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

Klaudio Rošā (Claudio Rochas)
Enerģētikas un elektrotehnikas doktora studiju programmas
doktorants
(Nr. 031AEB001)

Saules enerģijas kombinēto sistēmu eksperimentālā izpēte. Optimizācija

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr.habil.sc.ing., profesore
DAGNIJA BLUMBERGA

Rīga 2008

UDK 620.92+697.329](043.2)
Ro 710 s

K.Rošā. **Saules enerģijas kombinēto sistēmu eksperimentālā izpēte. Optimizācija**

Promocijas darba kopsavilkums.–Rīga: RTU, 2008. – 34 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2008.gada 11.septembra lēmumu, protokols Nr. 01/08-09

ISBN 978-9984-32-891-1

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTES INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2008.gada 5.decembrī plkst.14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, aktu zālē.

OFICIĀLIE OPONENTI
Dr.habil.sc.phys. Juris Ekmanis, akadēmiķis
Latvijas Zinātņu akadēmija

Dr.hab.sc. Egils Dzelzītis, profesors
Rīgas Tehniskā universitāte

John Bernhard Rekstad, profesors
Oslo Universitāte

APSTIPRINĀJUMS
Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Klaudio Rošā: _____

Datums: _____

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas un secinājumus, literatūras sarakstu, 91 attēlu, 26 tabulas, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 80 nosaukumi.

Šo darbu daļēji atbalstīja Eiropas Sociālais fonds nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros un Ziemeļvalstu enerģētikas izpētes programma REBUS projekta “Konkurētspējīgas saules apkures sistēmas dzīvojamajām ēkām” ietvaros.

Satura rādītājs

Darba aktualitāte 5
Darba mērķi 5
Izpētes metodika 6
Darba zinātniskā nozīme 7
Darba praktiskā nozīme 7
Darba aprobācija 8
Autora publikācijas 10
Darba struktūra un apjoms 11
1. Jauna saules enerģijas kombinētās sistēmas koncepcija 12
2. Saules akumulācijas tvertnes analīze 17
3. Koksnes granulas kā papildu siltuma avots saules enerģijas kombinētajās sistēmās 22
4. Saules enerģijas kombinēto sistēmu ekonomiskā optimizācija Latvijā 27
Secinājumi 33

Darba aktualitāte

2008.gads ir bijis kritisks enerģijas ziņā gan Eiropā, gan visā pasaulē. Cena par barelu naftas bieži pārsniedza 100 dolārus, pieauga atkarība no Krievijas piegādātās dabasgāzes, un bija jūtamas Ķīnas un Indijas arvien pieaugošās vajadzības pēc enerģijas.

Paralēli problēmām, kas ir saistītas ar augstajām enerģijas cenām, ir vērojama cita problēma, kas ir saistīta ar fosilo kurināmo izmantošanu, un tās ir globālās klimata pārmaiņas un no tām izrietošā nepieciešamība ievērojami samazināt CO_2 emisijas.

Šī iemesla dēļ energoefektivitāte un atjaunojamie enerģijas avoti ir nopietns mērķis, lai mazinātu atkarību no fosilajiem kurināmajiem un ietekmi uz globālo sasilšanu.

Pēdējo 15 gadu laikā Latvijā tika pieņemtas vairāk nekā 15 nacionālās programmas un politikas stratēģijas, kas ir saistītas ar energoefektivitāti un atjaunojamās enerģijas projektiem. Īpaši nozīmīgas ir Nacionālā atjaunojamās enerģijas programma (2000), Nacionālā energoefektivitātes stratēģija (2000) un Nacionālais kvotu sadales plāns (2004). Tomēr šīs programmas neattiecas uz saules enerģiju Latvijā. Tas ir radījis situāciju, kad saules siltumenerģijas tirgus praktiski neeksistē un uzstādīto saules apkures sistēmu skaits ir niecīgs. Kopējais kolektoru laukums ir tikai 200 m^2.

Skatoties perspektīvā, ir izplatīts viedoklis, ka tirgus cenšas attālināties no fosilajiem kurināmajiem un neefektīvām sistēmām. Māju īpašnieki ir arvien vairāk ieinteresēti būt neatkarīgiem kurināmā ziņā un darboties ar elastīgām sistēmām, kurās viegli un lēti var pārslēgties no viena kurināmā veida un otru. Šādā situācijā atjaunojamās enerģijas sistēmas noteikti ieņems savu tirgus daļu. Sevišķi augsts potenciāls ir saules enerģijas kombinētajām sistēmām, kas tiek definētas kā saules apkures iekārtas, kuras nodrošina gan telpu apkuri, gan karsto ūdeni un kurām ir lieliska sistēmas automatizācija un efektivitāte.

Ļoti svarīgs atjaunojamās enerģijas, it sevišķi saules enerģijas, izmantošanas pieauguma aspekts ir pētījumu un attīstības projektu ieguldījums, kuru mērķis ir uzlabot saules apkures sistēmu energoefektivitāti, fleksibilitāti un izmaksu un ieguvumi attiecību.

Darba mērķi

Promocijas darba galvenais mērķis ir izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt Latvijas apstākļiem piemērotu saules enerģijas kombinēto

sistēmu, piemērot tās darbības simulēšanai TRNSYS modeli un veikt sistēmas ekonomisko optimizāciju.

Mērķa sasniegšanai veikti šādi izpētes uzdevumi:

- saules enerģijas kombinētās sistēmas divu galveno elementu – stratifikatora un granulu katlu – eksperimentālie pētījumi un analizēti iegūtie rezultāti, lai optimizētu to konstruktīvos parametrus sistēmas darbības uzlabošanai;
- saules enerģijas sistēmas un tās elementu darbības matemātiskā modelēšana, lai identificētu atkarīgos mainīgos parametrus, saules enerģijas kombinētās sistēmas darbības optimizācijai;
- vienģimenes mājai domāta saules enerģijas kombinētās sistēmas simulācijas modeļa izveide, kurā apvienota granulu un saules apkures sistēma un kas atbilst Latvijas apstākļiem, un izstrādātās eksperimentālās iekārtas izmantošana šī modeļa pārbaudei;
- saules enerģijas kombinēto sistēmu veiktspējas novērtēšana Latvijas robežnosacījumos un ekonomiskās optimizācijas līdzekļa izstrāde, lai novērtētu šāda veida risinājumu potenciālu Latvijā.

Izpētes metodika

Izpētes metodika ir izstrādāta sadarbībā ar Dānijas Tehnisko universitāti, Saules enerģijas izpētes centru un RTU VASSI Ziemeļvalstu enerģijas izpētes programmas REBUS projekta "Konkurētspējīgas solārās enerģijas apkures sistēmas dzīvojamajām ēkām" ietvaros.

Izpētes metodika ietver divas savstarpēji saistītas daļas. Balstoties uz promocijas darba eksperimentālajiem pētījumiem un to laikā savāktajiem datiem, ir veikta to analīze, izmantojot matemātiskās statistikas metodi – regresijas analīzi –, analizētas neatkarīgo mainīgo parametru izmaiņas.

Izmantojot veikto eksperimentālo pētījumu rezultātus, tika adaptēts un validēts saules enerģijas kombinētās sistēmas TRNSYS modelis kombinētās sistēmas izpētei un optimizācijai.

Izmantojot datorsimulāciju, izstrādāts ekonomiskās optimizācijas līdzeklis saules enerģijas kombinēto sistēmu investīciju tagadnes neto vērtības noteikšanai, lai atrastu optimālos parametrus REBUS saules enerģijas kombinēto sistēmu izmēriem Latvijā un lai izpētītu to vispārējo potenciālu.

Darba zinātniskā nozīme

Promocijas darbā izstrādātas un aprobētas saules enerģijas kombinētās apkures sistēmas un tās atsevišķu elementu eksperimentālie pētījumi, datu apstrāde un simulācijas modeļi. To rezultātā ir izveidota sistēmas optimizācijas metodika.

Saules enerģijas kombinētās sistēmas optimizācijas modelis balstās uz vairākām darbā izstrādātajām metodikām:

- izstrādāts saules enerģijas kombinētās sistēmas simulācijas modelis, kurš balstās uz TRNSYS datorprogrammas modifikāciju;
- izstrādāts Makromodelis, kurš ļauj analizēt saules sistēmas akumulācijas tvertnes darbināšanas īpatnības un optimizēt tvertnes konstruktīvos parametrus, veicot ekonomisko optimizāciju. Makromodeļa izveide balstās uz eksperimentāliem stratifikatora pētījumiem;
- veiktas granulu katla eksperimentālo pētījumu sērijas, kuru rezultāti izmantoti gan energoefektivitātes paaugstināšanas noteikšanā, gan slāpekļa oksīdu emisiju samazināšanas paņēmiena izstrādē, gan katla darbības režīmu vērtēšanā;
- datorsimulācijas modelis pārbaudīts, eksperimentālajiem datiem labi sakrītot ar aprēķina rezultātiem. Identificēts optimāls katla darbības režīms ar PID vadības ierīci;
- izstrādāts optimizācijas līdzekļa algoritms, matemātiskais un ekonomiskais modelis.

Darba praktiskā nozīme

Promocijas darbam ir liela praktiskā nozīme, kuras pamatā ir arī ievērojams rūpniecisko partneru atbalsts, kas ieguldīts šī darba izstrādē. Šim pētījumam ir dažādas mērķa grupas:

- ēku siltumapgādes sistēmas – promocijas darbā ir piedāvātas ne tikai uzlabotas saules enerģijas kombinētās sistēmas un to elementi, bet arī sistēmu izvēles tehniskā un ekonomiskā optimizācija;
- Vides ministrija – promocijas darba rezultāti ir noderīgi, lai novērtētu saules enerģijas iespējamā atbalsta shēmas Latvijā, it sevišķi, lai novērtētu saules enerģijas potenciālu un ekonomiskā atbalsta līmeni, kas būtu nepieciešams, lai radītu pozitīvu atdevi tirgū;
- koksnes granulu katlu ražotāji – darbā piedāvātā metodika, kas izmantota granulu katlu parametru identifikācijai, ir nopietns solis

granulu katlu konstrukciju uzlabošanas virzienā, lai palielinātu katlu efektivitāti un elastīgumu, samazinot kaitīgās emisijas;

- koksnes granulu ražotāji – promocijas darba ietvaros izveidotā laboratorija noder uz CEN/TS standartiem balstītu granulu kvalitātes parametru analīzei;
- konsultāciju un projektēšanas uzņēmumi saules enerģijas jomā – ekonomiskās optimizācijas līdzeklis ļauj novērtēt saules enerģijas kombinēto sistēmu ekonomisko pamatojumu un vienlaikus ir ātrs līdzeklis, lai noteiktu sistēmas lielumu.

Stratifikatora eksperimentālo pētījumu laikā ir tapusi ideja par uzlabotu temperatūras zondi, kas ir aprakstīta patentpieteikumā.

