaktīva lietotāja, tā caur centralizētās siltumapgādes sistēmu saņem tikai nelielu saules enerģijas daudzumu.

Ierobežojumi un pieņēmumi

Pētījuma laikā tika secināts, ka *TRNSYS*, iespējams, nav labākais rīks visas pilsētas siltumapgādes sistēmas modelēšanai, jo tas prasa detalizētu parametru ievadi katrai ēkai un katrai sistēmas daļai, kas varētu būt laikietilpīgi un izraisīt potenciālas kļūdas. Šo izaicinājumu var mazināt, grupējot vairākas mājsaimniecības vai izmantojot *TRNSYS* rezultātus citās programmatūrās. Galvenais modeļa mērķis bija novērtēt attiecības starp būtiskiem parametriem, kas tika veiksmīgi izdarīts. Rezultāti kalpo par pamatu diskusijām par pieejas praktisko lietojamību. Svarīgi, lai modelis nebūtu pārlietu sarežģīts, ļaujot skaidri analizēt katra parametra ietekmi uz rezultātiem.

Pētījumā analizēti trīs dažādi karstā ūdens patēriņa profili, apzināti izvairoties no iknedēļas svārstībām, lai samazinātu mainīgo skaitu un skaidri parādītu konkrētā profila ietekmi. Uzsvars likts uz profilu daudzveidību, nevis to precīzu atbilstību reālām ēku kategorijām. Lai gan nākotnē tiks analizēti konkrēti ēku gadījumi, šajā pētījumā izmantota skaitliskā modelēšana profilu salīdzināšanai un analīzei. Modeļi var viegli pielāgot jebkuram citam siltumenerģijas patēriņa profilam, kas ļauj to izmantot turpmākajos pētījumos.

Saskaņā ar pētījumā aprakstītu situāciju modeli ir pieņemts, ka vasarā neliela mēroga centralizētā siltumapgādes sistēma netiek izmantota, līdz ar to nav definēta temperatūras grafika un spiediena prasības. Ja būs pārāk ātrā temperatūras maiņa, tā var radīt termisko spriedzi cauruļvados un samazināt to kalpošanas laiku, ko nepieciešams izvērtēt turpmākajos pētījumos.

Šis ir sākotnējais pētījums par potenciāli ieviešamu liela mēroga risinājumu, kas prasa ievērojamus ieguldījumus un vēl nav realizēts praksē, tāpēc sistēmas validācija šobrīd nav iespējama. Tomēr modelis var tikt izmantots kopā ar reāliem datiem par cauruļvadu parametriem un ēku siltumenerģijas patēriņu. Ja vasarā sistēma darbotos ar galveno centralizēto siltuma avotu un stabilu siltumnesēja temperatūru tīklos, tad būtu nepieciešama detalizēta informācija par katras ēkas atrašanās vietu un siltumenerģijas patēriņu. Pretējā gadījumā simulācijas rezultāti var būt neprecīzi, jo, dažiem patērētājiem neesot, rodas lieli siltuma zudumi cauruļvados.

Palielinot izolētu cauruļvadu ieklāšanas dziļumu, var samazināt siltuma zudumus, taču pieaug uzstādīšanas izmaksas, tāpēc būtiski ir atrast optimālo risinājumu katrā konkrētā gadījumā. Šajā pētījumā galvenā uzmanība pievērsta ierosinātā risinājuma integrācijai esošajā sistēmā. Pamatojoties uz cauruļvadu ražotāju ieteikumiem un praktisko pieredzi, to ieklāšanas dziļums parasti ir no 0,6 m līdz 2,0 m, vidēji – ap 1,0 m. Simulācijā izmantots viens metrs atbilstoši esošās infrastruktūras tehniskajiem ierobežojumiem.

3. Ar saules enerģiju papildināts siltumsūknis centralizētās siltumapgādes sistēmā

Aptuveni 50 % siltumenerģijas Rīgas centralizētās siltumapgādes sistēmā tiek saražoti, sadedzinot biomasu, taču līdz 2030. gadam plānots, ka 90 % siltumenerģijas tiks iegūti no atjaunojamiem energoresursiem, tādējādi būtiski samazinot atkarību no dabasgāzes (Rīgas Siltums JSC, 2024). Saskaņā ar jauno attīstības stratēģiju paredzēts pārveidot centralizēto siltumapgādi par enerģijas koplietošanas platformu, kas ļautu lietotājiem pārdot sistēmai pārpalikušo siltumenerģiju, tādējādi faktiski pārejot uz ceturtās paaudzes siltumapgādes sistēmu (Dienas Bizness, 2023).

Tāpēc ir gan nepieciešamība, gan potenciāls plašākai saules enerģijas integrācijai siltumapgādes sistēmās. To iespējams īstenot, veidojot liela mēroga centralizētus saules kolektoru parkus (Paulick et al., 2018; Sørensen et al., 2012; Winterscheid et al., 2017) vai mazākus, decentralizētus risinājumus (Zajacs et al., 2022), kas izvietoti tuvāk patērētājiem, tādējādi samazinot pārvades zudumus un efektīvi izmantojot pieejamo jumta platību. Jumta platība ir ierobežota, tāpēc tā jāoptimizē, lai maksimāli palielinātu enerģijas ražošanu.

Lai to sasniegtu, ieteicams pazemināt siltumnesēja temperatūru, kas gan prasa ievērojamus kapitālieguldījumus, tomēr ir īstenojams pakāpeniski, izmantojot zonēšanas stratēģijas (Lund et al., 2018) un paralēli veicot ēku renovācijas procesu, pārejot uz zemas temperatūras apkuri.



3.1. attēls. Siltumapgādes sistēmas zonējums (sarkanās līnijas – galvenie cauruļvadi).

Ņemot vērā to, ka tiek ierosināta zonēšanas pieeja (3.1. att.), ir nepieciešama apakšstacija, lai izolētu zonu no galvenā *DH* tīkla. To var panākt, uzstādot siltummaini, kas veido neatkarīgu hidraulisko zonu, vai ieviešot sajaukšanas sistēmu, kas ļauj pazemināt siltumnesēja temperatūru. Zonā galvenokārt atrodas daudzdzīvokļu ēkas, kurām ir ierobežota zemes platība rotaļu laukumu, atpūtas zonu, autostāvvietu un ēku vai koku radītā ēnojuma dēļ. Tāpēc pētījumā ierosināts izmantot ēku jumta platības saules enerģijas tehnoloģiju uzstādīšanai.

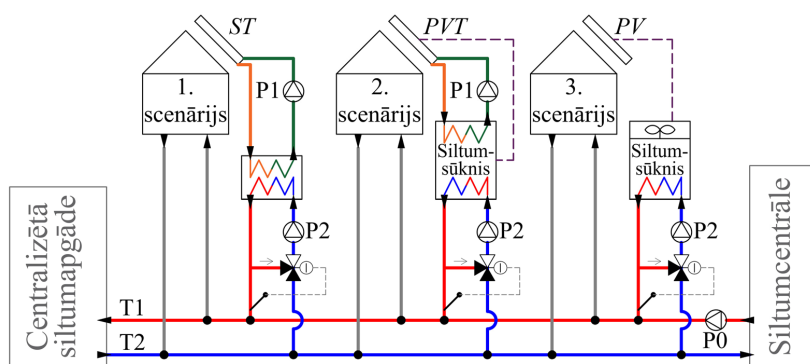
Pētījuma centrālais jautājums ir – kā maksimāli palielināt saules siltumenerģijas ražošanu siltumapgādes tīklā, izmantojot ierobežoto jumta platību, ar plašāku mērķi veicināt saules enerģijas integrāciju siltumapgādē un sekmēt nozares dekarbonizāciju.