Darba aprobācija

Par darba rezultātiem ir ziņots, un tie ir apspriesti:

1. Starptautiskā konferencē „*10th International Conference on Solar Energy at High Latitudes "North Sun 2005"*" ar referātu "Solar combisystems in Latvia - market study and potential" Viļņā, Lietuvā, 2005.gada 25.–27.maijā;
2. Starptautiskā seminārā „*TAIEX – JRC Workshop on Scientific Technical Reference System on Renewable Energy & Use Efficiency:* "*Energy Efficiency potential in buildings, barriers and ways to finance projects in New Member States and Candidate Countries*" Tallinā, Igaunijā, 2005.gada 6.–8.jūlijā;
3. seminārā "*CEN TC 335 - Standardisation of solid biofuels - Tools for trading*" Rīgas Tehniskajā universitātē, Rīgā, Latvijā, 2005.gada 22.augustā;
4. seminārā "*Thermal stratification in solar storage tanks*" ar referātu "Calculations on how thermal stratification in tanks is influenced by the tank design" Dānijas Tehniskajā universitātē, Kopenhāgenā, Dānijā, 2005.gada 13.oktobrī;
5. *46.RTU zinātniskajā konferencē* ar referātu "Enhance evaluation of solar combisystem using TRNSYS simulation tool", Rīgā, Latvijā, 2005.gada 14.oktobrī;
6. seminārā "*Biohydrogen*" ar referātu "Solar combisystem and renewable energy sources in Latvia" Aukureiri universitātē, Islandē, 2006.gada 7.–9.jūnijā;
7. Starptautiskā Saules enerģijas kongresā "*EuroSun 2006*" ar referātu "The latest solar development in Latvia on solar combisystem" un

referātu "Nordic Energy Research cooperation on solar combisystems" Glāzgovā, Lielbritānijā, 2006.gada 26.–29.jūnijā;

8. Starptautiskā simpozijā „*2nd International Symposium on Energy, Informatics and Cybernetics - EIC '06*" ar referātu "European Nordic Energy Research cooperation on solar combisystems. The latest solar development in Latvia" Orlando, ASV, 2006.gada 16.–19.jūlijā;
9. *47.RTU zinātniskajā konferencē* ar referātu "Development of solar combisystem control algorithm and simulation model", referātu "The actual status of the development of a system concept for a solar combisystem at the laboratory of solar and biomass of the department of Energy Systems and Environment of Riga Technical University", ar referātu "Development of solar energy laboratory" un ar referātu "Start-up, testing, and parameter identification of a small scale pellet boiler produced in Latvia" Rīgā, Latvijā, 2006.gada 13.–14.oktobrī;
10. seminārā "*Sustainable development in the Nordic Countries and in Latvia*" ar referātu "Solar energy research in Latvia" viesnīcā „Bergs", Rīgā, Latvijā, 2006.gada 6.decembrī;
11. seminārā "*Solvarme – kombianlæg og varmelagring (Solar combisystem)*" Dānijas Tehniskajā universitātē, Kopenhāgenā, Dānijā, 2006.gada 14.novembrī;
12. starptautiskā konferencē „*11th International Conference on Solar Energy at High Latitudes* "*North Sun 2007*"" ar referātu "Comparative system analysis of solar combisystem system using two different solar tanks integrated in 60x60 cabinets" Rīgā, Latvijā, 2007.gada 30.maijā–1.jūnijā;
13. *Latvijas Universitātes 66.zinātniskajā konferencē* ar referātu "Klimata tehnoloģiju ieviešanas pasākumu izpēte. Latvijas pieredzes analīze" Rīgā, Latvijā, 2008.gada janvārī;
14. konferencē "*Environmental Science and Education*" ar posteri "The role of laboratory for the development of programs in environmental and energy engineering" Vides ministrijā, Rīgā, Latvijā, 2008.gadā;
15. *49.RTU zinātniskajā konferencē* ar referātu "Performance analysis of pellet boiler" Rīgā, Latvijā, 2008.gada 14–15.oktobrī;
16. Patenta pieteikums Temperatūras zonde. C.Rochas, M.Rošā, A.Žandeckis, 30.06.2008. pieteikums P-8-119.

Autora publikācijas

1. Blumberga D., Blumberga A. and Rochas C. Why Bioenergy projects in Latvia are attractive. Present and future status. // International Conference Proceedings "Implementation Strategies for Biomass Utilization in Europe and developing Countries". Eskilstuna, Sweden. November 19–21, 2001.
2. Rochas C. and Blumberga M. Integration of dispersed energy from wood based fuels // International Conference Proceedings "CEERES (Central East European Renewable Energy Sources)". Bratislava, Slovakia. May 16–17, 2002.
3. Rochas C., Svetļicka K. and Blumberga D. Solar combisystems in Latvia – market study and potential // The 10th International Conference on Solar Energy at High Latitudes. North Sun 2005, Vilnius, Lithuania, May 2005.
4. Rochas C. and Gušča J. Enhance evaluation of solar combisystem using TRNSYS simulation tool // RTU zinātniskie raksti "Enerģētika un elektrotehnika", 4.sērija, 14.sējums, Rīga, 2005.
5. Furbo S., Thür A., Fiedler F., Bales C., Rekstad J., Meir M., Blumberga D., Rochas C., Karlsson B. and Gajbert H. Nordic Energy Research cooperation on solar combisystems // Proceedings of the International conference EuroSun 2006 congress, June 2006, Glasgow, UK.
6. Rochas C. and Blumberga D. The latest solar development in Latvia on solar combisystem // Proceedings of the International conference EuroSun 2006 congress, Glasgow 2006.
7. Rochas C. and Blumberga D. European Nordic Energy Research cooperation on solar combisystems. The latest solar development in Latvia // 2nd International Symposium on Energy, Informatics and Cybernetics: EIC '06. Orlando, Florida, USA. July 16–19, 2006.
8. Rochas C. and Blumberga D. The actual status of the development of a system concept for a solar combisystem at the laboratory of solar and biomass of the department of Energy Systems and Environment of Riga Technical University // RTU zinātniskie raksti "Enerģētika un elektrotehnika", 5.sērija, 14.sējums, Rīga, 2006.
9. Jaunzems D. and Rochas C. Development of solar combisystem control algorithm and simulation model // RTU zinātniskie raksti "Enerģētika un elektrotehnika", 5.sērija, 14.sējums, Rīga, 2006.
10. Bulgakova J. and Rochas C. Start-up, testing, and parameter identification of a small scale pellet boiler produced in Latvia // RTU

zinātniskie raksti "Enerģētika un elektrotehnika", 5.sērija, 14.sējums, Rīga, 2006.
11. Žogla G. and Rochas C. Development of solar energy laboratory // RTU zinātniskie raksti "Enerģētika un elektrotehnika", 5.sērija, 14.sējums, Rīga, 2006.
12. Rochas C. and Žandeckis A. Comparative system analysis of solar combisystem system using two different solar tanks integrated in 60x60 cabinets // The 11th International Conference on Solar Energy at High Latitudes. North Sun 2007, Riga, May 30–June 1, 2007.
13. Rochas C. and Žandeckis A. Performance analysis of technical unit for solar combisystem" // RTU zinātniskie raksti "Enerģētika un elektrotehnika", 6.sērija, 14.sējums, Rīga, 2007.
14. Blumberga D., Rochas C., Rošā M., Leja L. and Vītoliņš V. Klimata tehnoloģiju ieviešanas pasākumu izpēte. Latvijas pieredzes analīze // Latvijas Universitātes zinātniskās konferences materiāli, Rīga, 2008.
15. Rochas C. and Rošā M. "The role of laboratory for the development of programs in environmental and energy engineering" // konferences Vides ministrijā "Environmental Science and Education" materiāli, Rīga, 2008.
16. Žandeckis A., Rochas C. Boloņina A. and Blumberga D. Performance analysis of pellet boiler // Starptautiskās zinātniskās RTU - 49.konferences zinātniskie raksti "Tehnogēnās vides aizsardzības zinātniskās problēmas", Rīga, 2008.
17. Žandeckis A., Rochas C., Blumberga D., Boloņina A., Siliņš K. Research of Link between Nitrogen Oxides and Efficiency of Pellet Boilers // RTU zinātniskie raksti "Vides un klimata tehnoloģijas", 13.sērija, 1.sējums, Rīga, 2008.
18. Veidenbergs I., Blumberga D., Rochas C., Blumberga A., Romagnoli F. and Rošā M. Small-scale cogeneration plant data processing and analysis // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences 3, vol. 45. Riga, Latvia. 2008.

Darba struktūra un apjoms

Darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām un secinājumiem. Tajā ir 132 lappuses, t.sk. 91 attēls, 26 tabulas un literatūras saraksts ar 80 literatūras avotiem. Kopsavilkumā nav iekļauts literatūras apskats.

1. Jauna saules enerģijas kombinētās sistēmas koncepcija

Latvijā dzīvojamo ēku apkuri nodrošina galvenokārt centrālapkure un katlu iekārtas, kurās dedzina dabasgāzi un malku vai koksnes granulas, kuru popularitāte pēdējos gados ir pieaugusi. Jaunā saules enerģijas kombinētā sistēma apvienojumā ar šiem enerģijas avotiem tika izstrādāta Dānijā, Zviedrijā un Latvijā. Sistēma tika pielāgota, lai tajā varētu izmantot divus papildu siltuma avotus:

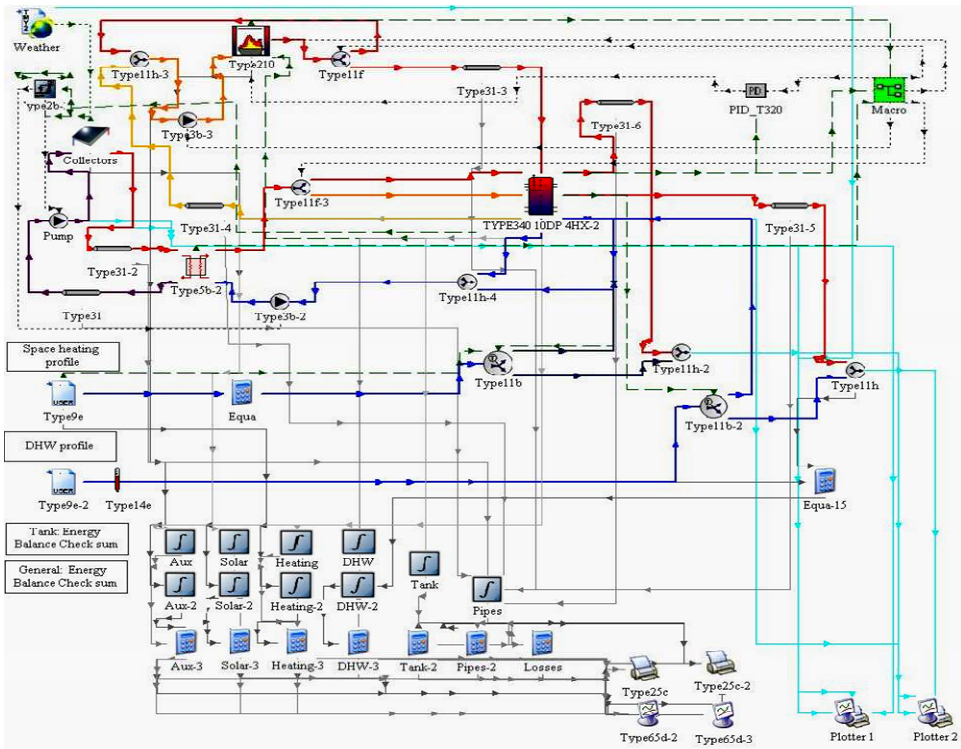
- ātri reaģējošus papildu siltuma avotus, piemēram, dabasgāzes katlu, kam ir nepieciešamas tikai dažas sekundes, lai sasniegtu pilnu siltuma jaudu;
- lēni reaģējošus papildu siltuma avotus, piemēram, koksnes granulu katlu, kam ir nepieciešamas dažas minūtes, lai sasniegtu pilnu siltuma jaudu.

Tomēr sistēmas hidrauliskās koncepcijas ir līdzīgas, izņēmums ir koncepcija, kas izstrādāta lēni reaģējošu siltuma avotu izmantošanai – tai papildus ir pievienota 80 litru akumulācijas tvertne.

Šī jaunā saules enerģijas kombinētās sistēmas struktūra atbilst šādiem robežnosacījumiem:

- saules enerģijas kombinētā sistēma aizņem maz vietas un izskatās pēc vizuāli akceptējamas mājsaimniecības ierīces, un to var uzstādīt dzīvojamajā zonā (gaitenī, vannas istabā utt.);
- sistēmas izveide ir elastīga un ļauj izmantot dažāda veida katlus, dažāda lieluma akumulācijas tvertnes un dažādas saules kolektoru vietas;
- sistēmas koncepcija ir viegli izmantojama dažāda lieluma saules enerģijas sistēmām;
- atbilstoši Latvijas mazajam tirgum un mazajai pieredzei saules enerģijas kombinēto sistēmu jomā sistēmai ir jābūt elastīgai, viegli uzstādāmai un uzturamai;
- sistēmas izmaksām ir jābūt konkurētspējīgām.