Saules enerģiju var pārvērst siltumā divējādi: (1) tieši, izmantojot saules termiskos (*ST*) kolektorus; (2) netieši, ražojot elektroenerģiju ar fotoelektriskiem (*PV*) paneļiem un to

izmantojot siltuma ražošanai ar elektriskiem sildītājiem vai siltumsūkņiem. Fotoelektriskās termiskās (*PVT*) sistēmas apvieno abas pieejas, vienlaikus ražojot gan elektroenerģiju, gan siltumu. Visefektīvākais risinājums ir *PVT* sistēmas apvienojums ar siltumsūkni.

Utilizēto siltumu var piegādāt ceturtnās vai piektās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmām, kur to var uzglabāt un pēc vajadzības sadalīt. Šajā pētījumā analizētas trīs konfigurācijas saules enerģijas integrēšanai siltumapgādē (3.2. att.).

1. *ST* kolektoru pieslēgšana siltumapgādes sistēmai, izmantojot siltummaini.
2. Ūdens-ūdens tipa siltumsūknis, ko darbina ar elektroenerģiju un siltumu no *PVT*.
3. Gaiss-ūdens tipa siltumsūknis, ko darbina ar elektroenerģiju, ko ražo *PV* paneļi.



3.2. attēls. Izpētītās sistēmas principiālais rasējums.

Šajā pētījumā netika analizēta centralizētās siltumapgādes sistēmas dinamiskā uzvedība, tostarp temperatūras un spiediena svārstības vai sistēmas sildīšanas jauda. Tiek pieņemts, ka *DH* tīkls ir pietiekami liels, lai akumulētu visu saražoto siltumu.

Lai novērtētu un salīdzinātu trīs konfigurācijas, tika izmantoti galvenie darbības rādītāji:

- utilizētais lietderīgās siltumenerģijas daudzums uz *ST*, *PVT* vai *PV* sistēmas platības vienību [kWh/m^2];
- siltuma jaudas koeficients – saražotās lietderīgās siltumenerģijas attiecība pret kopējo saules starojumu uz virsmas (%);
- sistēmas darbības stundas;
- siltuma zudumi cauruļvados, kas savieno *ST* ar siltummaini un *PVT* ar siltumsūkni;
- cirkulācijas sūkņa elektroenerģijas patēriņš;
- siltumsūkņa veiktspējas koeficients (*COP*).

Katram scenārijam tika modelēti vairāki scenāriji, mainot *ST*, *PV* un *PVT* parametrus divos dažādos *DH* temperatūras profilos:

- zema *T* ar padeves temperatūru 30–50 °C un atgriešanās temperatūru 20 °C;
- augsta *T* ar padeves temperatūru 60–70 °C un atgriešanās temperatūru 40 °C.

Lai maksimāli izmantotu pieejamo jumta platību un samazinātu vēja radīto mehānisko slodzi, *ST*, *PV* un *PVT* virsmas tika novietotas ar 15° slīpumu, 2 m atstarpēm starp tām, orientētas uz dienvidiem. Pamatojoties uz 3.2 attēlā redzamo shēmu, izstrādāti trīs *TRNSYS 18*

modeļi. Simulācijas laika posms – 1 minūte. Klimatiskie dati Rīgai no *Meteonorm V5.0.13* datubāzes *TM2* formātā.

Saskaņā ar Eiropas Parlamenta un Padomes 2010. gada 19. maija Direktīvu 2010/31/ES par ēku energoefektivitāti siltumsūkņi ir mehānisms, ierīce vai iekārta, kas pārvada siltumu no dabiskās vides, piemēram, gaisa, ūdens vai zemes uz ēkām vai rūpnieciskām iekārtām, mainot siltuma dabisko plūsmu, t. i., no zemākas uz augstāku temperatūru. Ar reversīviem siltumsūkņiem siltumu var pārvadīt arī no ēkas uz dabisko vidi.

Siltumsūkņa darbība balstās termodinamikas otrā likumā, līdz ar to tā veiktspēja ir cieši saistīta ar sistēmas temperatūrām, īpaši ar temperatūras starpību jeb “pacēlumu” (Meggers et al., 2010). Siltumsūkņa *COP* (veiktspējas koeficients) iespējams palielināt, samazinot šo temperatūras pacēlumu, proti, starpību starp siltumsūkņa kondensācijas temperatūru T_H un iztvaikošanas temperatūru T_C , kā tas redzams 3.1. un 3.2. vienādojumā.

$$COP_{ideal} = \frac{T_H}{T_H - T_C}, \quad (3.1)$$

$$COP_{real} = \eta_{Carnot} \cdot \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{Q}{E}, \quad (3.2)$$

kur COP_{ideal} – maksimālais (teorētiskais) veiktspējas koeficients;

COP_{real} – reālais veiktspējas koeficients;

T_H – kondensācijas temperatūra, K;

T_C – iztvaikošanas temperatūra, K;

η_{Carnot} – Karno faktors (jeb Karno efektivitāte);

Q – saražotā siltuma jaudas, W;

E – patērētā elektriska jauda, W.

Siltumsūkņu (gaiss-ūdens un ūdens-ūdens) veiktspēja simulācijās tika noteikta, balstoties publiski pieejamos ražotāju datos. Plakanā tipa (*FPC*) un vakuuma cauruļu (*ETC*) saules kolektoru parametri tika ņemti no (SPF Institute for Solar Technology, n. d.) datubāzes, bet fotoelektrisko termisko (*PVT*) kolektoru parametri – no pētījuma (Francisco et al., 2024).

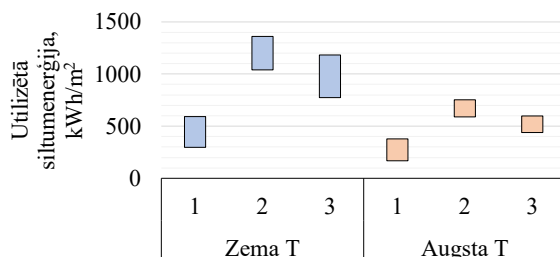
Simulācijas 1. scenārija rezultāti rāda, ka zemas temperatūras sistēmā *FPC* kolektori nodrošina augstāku veiktspēju nekā *ETC*, sasniedzot gada siltuma utilizāciju līdz 592 kWh/m². Augstas temperatūras gadījumā atšķirība starp *FPC* un *ETC* ir neliela, un maksimālā lietderīgā siltuma utilizācija sasniedz 378 kWh/m² gadā. Rezultāti liecina, ka temperatūras pazemināšana var palielināt siltuma daudzumu par 31–88 % atkarībā no kolektoru veida un to parametriem.

2. scenārijā *PVT* kolektors tiek izmantots kā siltuma un elektroenerģijas avots ūdens-ūdens siltumsūkņim, ļaujot maksimāli izmantot saules enerģiju. Zema T_{DH} sistēmā sasniegtais siltuma daudzums ir 1040–1361 kWh/m², kas pārsniedz gada saules starojumu uz *PVT* virsmas (1033 kWh/m²). Tas ir iespējams, jo *PVT* kolektora siltumnesēja temperatūra ir zemāka par apkārtējā gaisa temperatūru, kas ļauj iegūt papildu enerģiju no vides.

3. scenārijā tika analizētas divas siltumsūkņa darbības stratēģijas: (1) pastāvīgas darbības režīms – siltumsūkņi darbojas visu gadu ar nemainīgu siltuma jaudu; (2) “saules pieejamības” režīms – siltumsūkņi darbojas tikai tad, kad pieejama saules enerģija. Neskatoties uz to, ka “saules” režīmā siltumsūkņi darbojas aptuveni divas reizes mazāk stundu, gaiss-ūdens

siltumsūkņi uzrādīja augstāku *COP*. Zema T sistēmā kopējais saražotās enerģijas apjoms sasniedza līdz 977 kWh/m² “pastāvīgajā” režīmā un līdz 1183 kWh/m² “saules” režīmā.

3.3. attēlā redzami lietderīgās enerģijas apjomi visam simulētajam scenārijam. Dati liecina, ka 2. scenārijs piedāvā vislielāko potenciālu saules enerģijas ieguves maksimizēšanai no ierobežotās platības. Ir vērts atzīmēt, ka pat augstas temperatūras apstākļos 2. scenārijs nodrošina lielāku lietderīgās enerģijas ražojumu nekā 1. scenārijs zemās temperatūras režīmā.



3.3. attēls. Utilizētais siltumenerģijas salīdzinājums katram gadījumam; min/maks.

Pētījumā pieņemts, ka *DH* sistēmai ir neierobežota siltuma kapacitāte jeb tā spēj absorbēt visu saražoto siltumu, nemainot siltumnesēja temperatūru. Tomēr gadījumā, ja piedāvātā sistēma tiktu uzstādīta katrā ēkā, kopējais saražotā siltuma daudzums varētu pārsniegt patēriņu, izraisot temperatūras paaugstināšanos. Lai no tā izvairītos, iespējams ieviest sezonālo siltuma uzkrāšanu vai noteikt ierobežojumus uzstādāmajai saules enerģijas jaudai katrā zonā.

Maksimālā saules siltumenerģijas ražošana notiek vasarā, kad dzīvojamajos rajonos siltuma patēriņš aprobežojas gandrīz tikai ar karstā ūdens (*DHW*) nodrošināšanu, tāpēc sistēmas pielāgošana jāveic, ņemot vērā reālās patēriņa vajadzības. Mērījumi no daudzdzīvokļu ēkām Oslo, Norvēģijā (Walnum et al., 2021), rāda, ka *DHW* enerģijas patēriņš svārstās no 0,079 kWh/m² līdz 0,189 kWh/m² dienā, vidēji sasniedzot 0,127 kWh/m² diennaktī jeb 46,2 kWh/m² gadā, rēķinot uz ēkas platības vienību. Pieņemot, ka *DH* sistēma var uzglabāt siltumu 24 stundu periodam, iespējams aprēķināt maksimāli pieļaujamo *ST*, *PV* vai *PVT* kolektoru platību.

Aprēķini liecina, ka zema T scenārijā ūdens-ūdens siltumsūkņa un *PVT* sistēma spēj saražot 8,39 kWh/m² dienā, kas nozīmē, ka 1 m² *PVT* var nodrošināt *DHW* pieprasījumu 66 m² lielai ēkai. Šajā pētījumā izmantotajā piemēra gadījumā 153,6 m² liela *PVT* sistēma, kas uzstādīta uz 530 m² jumta, spēj apmierināt *DHW* vajadzības 19 stāvu ēkai vai gandrīz četrām piecu stāvu ēkām. Ir iespējams kombinēt dažādas tehnoloģijas – viena ēka var ražot siltumenerģiju, izmantojot kādu no pētījumā apskatītajām metodēm, savukārt cita ēka var ražot elektroenerģiju ar *PV* paneļiem.

Ierobežojumi

Šis pētījums koncentrējas uz saules enerģijas un siltumsūkņu tehnisko integrāciju zemas temperatūras centralizētajā siltumapgādē. Detalizēta ekonomiskā analīze netika iekļauta, jo to ietekmē mainīgi faktori, piemēram, iekārtu un uzstādīšanas izmaksas, enerģijas tarifi un elektroenerģijas cenas, kas var mainīties atkarībā no laika un vietas. Tehnoloģiju attīstība var samazināt iekārtu izmaksas, savukārt inflācija – palielināt darbspēka un materiālu izmaksas.

4. Siltumnesēja temperatūras svārstību ietekme uz ūdens-ūdens siltumsūkņa veiktspēju

Kā norādīts 1. nodaļā, siltumnesēja temperatūra saules kolektoros var būt nestabila saules starojuma svārstību un neoptimālo sistēmas vadības algoritma izvēlēs dēļ. Papildu mērījumi, ko veikuši Karaliskā Tehnoloģiju institūta pētnieki (Francisco et al., 2024), apstiprina, ka arī fotoelektrisko termisko (*PVT*) kolektoru siltumnesēja temperatūra ir atkarīga no saules starojuma intensitātes un tās mainīguma.

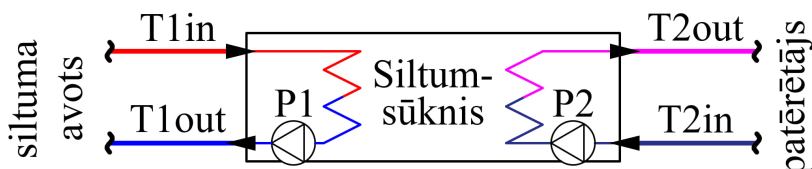
Šī pētījuma ietvaros siltumnesēja temperatūra esošā trešās paaudzes centralizētās siltumapgādes (*DH*) sistēmā tika mērīta daudzdzīvokļu ēkā trīs vasaras nedēļu laikā ar 5 sekunžu soli. Vienā no dienām ar izteiktām temperatūras svārstībām tika reģistrēta vidējā piegādes temperatūra $62,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ar standartnovirzi (*SD*) $2,2\text{ K}$, vidējo absolūto novirzi (*MAD*) $2,0\text{ K}$ un diapazonu no $54,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $66,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pārējā periodā vidējā piegādes temperatūra bija $65,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ar *SD* $0,8\text{ K}$ un *MAD* $0,6\text{ K}$. Citā ēkā veiktie ilgtermiņa (divus gadus) mērījumi ar vienas stundas intervālu parādīja, ka ārpus apkures sezonā mēneša vidējā piegādes temperatūra svārstījās no $59,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $64,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ar *SD* no $1,2\text{ K}$ līdz $6,6\text{ K}$ un *MAD* no $0,9\text{ K}$ līdz $3,3\text{ K}$.

Zemas un īpaši zemās temperatūras sistēmās (*LTDH* un *ULTDH*), kur paredzēts izmantot siltumsūkņus temperatūras pacelšanai, ir siltumnesēja temperatūra zemāka par $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, taču tas automātiski nenozīmē arī mazākas temperatūras svārstības – īpaši, ja tīklā ir daudz decentralizētu atjaunojamās enerģijas avotu ar mainīgu jaudu. Temperatūras pacēlums (atšķirība starp avota un patēriņa pusēm) būtiski ietekmē siltumsūkņa *COP*, tomēr temperatūras svārstību ietekme literatūrā joprojām ir maz pētīta.

Siltumsūkņu ražotāji veic standartizētus testus ierobežotā un kontrolētā vidē, kas būtiski atšķiras no reālajiem apstākļiem zemas un īpaši zemas temperatūras *DH* tīklos. Parasti testos netiek ņemtas vērā nedz augstas avota temperatūras ($> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), nedz temperatūras svārstības, tāpēc pieejamie dati par šo faktoru ietekmi uz *COP* ir ļoti ierobežoti.

Optimālā temperatūra *LTDH* un *ULTDH* tīklos ir atkarīga no vairākiem faktoriem, tostarp tīkla lieluma un patēriņa profiliem, tāpēc vienota universāla risinājuma nav. Tomēr šis pētījums nosaka pieļaujamo temperatūras svārstību diapazonu, kas nav saistīts ar konkrētu ģeogrāfisko vietu, klimatu vai sistēmas konfigurāciju, padarot rezultātus plaši lietojamus sistēmu projektēšanā un vadības stratēģiju izstrādē.