Ar TRNSYS datorprogrammas palīdzību modelētas ēkas saules sistēmas datormodifikācija, kura ietver saules kolektorus, to kontūru, akumulācijas tvertni, katlu, ēkas siltumapgādes sistēmu ar apkures un karstā ūdens sistēmu, sūkņus, hidraulisko noslēgarmatūru (piemēram, krānus, maisītājus utt.) un regulēšanas sistēmas (skat.1.attēlu). Izveidotais simulācijas modelis izmantots procesu modelēšanai saules sistēmai kopumā un atsevišķos tās elementos.



1.att. Saules enerģijas kombinētās sistēmas aprēķinu modelis

Bāzes modeli var aprakstīt ar zemāk ilustrēto matemātisko vienādojumu sistēmu:

- tvertne

$$
\begin{aligned}
V_s \cdot \rho_s \cdot c_{p,h2o} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = {} & \zeta_1 \cdot \dot{m}_{sh1} \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{sh,s} - T_{s,sh1}\right) \\
& + \zeta_2 \cdot \dot{m}_{dhw1,hexh} \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{dhw,\,hexh,s} - T_{s,\,dhw1,hexh}\right) \\
& + \zeta_3 \cdot \dot{m}_{b1} \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{b,s} - T_{s,b1}\right) \\
& + \zeta_4 \cdot \dot{m}_{c,hexc} \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{c,hexc,s} - T_{s,hexc,c}\right) \\
& - \left[\begin{array}{l} UA_{s\downarrow,amb} \cdot \left(T_{s\downarrow} - T_{room}\right) \\ + UA_{s\uparrow,amb} \cdot \left(T_{s\uparrow} - T_{room}\right) \\ + \displaystyle\int_{H_s=0}^{H_s} UA_{\bar{s},amb} \cdot \left(T_{s,H_s} - T_{room}\right) dH \end{array} \right]
\end{aligned}
$$

- saules kolektora kontūrs

$$\eta_c = \frac{m_{c,hexh} \cdot c_{p,c} \cdot \left(T_{c,hexh,s} - T_{s,hexh,c}\right)}{A_c I_T}$$

$$T_{s,hexh,c} = T_{c,hexh,s} - \varepsilon_c \cdot \left(\frac{c_{p,h2o}}{c_{p,c}}\right) \cdot \left(T_{c,hexh,s} - T_{s,hexc,c}\right)$$

$$\dot{m}_{c,hexc} = \dot{m}_{c,hexh}$$

$$\left(A_{p,c} \cdot L_{p,c}\right)_j \cdot \rho_c \cdot c_{p,c} \frac{dT_j}{dt} \dot{m}_{c,hexh} = -\left(UA_{p,c}\right)_j \cdot \left(T_j - T_{room}\right)$$

- katla kontūrs

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_f \cdot C_f}{\dot{m}_b \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{b,s} - T_{s,b}\right)}$$

$$T_{s,b} = \frac{\dot{m}_{b1} \cdot T_{s,b1} + \dot{m}_{b2} \cdot T_{b,s}}{\dot{m}_{b1} + \dot{m}_{b2}}$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{b1} + \dot{m}_{b2}$$

$$\left(A_{p,b} \cdot L_{p,b}\right)_j \cdot \rho_s \cdot c_{p,h2o} \frac{dT_j}{dt} \dot{m}_{sh} = -\left(UA_{p,b}\right)_j \cdot \left(T_j - T_{room}\right)$$

- karstā ūdens kontūrs

$$\frac{\dot{m}_{dhw,\ hexh}}{\dot{m}_{dhw1,\ hexh}} = \frac{\left(T_{dhw,\ hexh,\ s} - T_{s,\ dhw1,\ hexh}\right)}{\left(T_{dhw,\ hexh,\ s} - T_{s,\ dhw,\ hexh}\right)}$$

$$T_{s,dhw,hexh} = \frac{\dot{m}_{dwh1,hexh} \cdot T_{s,dhw1,\ hexh} + \dot{m}_{dhw2,hexh} \cdot T_{dhw,\ hexh,s}}{\dot{m}_{dhw1,hexh} + \dot{m}_{dhw2,hexh}}$$

$$T_{dhw,hexh,s} = T_{s,dhw,hexh} - \varepsilon_{dhw} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{dhw,hexc}}{\dot{m}_{dhw,hexh}}\right) \cdot \left(T_{s,dhw,hexh} - T_{dhw,hexc}\right)$$

$$\dot{m}_{dwh,hexh} = \dot{m}_{dhw1,hexh} + \dot{m}_{dhw2,hexh}$$

$$\left(A_{p,dhw} \cdot L_{p,dhw}\right)_j \cdot \rho_s \cdot c_{p,h2o} \frac{dT_j}{dt} \dot{m}_{dhw,hexc} = -\left(UA_{p,dhw}\right)_j \cdot \left(T_j - T_{room}\right)$$

- apkures kontūrs

$$\dot{m}_{sh} = \dot{m}_{sh1} + \dot{m}_{sh2}$$

$$\frac{\dot{m}_{sh}}{\dot{m}_{sh1}} = \frac{\left(T_{sh,s} - T_{s,sh1}\right)}{\left(T_{sh,s} - T_{s,sh}\right)}$$

$$T_{s,sh} = \frac{\dot{m}_{sh1} \cdot T_{s,sh1} + \dot{m}_{sh2} \cdot T_{sh,s}}{\dot{m}_{sh1} + \dot{m}_{sh2}}$$

$$\left(A_{p,sh} \cdot L_{p,sh}\right)_j \cdot \rho_s \cdot c_{p,h2o} \frac{dT_j}{dt} \dot{m}_{sh} = -\left(UA_{p,sh}\right)_j \cdot \left(T_j - T_{room}\right)$$

- saules enerģijas daļas aprēķins un integrēšana

$$\int_0^t \zeta_4 \cdot \dot{m}_{c,hexc} \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{c,hexc,s} - T_{s,c,hexc}\right) \cdot dt \text{, kWh}$$

- palīgiekārtas siltuma ražošanas daļas aprēķins un integrēšana

$$\int_0^t \zeta_3 \cdot \dot{m}_{b1} \cdot c_{p,h2o} \cdot \left(T_{b,s} - T_{s,b1}\right) \cdot dt \text{, kWh}$$

kur:

V_s	tvertnes tilpums, m^3
H_s	tvertnes augstums, m
I_T	globālais uz saules kolektora krītošais starojums, W/m^2
A_c	kopējais kolektora masīva apjoms jeb kopējā platība, m^2
$\dot{m}_{sh1}$	caurplūde no telpu apkures kontūra pārslēga uz tvertni un no tvertnes uz telpu apkures kontūra sajaukšanas vārstu, kg/s
$\dot{m}_{dhw1,hexh}$	caurplūde no karstā ūdens kontūra pārslēga uz tvertni un no tvertnes uz karstā ūdens kontūra sajaukšanas vārstu no siltummaiņa karstās puses, kg/s
$\dot{m}_{b1}$	caurplūde no tvertnes uz katla kontūra sajaukšanas vārstu, kg/s
$\dot{m}_{c,hexc}$	caurplūde no tvertnes uz kolektora kontūra siltummaiņa auksto pusi, kg/s
$\dot{m}_{c,hexh}$	caurplūde no kolektora uz kolektora kontūra siltummaiņa karsto pusi, kg/s
$\dot{m}_b$	caurplūde no katla, kg/s
$\dot{m}_{b2}$	caurplūde no katla sajaukšanas vārsta uz pārslēgu, kg/s

$\dot{m}_{dhw2,\ hexh}$	caurplūde no karstā ūdens kontūra pārslēga uz karstā ūdens kontūra sajaukšanas vārstu pie siltummaiņa karstās puses, kg/s
$\dot{m}_{dhw,\ hexh}$	caurplūde uz karstā ūdens kontūra pārslēgu uz tvertni no siltummaiņa karstās puses, kg/s
$\dot{m}_{dhw,\ hexc}$	caurplūde karstā ūdens kontūrā pie siltummaiņa aukstās puses, kg/s
$\dot{m}_{sh}$	caurplūde telpu apkures kontūrā, kg/s
$\dot{m}_{sh2}$	caurplūde telpu apkures kontūrā no pārslēga uz sajaukšanas vārstu, kg/s
$\dot{m}_f$	kurināmā masas plūsma uz katla kurtuvi, kg/s
ρ_s	šķidruma (ūdens) blīvums tvertnē un ar to tieši savienotajā kontūrā, kg/m^3
ρ_c	šķidruma blīvums kolektora kontūrā, kg/m^3
$c_{p,h2o}$	šķidruma (ūdens) īpatnējā siltumietilpība tvertnē, kJ/kg K
$c_{p,c}$	šķidruma īpatnējā siltumietilpība kolektora kontūrā, kJ/kg K
$\xi_{1,2,3,4}$	kontroles funkcijas
C_f	kurināmā zemākā siltumspēja, kJ/kg
η_c	kolektora efektivitāte
η_b	katla efektivitāte
ε_{dhw}	karstā ūdens kontūra siltummaiņa efektivitāte
ε_c	saules kolektora kontūra siltummaiņa efektivitāte
$T_{sh,s}$	temperatūra no telpu apkures kontūra uz tvertni, K
$T_{s,\ sh1}$	temperatūra no tvertnes uz telpu apkures kontūra sajaukšanas vārstu, K
$T_{dhw,hexh\ s}$	temperatūra no siltummaiņa, kas atrodas aiz karstā ūdens kontūra pārslēga, karstās puses uz tvertni, K
$T_{s,dhw1,hexh}$	temperatūra no tvertnes uz karstā ūdens kontūra siltummaiņa karstās puses sajaukšanas vārstu, K
$T_{b,s}$	temperatūra no katla kontūra T daļas uz tvertni, K
$T_{s,b1}$	temperatūra no tvertnes uz katla kontūra sajaukšanas vārstu, K
$T_{c,hexc\ s}$	temperatūra no kolektora kontūra siltummaiņa aukstās puses uz tvertni, K
$T_{s,c,,hexc}$	temperatūra no tvertnes uz kolektora kontūra siltummaiņa auksto pusi, K
$T_{s,,hexh,c}$	temperatūra no tvertnes pie kolektora kontūra siltummaiņa karstās puses uz kolektoru, K
$T_{c,,hexh,s}$	temperatūra no kolektora pie kolektora kontūra siltummaiņa