Šī pētījuma mērķis ir novērtēt, kā siltuma avota (T_{1in}) un patēriņa puses (T_{2in}) (4.1. att.) temperatūras svārstības laboratorijas apstākļos ietekmē ūdens-ūdens siltumsūkņa *COP*, salīdzinot tā efektivitāti stabilos un svārstīgos temperatūras režīmos.



4.1. attēls. Izpētītās sistēmas principiālais rasējums. P1, P2 – cirkulācijas sūkņi.

Eksperimenta apraksts

Šajā pētījumā (4.2. att.) tika testēts 6 kW ūdens-ūdens siltumsūkņis ar siltuma avota temperatūrām no 0 °C līdz 28 °C un siltuma patēriņa puses iekļūdes temperatūrām 25 / 30 / 35 / 40 / 45 / 50 / 55 °C pilnas noslodzes apstākļos. Šāds darbības režīms potenciāli piemērojams gan *PVT* kolektoru pieslēgumam siltuma avota pusē, gan kā lokāla “*booster*” siltumsūkņa īpaši zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmā.



4.2. attēls. Siltumsūkņu sistēmas testēšanas laboratorija.

Lai testētu sistēmas darbību, tika izstrādāts eksperimentālais protokols. Kā aprakstīts iepriekšējās nodaļās, vidējā absolūtā novirze (*MAD*) siltumnesēja temperatūrai no saules kolektoriem dažādos temperatūras līmeņos, vadības režīmos un laikapstākļos svārstījās no 0,47 K līdz 2,20 K, un tipiskais svārstību periods bija 8–15 minūtes.

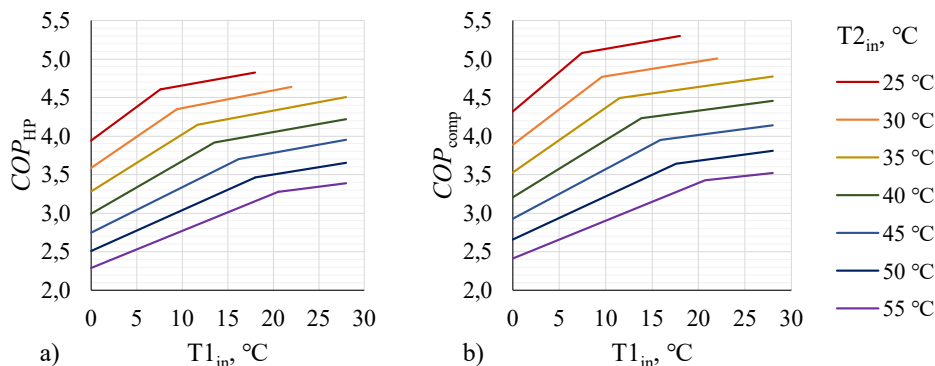
Stabilas temperatūras apstākļos siltumsūkņa *COP* mērīšanai tika izvēlēts 25 minūšu mērījumu intervāls, no kura pirmās 5 minūtes netika iekļautas analizē, lai mazinātu iespējamās kļūdas un nevēlamas svārstības plūsmas temperatūras stabilizācijas laikā. Pēc vairākiem izmēģinājuma testiem šī pieeja tika atzīta par piemērotu, jo tā ļāva īsā laikā iegūt vairākas temperatūru kombinācijas ar augstu atkārtojamību. Katrs mērījumu cikls tika atkārtots trīs reizes, un aprēķinātā nenoteiktība gandrīz visos gadījumos bija zem 1 % (nedaudz augstāka nenoteiktība tika novērota pie augstām avota un patēriņa pušu temperatūrām).

Svārstīgu temperatūras apstākļu gadījumā tika izvēlēts 4 minūšu temperatūras iestatījuma maiņas intervāls, kas nozīmē 8 minūšu svārstību periodu. Viens mērījuma cikls – 40 minūtes. Tika izmantoti seši temperatūras svārstību diapazoni (± 8 K, ± 6 K, ± 1 K, ± 4 K, ± 0 K, ± 2 K), izvietoti neregulārā secībā, lai izvairītos no rezultātu ietekmes, ko varētu radīt vienvirziena (tikai augošas vai krītošas) temperatūras pārmaiņas. Šādā veidā tika nodrošināts, ka *COP* izmaiņas ir saistītas tieši ar svārstību amplitūdu, nevis virzienu. Izmērītās *MAD* vērtības svārstījās no 0,05 K (bez svārstībām) līdz 6,00 K. Tika izstrādāta automatizēta kontroles programma ar virtuālo robotu, kas ik pēc 4 minūtēm mainīja iestatīto temperatūru, ļaujot eksperimentus veikt nepārtraukti dienā un naktī.

Temperatūras T_{1in} , T_{1out} , T_{2in} un T_{2out} tika mērītas ar astoņiem A klases virsmas temperatūras sensoriem (pielaide $\pm 0,15 + 0,002 t$), kas uzstādīti uz metāla caurules virsmām pretējās pusēs saskaņā ar *EN 14511-3:2022* standartu iespējami tuvu siltumsūkņim un pēc tam rūpīgi izolēti ar slēgtu šūnu elastomēra putuplasta izolāciju.

Galvenie rezultāti

Rezultāti rāda, ka siltumsūkņa veiktspējas koeficients (COP), iekļaujot cirkulācijas sūkņus, ir par 3,9 % līdz 9,9 % zemāks nekā tikai kompresora COP . Šo atšķirību vairāk ietekmē temperatūras izmaiņas patērētāja pusē, nevis siltuma avota pusē.



4.3. attēls. a) Siltumsūkņa COP ; b) siltumsūkņa kompresora COP atkarība no $T_{1,in}$ izmērītās temperatūras pie dažādiem $T_{2,in}$ temperatūras iestatījumiem. Regresijas modelis.

Regresijas analīze parādīja, ka saistību starp siltuma avota ieplūdes temperatūru un siltumsūkņa COP var aprakstīt kā funkciju ar diviem lineāriem segmentiem (4.3. att.). Temperatūras izmaiņas par 1 K zemākos temperatūru diapazonos būtiskāk ietekmē COP nekā augstākos. Lūzuma punkts ir atkarīgs no temperatūras patērētāja pusē (4.1. tab.).

4.1. tabula

Lineārās regresijas funkcija COP_{HP} atkarībai no $T_{1,in}$ temperatūras dažādiem $T_{2,in}$ temperatūru gadījumiem, izteiktā kā $f(x) = a \cdot x + b$ funkcija ar diviem lineāriem segmentiem

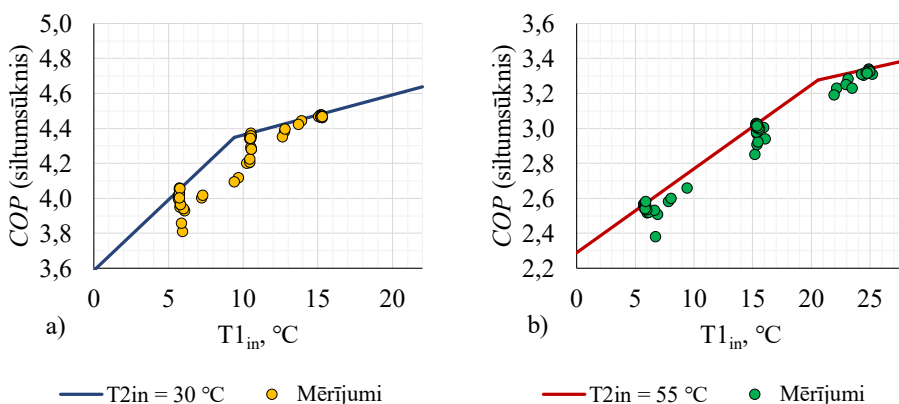
$T_{2,in}$ iestatījums	Pirms LP		Lūzuma punkts (LP)	Pēc LP	
	a	b		a	b
25 °C	$0,087 \pm 0,006$	$3,942 \pm 0,024$	7,64 °C	$0,021 \pm 0,003$	$4,446 \pm 0,035$
30 °C	$0,081 \pm 0,004$	$3,587 \pm 0,024$	9,40 °C	$0,023 \pm 0,001$	$4,132 \pm 0,024$
35 °C	$0,074 \pm 0,003$	$3,282 \pm 0,017$	11,69 °C	$0,022 \pm 0,001$	$3,890 \pm 0,030$
40 °C	$0,068 \pm 0,003$	$2,993 \pm 0,021$	13,57 °C	$0,021 \pm 0,001$	$3,631 \pm 0,025$
45 °C	$0,059 \pm 0,001$	$2,747 \pm 0,012$	16,24 °C	$0,021 \pm 0,002$	$3,364 \pm 0,038$
50 °C	$0,053 \pm 0,002$	$2,509 \pm 0,017$	18,00 °C	$0,019 \pm 0,003$	$3,121 \pm 0,060$
55 °C	$0,048 \pm 0,001$	$2,289 \pm 0,014$	20,58 °C	$0,015 \pm 0,003$	$2,968 \pm 0,069$

Turpmākajai analīzei tika izmantots siltumsūkņa COP (COP_{HP}), kas iekļauj arī cirkulācijas sūkņu patēriņu. Jāņem vērā, ka gan siltumsūkņa jauda, gan elektroenerģijas patēriņš mainās atkarībā no avota un patērētāja temperatūrām. Siltuma jauda variēja no 5,25 kW līdz 9,53 kW, savukārt elektroenerģijas patēriņš – no 1,51 kW līdz 2,82 kW. Šie dati tika izmantoti, lai izstrādātu siltumsūkņa veiktspējas datu kopu, kas piemērota izmantošanai *TRNSYS* dinamiskās simulācijas programmā. Šī datu kopa kalpo par pamatu turpmākajiem pētījumiem, lai modelētu un analizētu sarežģītu sistēmu darbību dažādos darbības režīmos.

Katram 40 minūšu mērījumu ciklam tika aprēķināts siltumsūkņa COP (4.1. formula), un rezultāti attēloti 4.4 attēlā kā punkti. Vidējā T_{1in} temperatūra katrā ciklā atšķiras, tāpēc tieša COP vērtību salīdzināšana starp cikliem varētu būt maldinoša. Lai to novērstu, svārstību gadījumos iegūtais COP tika salīdzināts ar stabilo etalona gadījumu – tas attēlo sagaidāmo COP pie attiecīgās vidējās T_{1in} temperatūras, pieņemot, ka svārstību nav (4.3. att.).

$$COP_{HP} = \frac{Q_h}{E}, \quad (4.1)$$

kur COP_{HP} – siltumsūkņa veiktspējas koeficients;
 Q – siltumsūkņa saražotā siltumenerģija, kJ;
 E – siltumsūkņa patērētā elektroenerģija, kJ.

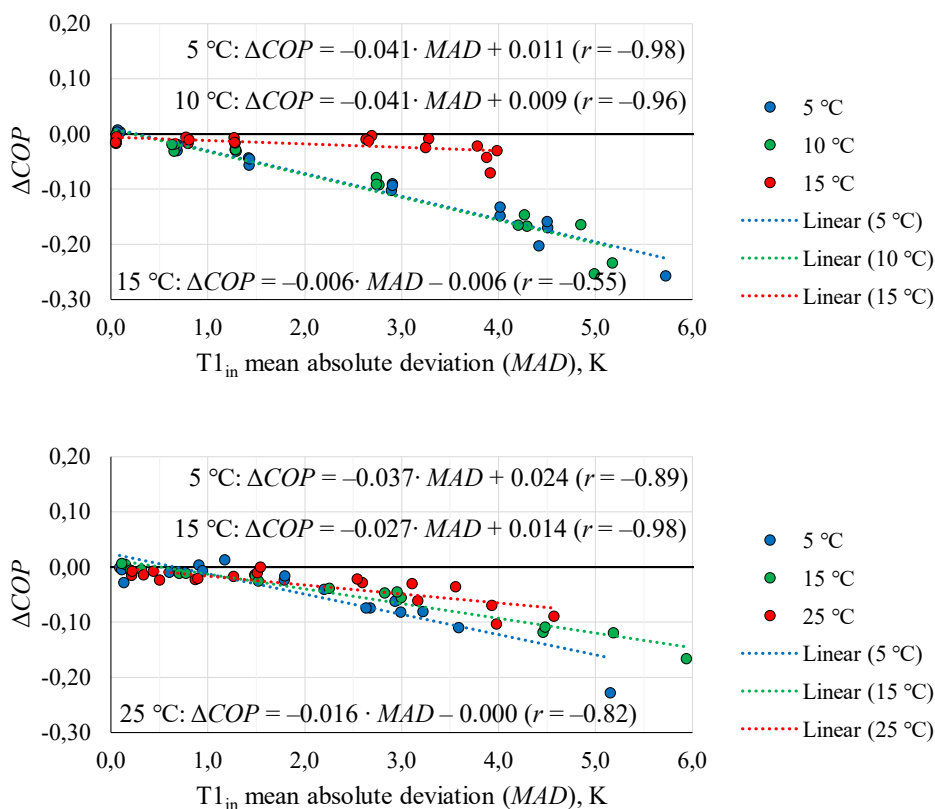


4.4. attēls. COP atkarība no T_{1in} temperatūras. Punkti – COP pie dažādām temperatūras svārstībām 40 minūšu intervālā; līnija – COP stabilas temperatūras apstākļos.

4.4. attēlā redzams, ka COP vērtības svārstīgos apstākļos (punkti) neatbilst vērtībām, kādas būtu sagaidāmas stabilos apstākļos (līnija). Lai novērtētu svārstību ietekmi uz šo atšķirību, katram punktam 4.4. attēlā tika noteikta vidējā absolūtā novirze (MAD) un aprēķināta atšķirība (ΔCOP) starp izmērīto COP un sagaidāmo COP pie tādas pašas vidējās temperatūras bez svārstībām. Šī attiecība redzama 4.5. attēlā.

Gadījumos, ja $T_{2in} = 30$ °C un $T_{2in} = 55$, tika konstatēta statistiski nozīmīga korelācija ($p < 0,05$) starp T_{1in} MAD un ΔCOP . Korelācijas koeficienti (r) liecina par spēcīgu saistību, ja avota temperatūra ir zemāka (5 °C, 10 °C pie $T_{2in} = 30$ °C un 5 °C, 15 °C pie $T_{2in} = 55$ °C). Tomēr, avota temperatūrai pārsniedzot lūzuma punktu (4.1. tab.), korelācija kļūst vājāka.

Pie avota temperatūrām zem lūzuma punkta 1 K pieaugums MAD vērtībā izraisa COP samazinājumu par 0,027–0,041 (aptuveni 1 %). Virs lūzuma punkta svārstību ietekme ir minimāla. Patērētāja puses temperatūras svārstībām bija niecīga ietekme uz COP , un tās saglabājās mērījumu nenoteiktības robežās.