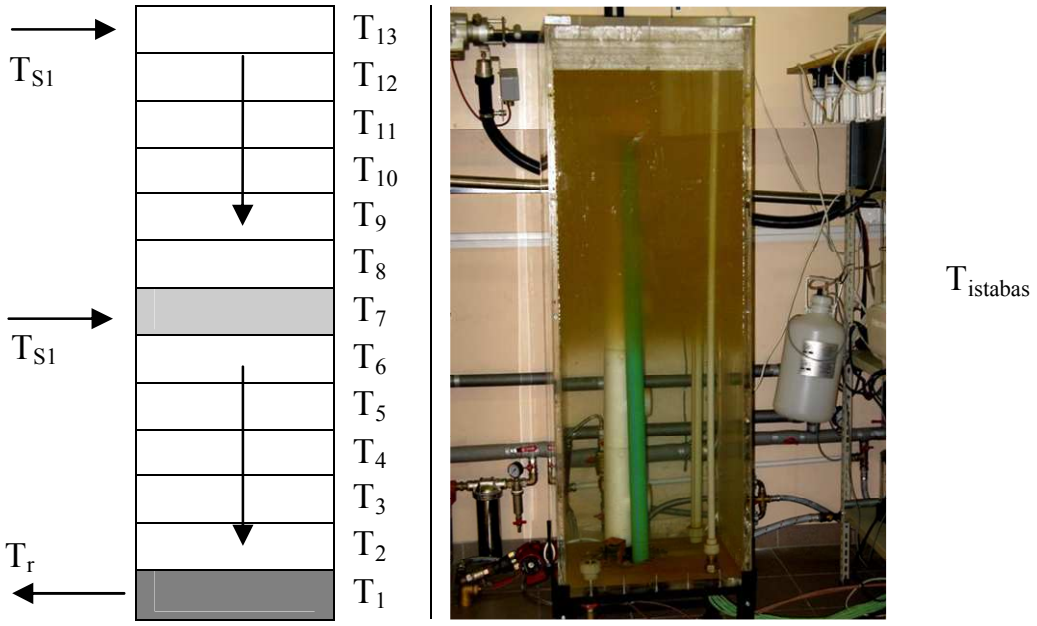
	karstās puses uz tvertni, K
$T_{s,b}$	katla ieejas temperatūra pēc katla kontūra sajaukšanas vārsta, K
$T_{b,s}$	izejas temperatūra no katla uz katla kontūra pārslēgu, K
$T_{s,dhw1,hexh}$	temperatūra no tvertnes uz karstā ūdens kontūra sajaukšanas vārstu pie siltummaiņa karstās puses, K
$T_{s,dhw,hexh}$	temperatūra no karstā ūdens kontūra sajaukšanas vārsta uz karstā ūdens kontūra siltummaiņa karsto pusi, K
$T_{dhw,hexc}$	aukstā ūdens piegādes temperatūra siltumaiņa aukstajā pusē, K
T_{room}	vidējā telpas temperatūra, K
$T_{s,\ sh}$	temperatūra no tvertnes uz telpu apkures kontūru pēc telpu apkures kontūra sajaukšanas vārsta, K
$A_{p,c}$	kolektora kontūra cauruļu šķērsgriezums, m^2
$A_{p,b}$	katla kontūra cauruļu šķērsgriezums, m^2
$A_{p,dhw}$	karstā ūdens kontūra cauruļu šķērsgriezums, m^2
$A_{p,sh}$	telpu apkures kontūra cauruļu šķērsgriezums, m^2
$L_{p,c}$	kolektora kontūra cauruļu garums, m
$L_{p,b}$	katla kontūra cauruļu garums, m
$L_{p,dhw}$	karstā ūdens kontūra cauruļu garums, m
$L_{p,sh}$	telpu apkures kontūra cauruļu garums, m
$UA_{s\downarrow,amb}$	siltuma zudumu indikators tvertnes apakšā, kJ/s K
$UA_{s\uparrow,amb}$	siltuma zudumu indikators tvertnes augšā, kJ/s K
$UA_{s\rightarrow,amb}$	siltuma zudumu indikators tvertnes pārsegumam, kJ/s K
$UA_{p,c}$	siltuma zudumu indikators kolektora kontūra caurulēm, kJ/s K
$UA_{p,b}$	siltuma zudumu indikators katla kontūra caurulēm, kJ/s K
$UA_{p,dhw}$	siltuma zudumu indikators karstā ūdens kontūra caurulēm, kJ/s K
$UA_{p,sh}$	siltuma zudumu indikators telpu apkures kontūra caurulēm, kJ/s K.

2. Saules akumulācijas tvertnes analīze

Siltumenerģijas uzglabāšanas sistēmas apkures nodrošināšanai parasti tiek izmantotas iekārtas, kur enerģijas piegāde ir nevienmērīga, piemēram, saules sistēmas.

Eksperimentālā iekārta tika izstrādāta, lai testētu saules akumulācijas tvertnes, identificētu parametrus un uzlabotu tvertnes siltuma akumulācijas spēju un pētītu stratifikāciju.

Iekārta sastāv no caurspīdīgas tvertnes ar tilpumu 0,375 m^3. Tvertne ir veidota no 20 mm bieza organiskā stikla un sastāv no 6 plātnēm, ko savieno skrūves un dihloretāna līme. Temperatūru izmaiņu noteikšana ilustrēta 2.attēlā.



2.att. Eksperimentālais tanks un temperatūras slāņu pārvietošanās eksperimentu laikā

Akumulācijas tvertņu testēšanai ir nepieciešams noteikts siltumenerģijas daudzums, ko var piegādāt dažādos temperatūras līmeņos un ar nepieciešamo caurplūdumu. Lai izpildītu šīs prasības, laboratorija tika aprīkota ar ātri reaģējošu 25kW elektrisko sildītāju un divām uzglabāšanas akumulācijas tvertnēm. Izveidotais hidrauliskais kontūrs un vadības ierīce ļauj regulēt izejas temperatūru nepieciešamajā līmenī. Tad tika izstrādāta un samontēta virkne hidraulisko kontūru, lai nodrošinātu iespēju dažādību mainīt un iztukšot eksperimentālās tvertnes atkarībā no siltuma avotu un siltuma zudumu dažādības.

Tvertnes testēšanas un eksperimentu analītiskās analīzes veikšanai tika izstrādāta un uzstādīta monitoringa sistēma. Šī monitoringa sistēma sastāv no šādiem elementiem:

- testēšanā izmantotās tvertnes ieejas un izejas temperatūras mērījumiem;
- temperatūras mērījumiem dažādos tvertnes līmeņos (T_4 – T_{13});
- caurplūduma mērījumiem;

- apkārtējās vides temperatūras mērījumiem dažādos līmeņos laboratorijā;
- datu pierakstītāja ar datoru;
- T1-T13 ir termopāra sensori, kas ir ievietoti akumulācijas tvertnē esošajā zondē. Sensors T1 ir novietots 10 cm attālumā no tvertnes apakšas, kamēr T13 atrodas augšpusē, 130 cm attālumā no tvertnes apakšas.

Tika veikti dažādi eksperimenti, lai testētu izveidotās testēšanas iekārtas iespējas un funkcijas. Tika veikti šādi pasākumi:

- virkne testu, lai pārbaudītu un salīdzinātu divus dažādus stratifikatorus dažādos darbības parametros, izmantojot caurspīdīgu tvertni;
- izveidots Makro datormodelis datu apstrādei un termālo stratifikācijas parametru aprēķiniem, balstoties uz savāktajiem eksperimentālajiem datiem, lai salīdzinātu ar teorētiski sliktāko (pilnībā sajauktu) un ideālo gadījumu (perfekti stratificētu) gadījumu;
- veikta stratifikācijas cauruļu darbības efektivitātes analīze, izmantojot sajaukšanas indikatoru (MIX skaitli) un enerģijas momentu vērtības.

Stratifikācijas cauruļu testēšana tika iedalīta 2 galvenajās sērijās ar dažādiem darbības parametriem:

- termiski sajaukta ūdens eksperiments, kur pilnībā sajaukts tvertnes ūdens noteiktā temperatūrā tiek iepildīts tvertnē (1.scenārijs);
- termiski stratificēta ūdens eksperiments, kur stratificēts tvertnes ūdens noteiktā temperatūrā tiek iepildīts tvertnē (2.scenārijs).

Promocijas darba laikā tika veikti vairāki eksperimenti. Kopsavilkumā ir parādīti viena Solvis stratifikatoru testa rezultāti. Šis eksperiments tika veikts ar caurplūduma laiku 2 l/min., un 3.attēlā ir redzamas temperatūras un laiki, kas pierakstīti eksperimenta gaitā.

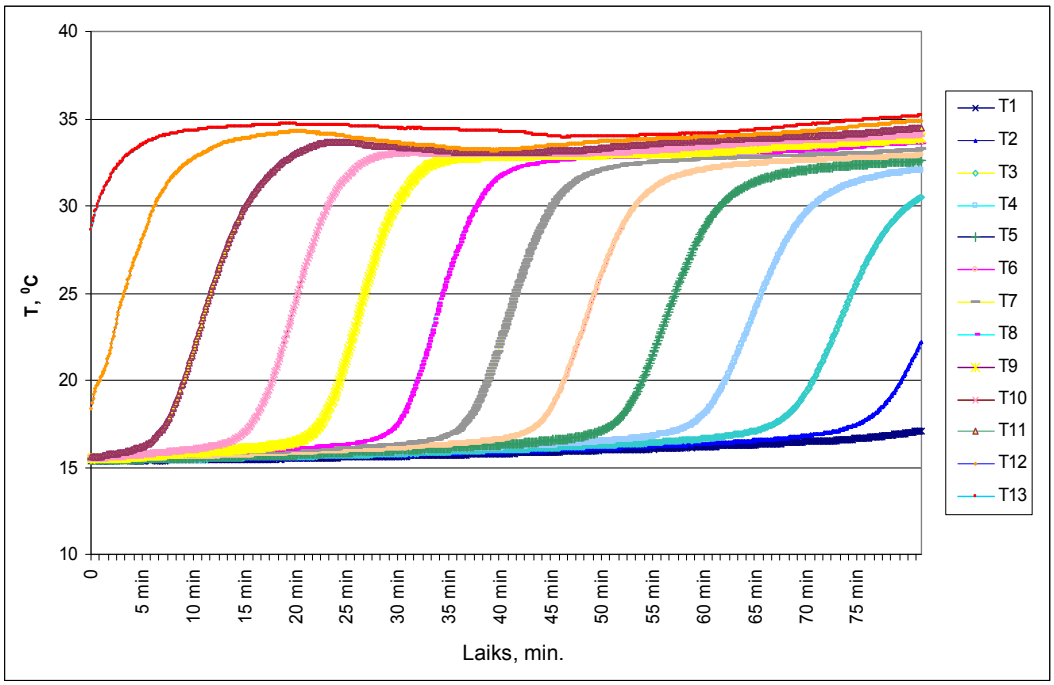
Enerģijas momentu nosaka ar vienādojumu:

$$M_E = \sum_{i=1}^{n} y_t \cdot E_i = \sum_{i=1}^{n} y_t \cdot \rho \cdot \forall_i \cdot c_p \cdot T_i$$

kur:

n	vienādas temperatūras slāņu skaits tvertnē;
y_t	attālums no $\forall_i$ tilpuma i slāņa centra līdz tvertnes apakšai [m];
ρ	ūdens blīvums [kg/m^3];
c_p	ūdens īpatnējais siltums [J/kgK];

T ūdens temperatūra [K].



3.att. Temperatūras, kas pierakstītas stratificētas uzpildes laikā ar caurplūdumu 2 l/min.

Izveidotais Makro datormodelis ļauj modelēt temperatūru sadalījumu ar enerģijas impulsa vērtību izmaiņu prognozēm.

Eksperimentālie dati tika iegūti gan 1., gan arī 2.scenārijam. Eksperimentālie dati liecina, ka, pateicoties Solvis cauruļu izmantošanai, siltuma stratifikācija tvertnē ir atkarīga no caurplūdes un ūdens temperatūrām ievadā.

Tad ar izveidoto Makromodeli tika aprēķinātas enerģijas impulsa izmaiņas reālai temperatūras sadalīšanai eksperimentā, kā arī ideāli stratificētas tvertnes gadījumam un pilnībā sajauktas tvertnes gadījumam. Kā jau bija gaidāms, enerģijas impulsa grafiks mērītajā gadījumā ir pa vidu starp ideāli stratificētas tvertnes un pilnībā sajauktas tvertnes grafiku, kas liecina par siltuma stratifikāciju tvertnē, pateicoties Solvis cauruļu izmantošanai.