4.5. attēls. Attiecības starp T_{1in} MAD, kas mērīts 40 minūšu intervālos, un starpību starp paredzēto COP pie tādas pašas vidējās temperatūras bez svārstībām un aprēķināto, balstoties izmērītajos datos. a) T_{2in} = 30 °C; b) T_{2in} = 55 °C.

Lai noteiktu, vai temperatūras svārstībām ir būtiska ietekme uz COP vērtību, ΔCOP jābūt lielākam par COP mērījumu nenoteiktību stabilos apstākļos. Tika aprēķināta kritiskā T_{1in} MAD vērtība, pie kuras šī ietekme kļūst nozīmīga (4.2. tab.). Ņemot vērā nenoteiktību, precīzu kritisko MAD vērtību nav iespējams noteikt, tāpēc tiek norādīts intervāls, kurā tā atrodas.

Siltumsūkņa COP un tā mērījumu nenoteiktība (σ_{COP}) stabilos apstākļos,
 COP samazinājuma gradients ar 99 % uzticamības intervālu un
kritiskās T_{1in} MAD vērtības, kad COP izmaiņas pārsniedz mērījuma nenoteiktību

T_{2in}	T_{1in}	Balstoties 4.1. tabulas datos		ΔCOP slīpums (4.5. att.)	T_{1in} $MAD_{critical}$ kad $\Delta COP < \sigma_{COP}$
		$COP = a \cdot T_{1in} + b$	σ_{COP}		
30 °C	5 °C	3,992	$\pm 0,031$	$-0,041 \pm 0,006$	[0,66–0,89] K
30 °C	10 °C	4,362	$\pm 0,026$	$-0,041 \pm 0,008$	[0,53–0,79] K
30 °C	15 °C	4,477	$\pm 0,028$	$-0,006 \pm 0,007$	[2,15–28,0] K
55 °C	5 °C	2,529	$\pm 0,015$	$-0,037 \pm 0,013$	[0,30–0,63] K
55 °C	15 °C	3,009	$\pm 0,021$	$-0,027 \pm 0,004$	[0,68–0,91] K
55 °C	25 °C	3,343	$\pm 0,102$	$-0,016 \pm 0,008$	[4,25–12,8] K

Kad siltuma avota puses temperatūras svārstību vidējā absolūtā novirze (MAD) ir mazāka par 0,9 K, to ietekme uz siltumsūkņa COP paliek mērījumu nenoteiktības robežās. Zemās temperatūrās ST kolektoru eksperimentos MAD vērtības bija zem 1 K, tāpēc var secināt, ka šādos apstākļos saules enerģijas mainīgums būtiski neietekmē siltumsūkņa darbību.

$TRNSYS$ simulācijās kā ievades dati tika izmantotas stabilos apstākļos noteiktās COP līknes kopā ar reāli izmērītām svārstīgo apstākļu temperatūrām. Lai gan arī simulācijās bija vērojama COP samazināšanās pieaugošu svārstību gadījumā, efekts bija mazāk izteikts nekā eksperimentāli novērotais. Tas liecina, ka datormodeļi ne vienmēr pilnībā ataino siltumsūkņu darbību dinamiskos apstākļos un eksperimentālie dati šajā gadījumā ir ticamāks avots.

Papildu mērījumi ar temperatūras un plūsmas datiem no ST un PVT sistēmām apstiprināja, ka gadījumos, kad MAD nepārsniedz vai ir tuvu kritiskajai vērtībai (4.2. tab.), ΔCOP paliek mērījumu nenoteiktības robežās jeb izmaiņas ir tik mazas, ka tās nepārsniedz mērījuma kļūdu. Ja MAD pārsniedz šo sliekšni, tiek novērots būtisks COP kritums.

Mērījumi liecina, ka ST un PVT kolektoru siltumnesēja temperatūra parasti ir aptuveni vienāda vai nedaudz virs COP līknes lūzuma punkta un ka temperatūras svārstības (MAD) ir zemas. Šādos apstākļos būtiska ietekme uz COP netika konstatēta. Tomēr plaša šādu sistēmu integrācija DH tīklā vai nepietiekami precīzu vadības algoritmu gadījumā var rasties riski, kas samazina siltumsūkņu efektivitāti.

Ierobežojumi

Šis pētījums koncentrējās uz vienu ūdens-ūdens siltumsūkni ar aukstuma aģentu $R407C$, kas darbojās avota temperatūras diapazonā līdz 30 °C. Šāda pieeja nodrošināja konsekveni un kontroli, taču citi siltumsūkņu modeļi, aukstuma aģenti vai kompresoru tipi var uzrādīt atšķirīgu veiktspēju, tādējādi piedāvājot virzienu turpmākajiem salīdzinošajiem pētījumiem.

Slodzes svārstības šajā pētījumā netika analizētas, taču tās plānots pētīt turpmāk, izmantojot darbā izstrādātās eksperimentālās metodes. Turklāt spiediena starpības un svārstību ietekme DH tīklā var palielināt cirkulācijas sūkņa elektroenerģijas patēriņu, tādējādi samazinot sistēmas COP . Lai pietuvinātu testēšanas apstākļus reālai ekspluatācijai, ieteicams veikt papildu testus mainīgos patērētāja puses temperatūras un plūsmas režīmos, kā arī daļējas slodzes apstākļos, izmantojot izstrādāto metodoloģiju. Šie soļi atbalstīs risinājumu ieviešanu praksē.

SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

Promocijas darba pētījuma mērķis tika sasniegts, salīdzinot dažādu sistēmu konfigurāciju un ekspluatācijas apstākļu veikspēju, parādot, ka fotoelektrisko termisko kolektoru sistēmām apvienojumā ar ūdens-ūdens siltumsūkņiem zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes tīklos ir ievērojams attīstības potenciāls. Iegūtie rezultāti ne tikai uzsver šīs integrētās pieejas priekšrocības, bet arī sniedz skaidru virzienu turpmākiem pētījumiem un praktiskai ieviešanai.

Izstrādātā pētniecības metodoloģija apvieno eksperimentālus mērījumus, simulācijas un statistisko analīzi, piedāvājot elastīgu pieeju nākotnes pētījumiem, kas vērsti uz siltumnesēja temperatūras svārstību novērtēšanu, sistēmas siltuma jaudas aprēķināšanu un siltumsūkņu veikspējas izvērtēšanu mainīgos apstākļos. Šī metodoloģija kalpo par pamatu turpmākai izpētei, tostarp dažādu siltumsūkņu modeļu testēšanai, alternatīvu sistēmu konfigurāciju analīzei un jaunu vadības algoritmu ieviešanai.

Galvenie secinājumi

1. Latvijā ir ievērojams potenciāls paplašināt saules termālo (*ST*) kolektoru izmantošanu. Galvenie izaicinājumi ir sezonālā neatbilstība – aptuveni 75 % no *ST* lietderīgās enerģijas tiek saražoti no aprīļa līdz septembrim – un salīdzinoši zema efektivitāte tradicionālajos lietojumos. Šajā pētījumā ir ieteikts *ST* kolektorus integrēt zemas vai īpaši zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes tīklos, lai maksimāli izmantotu saules enerģiju un samazinātu pārkaršanas risku, izmantojot tīkla akumulācijas spējas, nodrošinot enerģijas sadali starp vairākām ēkām un ieviešot proaktīvo lietotāju koncepciju.
2. Siltumnesēja temperatūras svārstības *ST* sistēmās galvenokārt ietekmē saules starojuma mainīgums, izvēlētais darba temperatūras līmenis un vadības stratēģija. Šīs svārstības var efektīvi raksturot, izmantojot vidējās absolūtās novirzes (*MAD*) parametru. Mērījumi parādīja, ka *MAD* vērtības svārstās no 0,47 K līdz 0,96 K pie zemām temperatūrām (50/30 °C), no 1,03 K līdz 1,61 K pie vidējām temperatūrām (65/42 °C) un no 1,02 K līdz 2,20 K pie augstām temperatūrām (80/50 °C).
3. Liela mēroga saules kolektoru stacijas ir veiksmīgi ieviestas tādās valstīs kā Dānija, Zviedrija, Vācija un Latvija. Tomēr mājāsaimniecību integrācija, kur patērētāji darbojas arī kā proaktīvie lietotāji (autonomie ražotāji), joprojām ir retums. Ierobežotā reāli izmantojamu darbības datu pieejamība palēnina decentralizētas saules enerģijas integrācijas koncepcijas attīstību un praktisko īstenošanu siltumapgādes tīklos.
4. *TRNSYS 18* simulācijas apstiprina, ka neliela mēroga *DH* sistēmas var efektīvi darboties kā siltuma akumulators decentralizētiem *ST* kolektoriem, samazinot atkarību no vietējiem elektriskajiem katliem ārpus apkures periodā, kas ir plaši izplatīta prakse Latvijas mazpilsētās. Salīdzinot ar “vietējiem” risinājumiem, “rajona” konfigurācija uzrādīja par 13–22 % augstāku saules enerģijas izmantojumu zemākas darba temperatūras lielāka akumulācijas apjoma dēļ.
5. Pētījums apstiprina saules enerģijas un siltumsūkņu apvienošanas energoefektivitāti siltumapgādes sistēmās. Jo īpaši fotoelektriskie termiskie (*PVT*) kolektori apvienojumā ar ūdens-ūdens siltumsūkņiem (*WWHP*) uzrāda lielu potenciālu, lai maksimāli palielinātu

saules siltuma jaudu no ierobežotām platībām. Šāda kombinācija nodrošina augstu saules siltuma izmantošanu, efektīvu telpas izmantošanu un labāku sistēmas kopējo veiktspēju zemas temperatūras TEC tīklos.

6. *TRNSYS 18* simulācijas parādīja, ka *PVT* + *WWHP* sistēmas saražo vislielāko ikgadējo siltuma jaudu – zemas temperatūras *DH* sistēmā 1040–1361 kWh/m². Tas ir 1,8 līdz 4,6 reizes vairāk nekā aprēķinātā jauda, ko saražo *ST* kolektori, kas tieši pieslēgti *DH* tīklam, un līdz 7,6 reizēm vairāk nekā izmērītā tradicionālā risinājuma ar vietējo akumulāciju jauda viengimenes mājā. Tomēr, lai izvairītos no pārprodukcijas un efektivitātes zudumiem, paplašinot sistēmu, jāņem vērā sezonālā siltuma uzkrāšana vai jaudas ierobežojumi.
7. Attiecība starp avota puses siltumnesēja temperatūru un *WWHP COP* ir funkcija, kas ietver divus lineārus segmentus. Zem lūzuma punkta *MAD* palielinājums par 1 K samazina *COP* līdz pat 1 %; virs lūzuma punkta ietekme ir minimāla, kas liecina par lielāku jutību pret temperatūras svārstībām pie zemākām avota temperatūrām. Ja *MAD* ir mazāks par 0,9 K, šī ietekme ietilpst mērījumu 99 % ticamības intervālā un to nevar statistiski apstiprināt. Svārstībām patērētāju pusē bija minimāla ietekme, un tās saglabājās mērījumu nenoteiktības robežās.
8. Temperatūras un plūsmas svārstības no *ST* un *PVT* kolektoriem maz ietekmēja siltumsūkņa *COP*, jo izmērītās *MAD* vērtības saglabājās tuvu vai zem kritiskajām robežvērtībām. Tomēr liela mēroga ieviešana vai sliktas kontroles stratēģijas varētu izraisīt lielāku mainīgumu un samazināt siltumsūkņa efektivitāti, uzsverot monitoringa un sistēmas projektēšanas nozīmi.

Pētījuma hipotēzi apstiprināja eksperimentālie mērījumi, kas parādīja, ka saules enerģijas mainīguma izraisītās temperatūras svārstības siltuma avota pusē var samazināt ūdens-ūdens siltumsūkņa veiktspējas koeficientu (*COP*), ja avota temperatūra ir zema (līdz 8–21 °C atkarībā no patērētāja puses temperatūras), kas ir raksturīgs īpaši zemas temperatūras centralizētās siltumapgādes sistēmām. Savukārt zemas temperatūras apstākļos (≥ 20 °C) temperatūras svārstībām nav būtiskas ietekmes uz *COP*. Jāuzsver, ka testi tika veikti ar konkrētu siltumsūkņa modeli, tāpēc citiem modeļiem rezultāti var atšķirties. Tomēr izstrādātā metodoloģija un testēšanas principi ir piemērojami arī citu siltumsūkņu novērtēšanai nākotnes pētījumos.

Pētījuma rezultāti ir publicēti zinātniskajos žurnālos un prezentēti starptautiskās konferencēs. Balstoties iegūtajā informācijā, plānots publicēt vēl vismaz divus rakstus.

Šie rezultāti var kalpot par pamatu lēmumu pieņemšanai centralizētās siltumapgādes sistēmu attīstībā, īpaši optimizējot saules enerģijas integrāciju un siltumsūkņu izmantošanu, lai uzlabotu kopējo sistēmas efektivitāti. Tomēr, lai noteiktu investīciju atmaksāšanās periodus, ir nepieciešama detalizēta ekonomiskā analīze, ņemot vērā reālās izmaksas un enerģijas tarifus, kas ir būtisks nākotnes pētījumu virziens.

Turklāt zemas un īpaši zemas temperatūras siltumapgādes sistēmas koncepcija piedāvā arī potenciālu centralizētās dzesēšanas attīstībai, izmantojot siltumsūkņus, padarot šo jomu par būtisku nākotnes pētījumu un sistēmu optimizācijas virzienu.

PATEICĪBAS

Šis darbs ir izstrādāts ar:

- Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu;
- Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas «Izaugsme un nodarbinātība» 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa «Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās» projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu;
- Eiropas Savienības Atvērēšanas un noturības mehānisma atbalstu projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 “Konsolidācijas un pārvaldības izmaiņu ieviešana Rīgas Tehniskajā universitātē, Liepājas Universitātē, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā un Latvijas Jūras akadēmijā un Liepājas Jūrniecības koledžā virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās” akadēmiskās karjeras doktorantūras grantu atbalstu (granta ID: 1071).