MIX skaitlis, kas noteikts ar izveidoto Makro datormodeli, pakāpeniski samazinās līdz 0,3 eksperimenta lokā. Ideāli stratificētai tvertnei MIX skaitlis ir vienāds ar 0. Sajaukšanās kritērijs noteikts ar šādu vienādojumu:

$$MIX = \frac{M_{E\ stratificētais} - M_{E\ reālais}}{M_{E\ stratificētais} - M_{E\ sajaukš.}}$$

kur

$M_{E\ stratificētais}$ termiski stratificēta ūdens summārais enerģijas moments, MJ·m;

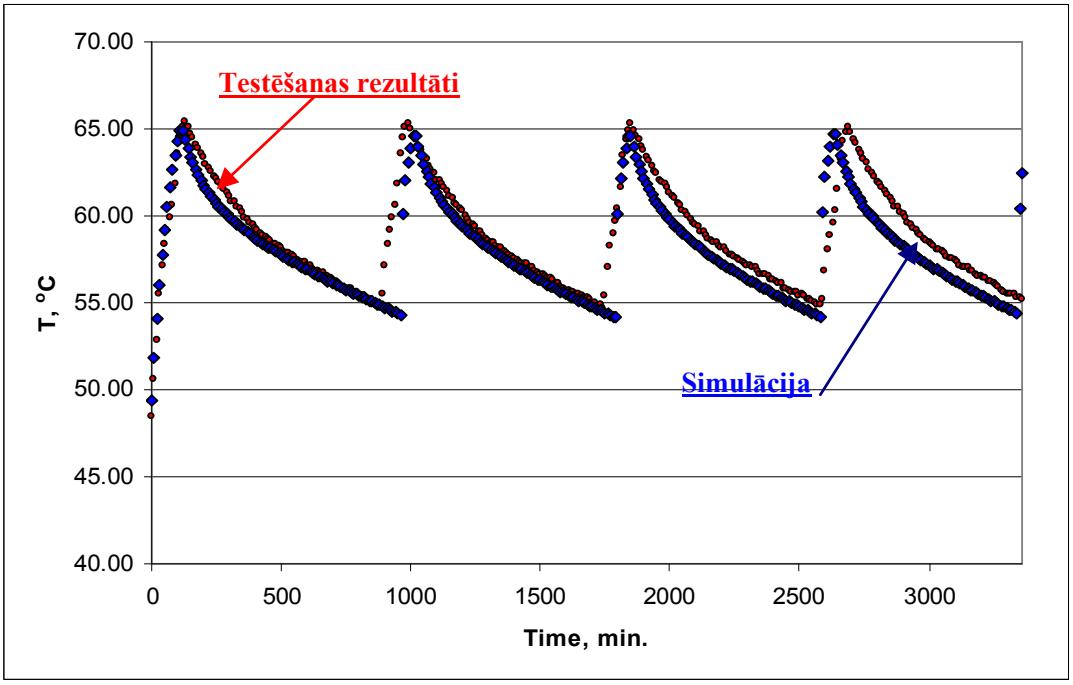
$M_{E\ reālais}$ reālo temperatūru ūdens summārais enerģijas moments, MJ·m;

$M_{E\ sajaukš.}$ termiski sajaukta ūdens summārais enerģijas moments, MJ·m.

Lai uzlabotu šīs standarta tvertnes konstrukciju izmantošanai saules enerģijas kombinētajā sistēmā, tvertnes konstrukcijā tika veiktas izmaiņas. Otrajā tvertnē veikti šādi pārveidojumi:

- tvertnes diametrs tika palielināts par 10 %, tā palielinot tilpumu par 20 %;
- tika izstrādāta jauna kombinētas izolācijas koncepcija, lai palielinātu tvertnes diametru, saglabājot 60x60 ārējo izmēru.

Tvertnes tika testētas laboratorijā, lai identificētu parametrus. To eksperimentālie dati un datorsimulācijas rezultāti eksperimenta piemēram ilustrēti 4.attēlā.



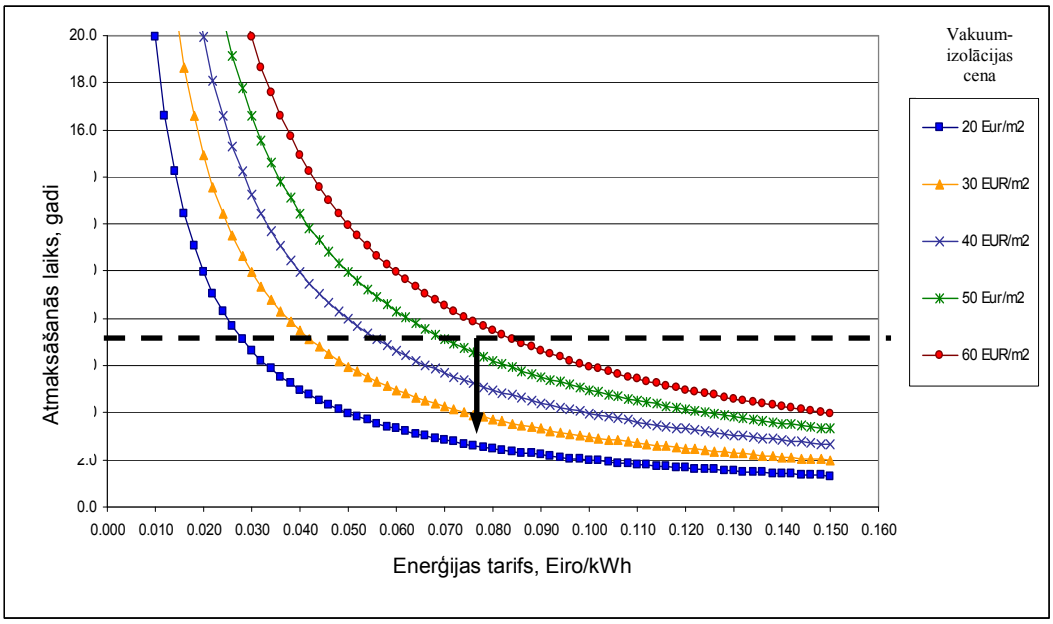
4.att. Eksperimentālo un datorsimulācijas rezultātu salīdzinājums tvertnes eksperimenta piemēram

Rezultātu analīze norāda, ka saules sistēma, kurā izmantota uzlabotā tvertne (23,4 %), ir ar labāku siltuma akumulāciju nekā tā pati sistēma, kurā izmantota standarttvertne (22,4 % solārā frakcija).

Konstruktīvo uzlabojumu ekonomiskā analīze modelēta, ņemot vērā šādus parametrus:

- enerģijas tarifu, eiro/kWh;
- enerģijas ietaupījumus, eiro/gadā;
- vakuuma izolācijas cenu, eiro/m^2.

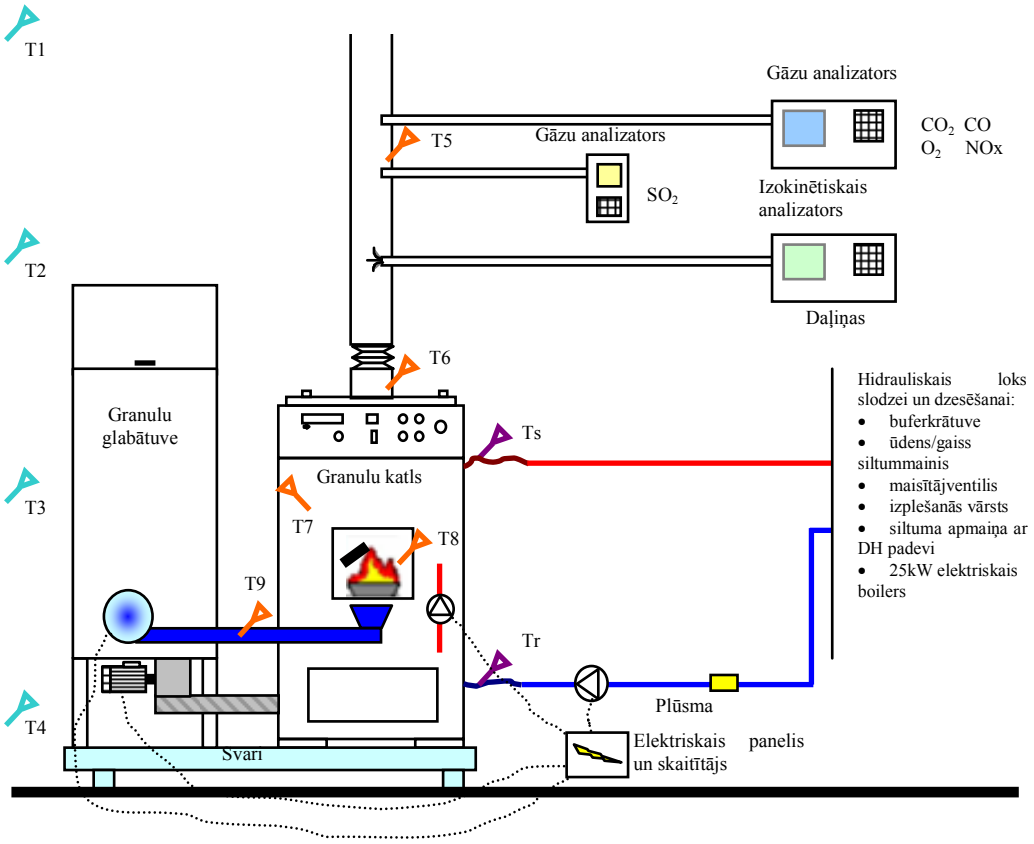
Ekonomiskās analīzes rezultāti ir parādīti 5.attēlā redzamajā grafikā. Diagramma ļauj prognozēt vakuuma izolācijas pieļaujamās izmaksas un tās biezumu atkarībā no enerģijas tarifa un pieļaujamā atmaksāšanās laika.



5.att. Akumulācijas tvertnes uzlabojumu ekonomiskās analīzes diagramma

3. Koksnes granulas kā papildu siltuma avots saules enerģijas kombinētajās sistēmās

Latvijā biomasai ir nopietna loma vienģimenes māju apkurē, it īpaši malkas pagaļu veidā, bet pēdējā laikā arī koksnes granulu veidā. Saules siltuma un granulu apvienojums piedāvā atjaunojamās enerģijas apkures sistēmu, ko var izveidot ar ierobežotām uzturēšanas prasībām.



6.att. Izstrādātā cietā kurināmā katlu eksperimentālā stenda shēma

Promocijas darba ietvaros tika uzstādīts eksperimentālās izpētes stends ar nepieciešamajiem mērinstrumentiem, sensoriem un centralizētu datu savākšanas sistēmu ar programmējamu datu pierakstītāju, lai noteiktu granulu katla vietu un tā īpatsvaru saules enerģijas kombinētās sistēmas darbības laikā, kā arī analizētu katla darbības parametru ietekmi uz efektivitāti, emisijām gaisā, dūmgāzu temperatūru. Eksperimentālās iekārtas shēma ir redzama 6.attēlā. Eksperiments veikts ar granulu katlu, kura jauda ir 15 kW. Eksperimentālās izpētes laikā tika mērīti šādi parametri:

- caurplūde katlā;
- trīs katla ūdens temperatūras (ievadā, izvadā un katlā);
- dūmgāzu temperatūras katla izejā un pie dūmgāzu plūsmas sensora;
- telpas temperatūra 4 dažādos augstumos;
- sadegšanas temperatūra kurtuvē;
- katla karsto virsmu temperatūra °C;
- dūmgāzu sastāvs: skābekļa, oglekļa dioksīda, oglekļa monoksīda, NO_x, SO_2 koncentrācija, mazo daļiņu daudzums;

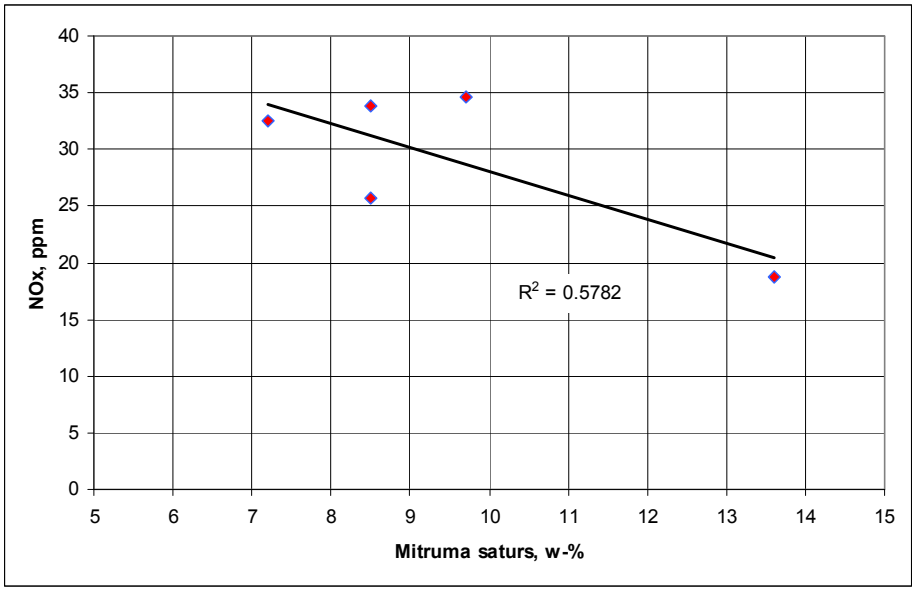
- dinamiskais spiediens skurstenī;
- granulu bunkura un katla svars granulu patēriņa dinamiskiem mērījumiem;
- dzinēju spriegums un strāva (ventilatoram un sūkņiem).