ĢENERATĪVĀS MI IZMANTOŠANAS DEKLARĀCIJA

Šī darba sagatavošanas laikā tika izmantots *OpenAI “ChatGPT”*, lai uzlabotu lasāmību un valodu. Pēc šī rīka izmantošanas saturs tika pārskatīts un rediģēts.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- Bertelsen, N. ; Mathiesen, B. V, Djørup, S. R., Schneider, N. C. A., Paardekooper, S. ;, Sánchez García, L. ;, Thellufsen, J. Z., Kapetanakis, J. ;, Angelino, L. ;, & Kiruja, J. (2021). *Integrating low-temperature renewables in district energy systems - Guidelines for policy makers*.
- Bogdanovičs, R. (2021). *Decentralizēto saules kolektoru integrēšana pilsētas centralizētajā siltumapgādes sistēmā* [Master's thesis]. Riga Technical University.
- Bogdanovics, R., Zemitis, J., Zajacs, A., & Borodinecs, A. (2024). Small-scale district heating system as heat storage for decentralized solar thermal collectors during non-heating period. *Energy*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131260>
- Brand, L., Calvén, A., Englund, J., Landersjö, H., & Lauenburg, P. (2014). Smart district heating networks - A simulation study of prosumers' impact on technical parameters in distribution networks. *Applied Energy*, 129, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.079>
- Brange, L., Lauenburg, P., Sernhed, K., & Thern, M. (2017). Bottlenecks in district heating networks and how to eliminate them – A simulation and cost study. *Energy*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.097>
- Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>
- Cholewa, T., Siuta-Olcha, A., Smolarz, A., Muryjas, P., Wolszczak, P., Guz, Ł., Bocian, M., & Balaras, C. A. (2022). An easy and widely applicable forecast control for heating systems in existing and new buildings: First field experiences. *Journal of Cleaner Production*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131605>
- Delfi.lv news portal. (2024, December 27). “Sadales tīkla” vadītājs: ar saules ģenerācijas attīstību esam nonākuši “no viena grāvja otrā.” https://www.delfi.lv/bizness/37264250/biznesa_vidē/120055520/sadales-tikla-vaditajs-ar-saules-generacijas-attistibu-esam-nonakusi-no-viena-gravja-otra
- Dienas Bizness. (2023). *Rīgas siltuma mērķis ir kļūt par enerģijas apmaiņas platformu*. <https://www.db.lv/zinas/rigas-siltuma-merkis-ir-klut-par-energijas-apmainas-platformu-512377>
- Directorate-General for Communication. (2024). *Latvia - Final updated NECP 2021-2030*. https://commission.europa.eu/publications/latvia-final-updated-necp-2021-2030-submitted-2024_en.
- European Commission. (2020). *2050 long-term strategy*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en.
- Francisco, B., Nelson, S., Jaakko, E., & Hatef, M. (2024). Empirical investigation of solar photovoltaic-thermal collectors for heat pump integration. *Applied Thermal Engineering*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123175>

- Hamburg, A., Kuusk, K., Mikola, A., & Kalamees, T. (2020). Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB. *Energy*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116874>
- Huang, P., Copertaro, B., Zhang, X., Shen, J., Löfgren, I., Rönnelid, M., Fahlen, J., Andersson, D., & Svanfeldt, M. (2020). A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating. In *Applied Energy* (Vol. 258). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114109>
- International Energy Agency. (2024). *Latvia 2024 Energy Policy Review. Executive summary*. <https://www.iea.org/reports/latvia-2024/executive-summary>.
- Lake, A., Rezaie, B., & Beyerlein, S. (2017). Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.061>
- Latvijas Republikas Ministru kabinets. (2022). *Latvia's Report to the United Nations on the Implementation of the Sustainable Development Goals*.
- Latvijas Republikas Ministru kabinets. (2024). *Aktualizētais Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam*.
- Lebedeva, K., Migla, L., & Odineca, T. (2023). Solar district heating system in Latvia: A case study. *Journal of King Saud University - Science*, 35(10). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102965>
- Lennermo, G., Lauenburg, P., & Werner, S. (2019). Control of decentralised solar district heating. *Solar Energy*, 179(December 2018), 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.080>
- Lichtenegger, K., Wöss, D., Halmdienst, C., Höftberger, E., Schmidl, C., & Pröll, T. (2017). Sustainable Energy , Grids and Networks Intelligent heat networks : First results of an energy-information-cost-model. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 11, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2017.05.001>
- Lund, H., Østergaard, P. A., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., Mortensen, B. O. G., Mathiesen, B. V., Bojesen, C., Duic, N., Zhang, X., & Möller, B. (2018). The status of 4th generation district heating: Research and results. In *Energy* (Vol. 164). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>
- Lund, H., Østergaard, P. A., Nielsen, T. B., Werner, S., Thorsen, J. E., Gudmundsson, O., Arabkoohsar, A., & Mathiesen, B. V. (2021). Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy*, 227, 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
- Meggers, F., Mast, M., & Leibundgut, H. (2010). The missing link for low exergy buildings: low temperature-lift, ultra-high COP heat pumps. *Clima 2010: Sustainable Energy Use in Buildings, December 2013*.

- Millar, M. A., Yu, Z., Burnside, N., Jones, G., & Elrick, B. (2021). Identification of key performance indicators and complimentary load profiles for 5th generation district energy networks. *Applied Energy*, 291, 116672. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116672>
- Paulick, S., Schroth, C., Guddusch, S., & Rühling, K. (2018). Resulting Effects on Decentralized Feed-In into District Heating Networks - A Simulation Study. *Energy Procedia*, 149, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.168>
- Revesz, A., Jones, P., Dunham, C., Davies, G., Marques, C., Matabuena, R., Scott, J., & Maidment, G. (2020). Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*, 201, 117389. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117389>
- Rīgas Siltums JSC. (2024). *Apraksts*. <https://www.rs.lv/saturs/rigas-siltums>
- Schäfer, K., & Thomas, S. (2018). Experimental Plant for Analyzing the Technical Feasibility of Decentralized Solar Heat Feed-In. *EuroSun 2018*, 1–9. <https://doi.org/10.18086/eurosun2018.05.04>
- Sørensen, P. A., Nielsen, J. E., Battisti, R., Schmidt, T., & Trier, D. (2012). Solar district heating guidelines: Collection of fact sheets. WP3 – D3.1 & D3.2. *Solar Distric Heating*, August, 152.
- SPF Institute for Solar Technology. (n.d.). *Collectors*. Retrieved January 2, 2025, from <https://www.spftesting.info/data/1.collectors/>
- Volkova, A., Pakere, I., Murauskaite, L., Huang, P., Lepiksaar, K., & Zhang, X. (2022). 5th generation district heating and cooling (5GDHC) implementation potential in urban areas with existing district heating systems. *Energy Reports*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.162>
- Walnum, H. T., Sørensen, Å. L., & Stråby, K. (2021). Measurement data on domestic hot water consumption and related energy use in hotels, nursing homes and apartment buildings in Norway. *Data in Brief*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107228>
- Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2024). *Solar Heat Worldwide. Edition 2024. Global market development and trends in 2023. Detailed market figures 2022*. 96.
- Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 137, 617–631. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>
- Winterscheid, C., Dalenback, J.-O., & Holler, S. (2017). Integration of solar thermal systems in existing district heating systems. *Energy*, 137, 579–585.
- Zajacs, A., Bogdanovics, R., Zeiza-Seleznova, A., Valancius, R., & Zemitis, J. (2022). Integration of decentralized solar collectors into a district heating system. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103920. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103920>



Raimonds Bogdanovičs dzimis 1996. gadā Daugavpilī. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu un inženiera kvalifikāciju (2020) un profesionālo maģistra grādu (2021) siltuma, gāzes un ūdens inženiersistēmās. Kopš 2019. gada strādā RTU, vispirms ieņemot zinātniskā asistenta amatu, no 2022. gada – Ilgtspējīgo būvmateriālu un inženiersistēmu institūta lektora un pētnieka amatu. Kopš 2022. gada ir sertificēts būvspeciālists siltumapgādes, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu projektēšanā. Zinātniskās intereses saistītas ar efektīvu ēku inženiersistēmu izstrādi, integrējot atjaunīgos energoresursus, īpaši – saules enerģiju un siltumsūkņus, un vienlaikus risinot jautājumus, kas saistīti ar energosistēmu dekarbonizāciju, klimata izaicinājumiem un enerģijas izmaksām Latvijā un Baltijas reģionā. Pētniecībā tiecas pēc rezultātiem, kas ir gan zinātniski pamatoti, gan praktiski lietojami, uzlabojot sistēmu darbību un samazinot ietekmi uz vidi.