Eksperimentālais stends ir aprīkots ar nepieciešamajiem mērinstrumentiem, lai veiktu arī granulu kvalitātes parametru mērījumus: mitruma saturu, pelnu saturu, smelkni, mehānisko izturību, zemāko siltumspēju, sadegšanas siltumu.

Granulu katla eksperimentālajai izpētei ir vairāki mērķi. Viens no svarīgākajiem ir noteikt neatkarīgo mainīgo vērtības, kas ļauj sasniegt minimālus energoresursu patēriņus. Cits uzdevums ir samazināt elektroenerģijas patēriņu un emisijas gaisā, katlu integrējot saules enerģijas kombinētajā sistēmā.

Lai eksperimentus nākotnē varētu aizstāt ar aprēķiniem un darbības režīmus modelēt ar datoru palīdzību, promocijas darbā izstrādāts modificēts TRNSYS datormodelis granulu katla darbības režīmu datorsimulācijai.

Ieskatam zemāk dots eksperimentālo rezultātu apstrādes piemērs. Pēc mērījumu datu apstrādes var konstatēt, ka ir vērojama slāpekļa oksīdu vidējās koncentrācijas lieluma atkarība no mitruma satura (skat. 7.attēlu).

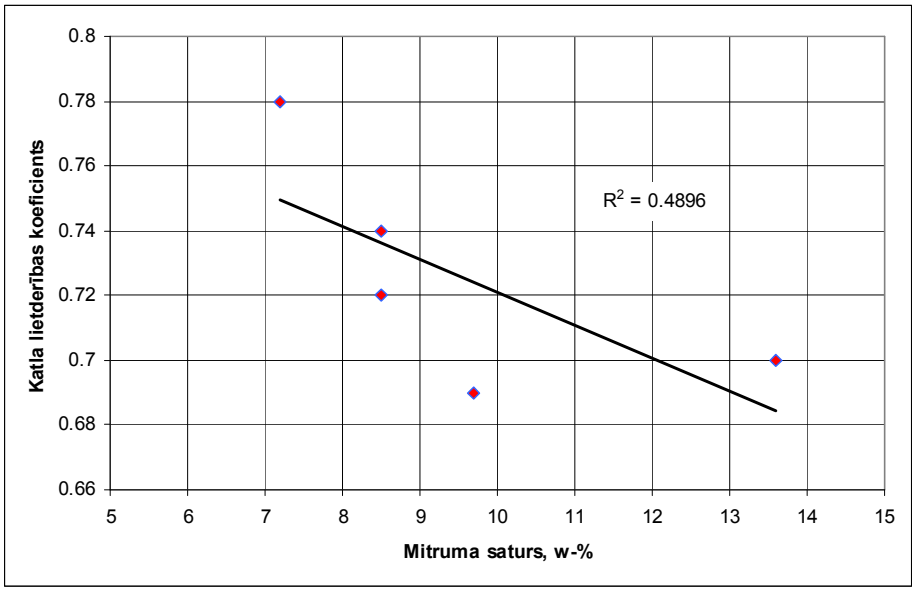


7.att. Korelācija starp mitruma saturu un vidējo NO_x koncentrāciju

Šajā gadījumā var redzēt, ka mitruma saturs granulās daļēji ietekmē slāpekļa oksīdu koncentrāciju dūmgāzēs. Teorētiski lielākais NO_x

daudzums veidojas augstas temperatūras ietekmē, bet, pieaugot mitruma saturam granulās, degšanas temperatūra kurtuvē samazinās.

Taču ir jāpēta arī mitrāku granulu ietekme uz katla energoefektivitāti. Granulu mitruma satura ietekme uz katla darbības efektivitāti ir atspoguļota 8.attēlā. Attēlā var redzēt, ka pastāv korelācija starp mitruma saturu granulās un katla efektivitāti, bet korelācijas noteiktības koeficientam R^2 nav augsta vērtība.



8.att. Granulu mitruma satura ietekme uz katla lietderības koeficientu

Tā kā katla energoefektivitāte ir komplekss lielums, kas ir atkarīgs no daudziem parametriem, korelācijas uzlabošanai ir jāpalielina izejas datu daudzums. To var īstenot, gan izmantojot eksperimentos papildu granulu paraugus, gan testējot papildus jau esošos kurināmā paraugus. Izejot no tā, ka katla darbības rādītāji nav atkarīgi tikai no viena kurināmā parametra, katla darbības analizēšanai papildus ir jāizmanto dati par vairākiem koksnes granulu parametriem.

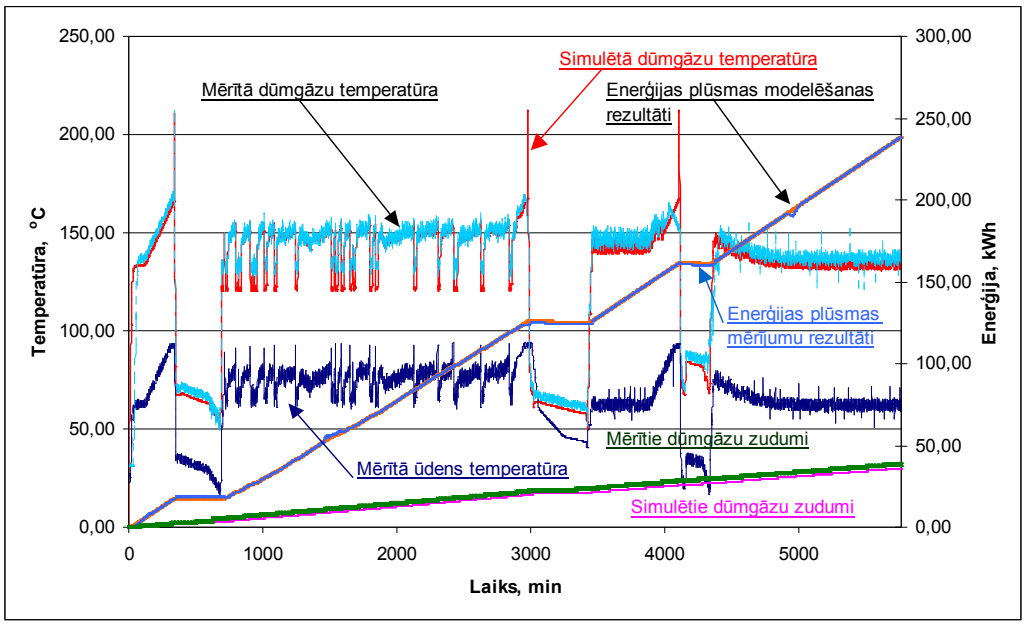
Izpētē tika veikta statistiskā analīze atkarībai starp granulu parametriem un katla darbības energoefektivitāti. Analīzei tika izmantota statistiskā funkcija LINEST, kas spēj izteikt ar regresijas taisnes palīdzību viena parametra atkarību no vairākiem citiem neatkarīgiem parametriem. Aprēķinātās regresijas līnijas R^2 koeficients ir vienāds ar 0,857, kas norāda uz labu korelāciju starp ievadītajiem granulu parametriem un katla efektivitāti.

$$y = -0.0271 \cdot x_1 - 0.0579 \cdot x_2 - 0.0678 \cdot x_3 - 0.1 \cdot x_4 + 2.787 ,$$

kur:

y	katla energoefektivitāte;
x_1	mitruma saturs granulās, w-%;
x_2	pelnu saturs granulās, w-%;
x_3	smalkumu daudzums granulās, w-%;
x_4	granulu zemākais sadegšanas siltums, MJ/kg.

Eksperimentālās izpētes rezultāti salīdzināti ar rezultātiem, kas iegūti ar modificētā TRNSYS simulācijas modeļa palīdzību. Eksperimentālo un simulācijas datu salīdzinājuma piemērs ir redzams 9.attēlā. Kā redzams no datiem 9.attēlā, eksperimentālo un datorsimulācijas datu sakritība ir laba.



9.att. Granulu katla eksperimenta laikā aprēķināto un izmērīto parametru izmaiņas

Izstrādātais datorsimulācijas modelis tika izmantots, lai salīdzinātu divus papildu siltuma avota darbības režīmus:

- pusautomātisko režīmu ar ieslēgšanas un izslēgšanas vadības ierīci;
- automātisko un modulēto režīmu, kur izmantota PID (proporcionāls, integrāls, atvasināts) vadības ierīce.

Pētījumi liecina, ka, izmantojot PID vadības ierīci, izslēgšanas un ieslēgšanas ciklu skaitu var samazināt no 1050 līdz 170 gadā un CO

emisijas var samazināt apmēram par 22,5 kg/gadā. Tas nozīmē, ka PID ir jāizmanto saules enerģijas kombinētajā sistēmā.

4. Saules enerģijas kombinēto sistēmu ekonomiskā optimizācija Latvijā

Izstrādātā jaunā saules enerģijas kombinētās sistēmas koncepcija tika paplašināti analizēta, un īpaši tika izstrādāts ekonomiskās optimizācijas modelis kolektora laukuma un tvertnes tilpuma izvēlei, lai integrētu saules enerģijas kombinētās sistēmas Latvijas klimata apstākļos.

Optimizācijas modeļa mērķis ir identificēt tos parametrus, kas palielina investīciju NPV. Optimizācijas modeļa mērķfunkcija ir aprakstīta ar šādu vienādojumu:

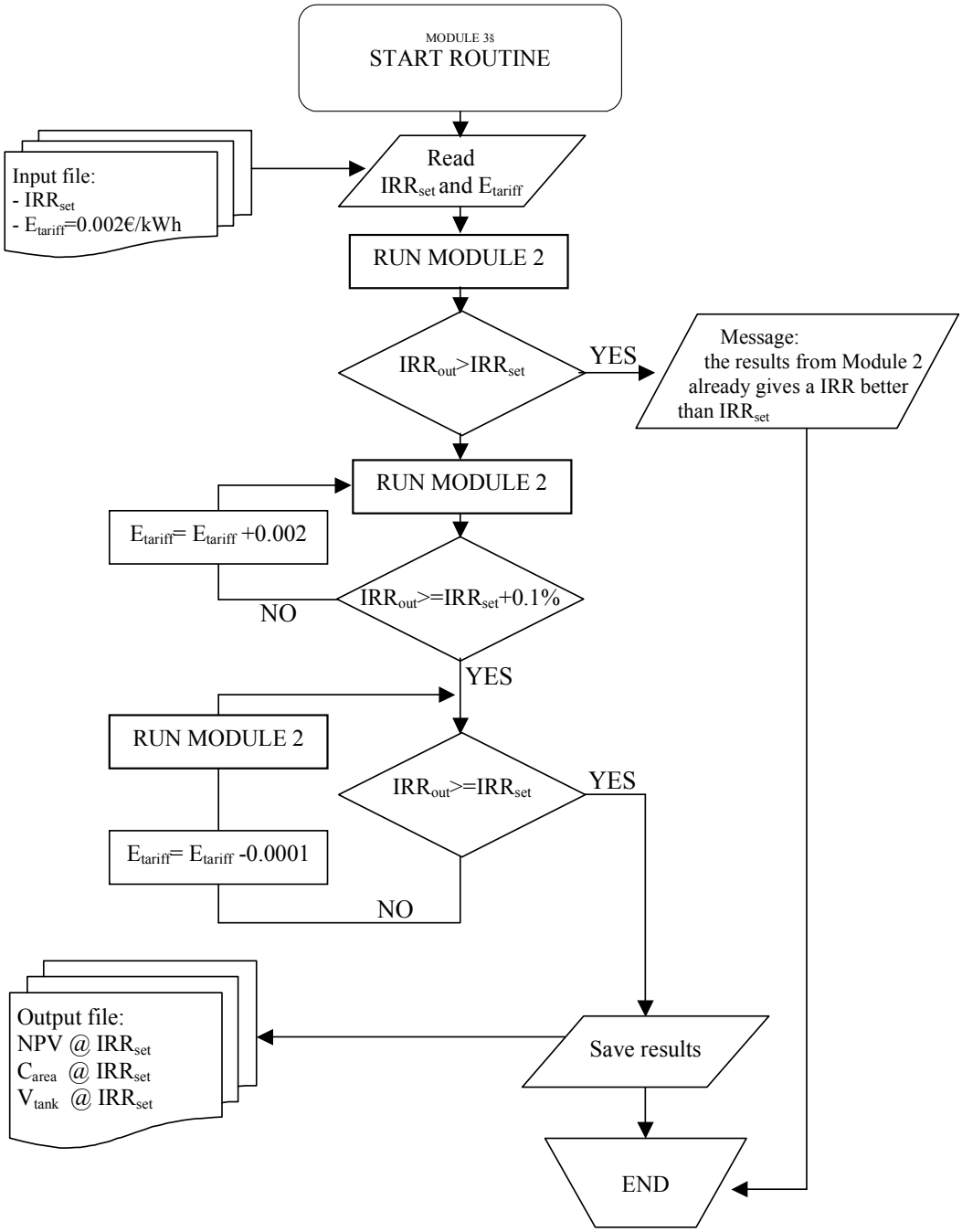
$$\mathrm{NPV} = \sum_{y=1}^{n} \frac{\left[\mathrm{Ta_f} \cdot \mathrm{a_c} \cdot \left(\begin{array}{l} \mathrm{V_s} \cdot \rho_s \cdot c_{p,h2o} \cdot \Delta \mathrm{T} - \\ \int_0^t \zeta_1 \cdot \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{sh1}} \cdot \mathrm{c_{p,h2o}} \cdot \left(\mathrm{T_{sh,s}} - \mathrm{T_{s,sh1}} \right) \mathrm{dt} - \\ \int_0^t \zeta_2 \cdot \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{dhw1,hexh}} \cdot \mathrm{c_{p,h2o}} \cdot \left(\mathrm{T_{dhw,hexh,s}} - \mathrm{T_{s,dhw1,hexh}} \right) \mathrm{dt} - \\ \int_0^t \zeta_3 \cdot \dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{b1}} \cdot \mathrm{c_{p,h2o}} \cdot \left(\mathrm{T_{b,s}} - \mathrm{T_{s,b1}} \right) \mathrm{dt} \end{array} \right) - \right.}{(1+\mathrm{r})^{\mathrm{y}}} \left. \mathrm{Ta_f} \cdot \left(\begin{array}{l} \int_0^t \mathrm{UA_{s\downarrow,amb}} \cdot \left(\mathrm{T_{s\downarrow}} - \mathrm{T_{room}} \right) \mathrm{dt} + \\ \int_0^t \mathrm{UA_{s\uparrow,amb}} \cdot \left(\mathrm{T_{s\uparrow}} - \mathrm{T_{room}} \right) \mathrm{dt} + \\ \int_0^t \int_{\mathrm{H_s}=0}^{\mathrm{H_s}} \mathrm{UA_{\bar{s},amb}} \cdot \left(\mathrm{T_{s,H_s}} - \mathrm{T_{room}} \right) \mathrm{dH\,dt} \end{array} \right) - \mathrm{Ta_e} \cdot \left(\int_0^t P_{\mathrm{p,c}}\, \mathrm{dt} \right) \right]_{\mathrm{y}} - \left[\left(\mathrm{A_c} \cdot \mathrm{Co_c} \right) + \left(V_s \cdot \mathrm{Co_v} \right) + \mathrm{Co_T} + \mathrm{Co_I} \right]$$

kur:

$\mathrm{V_s}$	tvertnes tilpums, $\mathrm{m^3}$
$\mathrm{H_s}$	tvertnes augstums, m
$\dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{sh1}}$	caurplūde no telpu apkures kontūra pārslēga uz tvertni un no tvertnes uz telpu apkures kontūra sajaukšanas vārstu, kg/s
$\dot{\mathrm{m}}_{\mathrm{dhw1,hexh}}$	caurplūde no karstā ūdens kontūra pārslēga uz tvertni un no

	tvertnes uz karstā ūdens kontūra sajaukšanas vārstu no siltummaiņa karstās puses, kg/s
$\dot{m}_{b1}$	caurplūde no tvertnes uz katla kontūra sajaukšanas vārstu, kg/s
ρ_s	šķidruma (ūdens) blīvums tvertnē un ar to tieši savienotajā kontūrā, kg/m^3
$c_{p,h2o}$	šķidruma (ūdens) īpatnējā siltumietilpība tvertnē, kJ/kg K
$\xi_{1,2,3}$	kontroles funkcijas
$T_{sh,s}$	temperatūra no telpu apkures kontūra uz tvertni, K
$T_{s,\ sh1}$	temperatūra no tvertnes uz telpu apkures kontūra sajaukšanas vārstu, K
$T_{dhw,hexh\ s}$	temperatūra no siltummaiņa, kas atrodas aiz karstā ūdens kontūra pārslēga, karstās puses uz tvertni, K
$T_{s,dhw1,hexh}$	temperatūra no tvertnes uz karstā ūdens kontūra siltummaiņa karstās puses sajaukšanas vārstu, K
$T_{b,s}$	temperatūra no katla kontūra T daļas uz tvertni, K
$T_{s,b1}$	temperatūra no tvertnes uz katla kontūra sajaukšanas vārstu, K
T_{room}	vidējā telpas temperatūra, K
$T_{s,\ sh}$	temperatūra no tvertnes uz telpu apkures kontūru pēc telpu apkures kontūra sajaukšanas vārsta, K
$T_{s\downarrow}$:	temperatūra tvertnes apakšā, K
$T_{s\uparrow}$:	temperatūra tvertnes augšā, K
$T_{s,H}$	temperatūra tvertnes malās visā tās augstumā, K
ΔT_s	temperatūras starpība tvertnē laika periodā t=0 līdz t=8760h
$UA_{s\downarrow,amb}$	siltuma zudumu indikators tvertnes apakšā, kJ/s K
$UA_{s\uparrow,amb}$	siltuma zudumu indikators tvertnes augšā, kJ/s K
$UA_{s\rightarrow,amb}$	siltuma zudumu indikators tvertnes pārsegumam, kJ/s K
Ta_f	papildu siltuma avota izmaksas, kas izteiktas €/kWh
Ta_e	elektroenerģijas tarifs, €/kWh
a_c	saules kolektora snieguma degradācija, %/gadā
$P_{p,c}$	papildu sūkņu, kas tiek izmantoti saules enerģijas kombinētā sistēmā, uzstādītā jauda, kW
Co_c	saules kolektora vienības izmaksas, €/m^2
Co_v	tvertnes vienības izmaksas, €/m^3
Co_T	tehniskās vienības izmaksas, €
Co_I	uzstādīšanas un citas izmaksas, €
t	1 gads integrācijas laika, s
n	ekonomiskais dzīves laiks, gadi

$100 \cdot r$ procentu likme, %



10.att. Algoritma trešais modulis

Tika izstrādāts optimizācijas līdzeklis ar trīs moduļiem:

- pirmais modulis ir ikgadējās sistēmas simulācijas veikšanas kārtība, kur saules kolektora laukuma un tvertnes tilpuma parametri tiek

mainīti ar vienības soli to robežlielumu ietvaros. Izejas datne satur datus par saules ieguvumiem un papildu siltumenerģiju. Šis modulis kalpo kā datu ievade otrajā modulī;

- otrais modulis ir ekonomiskās optimizācijas analīzes veikšanas kārtība;
- trešais modulis satur divus inverso aprēķinu algoritmus (skat. 10.attēlu). Pirmajā lietotājs uzstāda nepieciešamo investīciju iekšējās atdeves koeficientu, un iznākums ir šo investīciju NPV un apstākļi, kas nepieciešami tās sasniegšanai. Otrajā algoritmā lietotājs uzstāda noteiktu tvertnes tilpumu, un lineārais interpolārais algoritms strādā ar pirmā moduļa iznākumu, lai noteiktu konkrētajos apstākļos optimālo NPV un kolektoru laukumu.

Saules enerģijas kombinētās sistēmas matemātiskais modelis tika izstrādāts radiālā ceļā, sākot no akumulācijas tvertnes enerģijas bilances, tad paplašinot matemātisko formulu ar masas un enerģijas bilanci līdz pievienotajām apakšsistēmām (papildu siltuma avots, saules kolektors un telpu apkure un karstais ūdens).

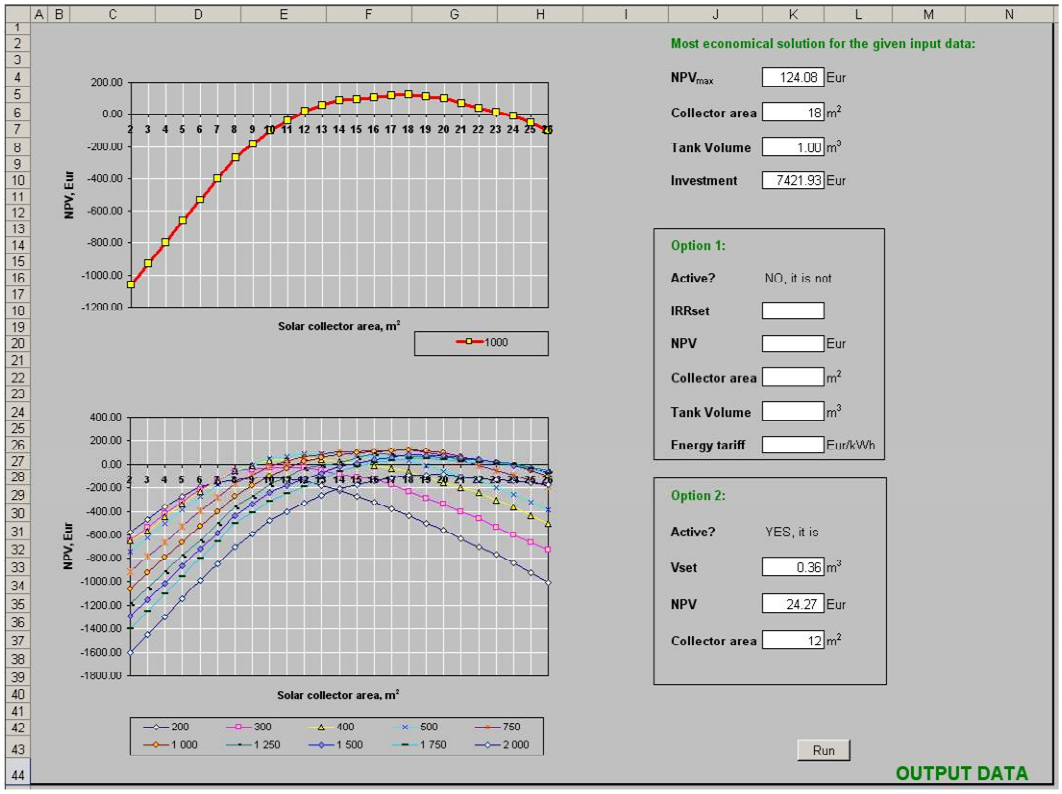
Modelis tika skaitliski risināts TRNSYS, un katru reizi tika aprēķināta saules enerģijas ieguvuma integrācija un papildu enerģijas ražošana. Dati tika saglabāti teksta datnē un pēc tam tika izmantoti kā ieejas dati otrajā modulī.

Otrajam un trešajam modulim tika izstrādāts Excel instruments, ietverot Makromodeli, kas uzrakstīts Visual Basic, lai aprēķinātu NPV (un IRR) kolektora laukuma un tvertnes tilpuma funkcijā. Šie ieejas dati tiek savienoti ar naudas plūsmas analīzes tabulu, no kuras tiek aprēķināti investīciju NPV un IRR.

Makromodelis ir kārtība, kur katrā solī ikgadējā saules ieguvumu vērtība un papildu siltumenerģija tiek ielikta saules kolektoru laukuma un tvertnes tilpuma funkcijā, šie dati nosūtīti uz naudas plūsmas aprēķinu tabulu, NPV un IRR dati tiek paņemti no naudas plūsmas aprēķinu tabulas un nosūtīti uz izejas datnes datu lapu. Šajā izejas datu lapā ir izveidota matrica ar NPV funkcijā no kolektoru laukuma un tvertnes tilpuma. Beigās Makromodelis darbojas ar matricu un nosaka maksimālo NPV un to, kādam kolektoru laukumam un tvertnes tilpumam šīs vērtības radušās. Iznākums ir redzams gan grafiskā formā, gan diagrammā, kur NPV tiek ievietotas funkcijā no kolektoru laukuma un dažādiem uzglabāšanas tilpumiem.

Tad kā ieejas dati ir divas “vēlamās” opcijas, ko ir atrisinājis trešais modulis:

- opcija, lai noteiktu uzglabāšanas tvertnei konkrētu tilpumu (V_{set}). Izmantojot šo opciju, tvertnes tilpums tiek fiksēts un NPV tiek optimizēta tikai funkcijā ar saules kolektoru laukumu. Ja ir izvēlēta šī opcija, Makromodelis aktivē trešo moduli ar papildu lineāru interpolāru kārtību, kas darbojas ar otrā moduļa izveidoto matricu izejas datu Excel lapā. Šī kārtība darbojas ar divām V_{set} tuvākajām augšējām un apakšējām tilpumu vērtībām, kas apzīmētas ar V_1 un V_2, nosaka maksimālo NPV un relatīvo kolektoru laukumu, kas atbilst V_1 un V_2, un veic NPV un saules kolektoru laukuma lineāro aprēķinu, kas atbilst V_{set};
- opcija, lai noteiktu investīciju minimālo IRR. Izmantojot šo opciju, enerģijas tarifs tiek mainīts, kamēr tas atbilst nepieciešamajai IRR vērtībai.



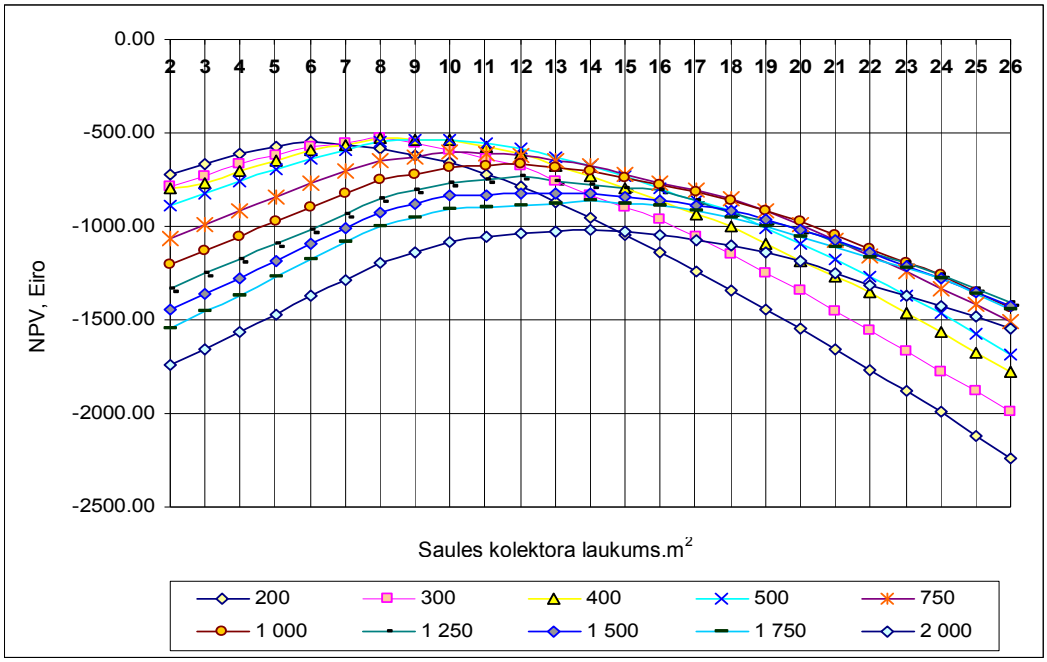
11.att. Excel instrumenta sistēmas ekonomiskai optimizācijai izejas datu saskarne

11.attēlā ir redzama izdrukāta darblapa, kur ir apkopoti un parādīti visi izmantoto līdzekļu iznākumi. Īpaši tiek piedāvātas divas diagrammas. Viena diagramma iezīmē NPV līkni uzstādītā saules kolektoru laukuma funkcijā, lai iegūtu to uzglabāšanas tilpumu, kas būtu labākais ekonomiskais risinājums. Otra diagramma iezīmē NPV līkni ar saules

kolektoru laukumu funkcijā ar dažādiem uzglabāšanas tilpumiem no 0,2m^3 līdz 2m^3. Iznākumu darblapas sniedz arī labāko NPV skaitliskās vērtības, lai noteiktu kolektoru laukumu un uzglabāšanas tilpumu.

Izvēloties pirmo un otro opciju, iznākumu darblapā ir redzami arī rezultāti no Makromodeļa trešā moduļa aprēķiniem.

Optimizācijas līdzekļa vispārīgie rezultāti, kas ņemti no iznākumu darblapas, ir redzami 12.attēlā, kur investīciju NPV ir iezīmēta funkcijā ar saules kolektoru laukumu un uzglabāšanas tilpumu.



12.att. Izstrādātā Excel instrumenta ekonomiskai optimizācijai rezultāti

Instruments piedāvā maksimālas NPV sasniegšanai uzstādīt demonstrācijas mājā sistēmu ar 400 litru akumulācijas tvertni un 8m^2 saules kolektoru laukumu. Tas atbildīs investīcijām 4005 eiro apmērā ar NPV = -526 eiro. NPV ir negatīva, parādot, ka projekts nav izdevīgs. Citiem vārdiem sakot, šis tehniskais risinājums parāda ekonomisko risinājumu, kas samazinās finansiālos zaudējumus.

Lai redzētu, kādos apstākļos projekts kļūs ekonomiski izdevīgs un kura sistēma būtu ieteicama jaunos apstākļos, tika izmantota pirmā opcija, it sevišķi uzstādījums, ka privātpersonai nepieciešamā IRR būtu 6,5 %.

Tomēr līkne kolektoru laukuma robežās starp 7–10 m^2 ir diezgan līdzena, parādot, ka projekts šajās saules kolektoru robežās dos aptuveni

tos pašus ekonomiskos rezultātus. Šajā aspektā risinājums ir uzstādīt kolektorus 8–11 m^2 lielā laukumā, nodrošinot ekonomiskos rādītājus tuvu optimālajam risinājumam.

Šajā gadījumā ekonomiskais līdzeklis ar aprēķiniem piedāvāja tehnisko risinājumu, kas ietver 24 m^2 saules kolektoru laukumu un 1,8 m^3 akumulācijas tvertni. Šim risinājumam ir nepieciešamas investīcijas 9023 eiro apmērā ar pozitīvu NPV 777 eiro. Šis izejas risinājums ir sasniegts, ja šodienas enerģijas cenas papildu siltuma avotam būtu 0,1286 eiro/kWh, kamēr, piemēram, Latvijā elektrības cenas pašreiz ir 0,1025 eiro/kWh.

Secinājumi

1. Promocijas darba ietvaros ir izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta Latvijas apstākļiem piemērotas saules enerģijas kombinētās sistēmas struktūra. Ir izveidota un eksperimentāli pārbaudīta struktūrai atbilstoša saules enerģijas kombinētā sistēma. Eksperimentālā izpēte veikta arī atsevišķiem sistēmas elementiem.
2. Darbā ir veikta izveidotās saules enerģijas kombinētās sistēmas darbības režīmu simulācija, šim nolūkam izmantojot modificētu TRNSYS modeli. Modelēšanas un eksperimentālās izpētes rezultātu analīze liecina, ka tie labi korelē un TRNSYS modeļa modifikācija veikta korekti, un tas lietojams līdzīgu saules enerģijas kombinēto sistēmu darbības analītiskajā izpētē.
3. Darbā veikta saules enerģijas kombinētās sistēmas akumulācijas tvertnes stratifikācijas eksperimentāla izpēte. Eksperimentālo datu apstrādei izveidots speciāls Makro datormodelis, ar kura palīdzību nosaka sajaukšanās indikatora un enerģijas momentu vērtības un salīdzina tās ar robežgadījumiem. Noskaidrots Latvijas apstākļiem piemērotākais (Solvis) stratifikators. Slāņu temperatūras izmaiņu mērījumiem izveidota oriģināla termozonde, uz kuru iesniegts patentēšanas pieteikums. Stratifikācijas izpētes rezultāti izmantoti akumulācijas tvertnes darbības režīmu simulācijai ar TRNSYS modeli un optimālās konstrukcijas izvēlei.
4. Granulu katla eksperimentālā izpēte rāda, ka vērojamas būtiskas CO emisijas tā palaišanas un apturēšanas laikā. Šādi režīmi ir bieži sastopami, ja katlu darbina ieslēgts/izslēgts režīmā. Kā rāda katla darbības simulācijas ar TRNSYS modeli rezultātu analīze, emisijas var būtiski samazināt, uzstādot PID regulatoru. Izpēte rāda, ka PID

regulatora izmantošanas gadījumā Latvijas apstākļos par aptuveni 80 % samazinās arī katla ieslēgšanas/izslēgšanas ciklu skaits.

5. Promocijas darba ietvaros ir izveidota un aprobēta granulu kvalitātes parametru testēšanas iekārta. Testēšanu veic atbilstoši standarta CEN prasībām. Testēšanas rezultātu kvalitāte pārbaudīta, salīdzinot ar Somijā testētu granulu paraugu parametriem. Granulu kvalitātes testēšanas rezultāti izmantoti granulu katla eksperimentālā pārbaudē ievadītās kurināmā enerģijas noteikšanai.
6. Darba ietvaros ir izstrādāts Latvijas laika apstākļiem adaptēts ekonomiskais optimizācijas modelis. Modelis ir izveidots, lai palielinātu investīciju, kas nepieciešamas saules enerģijas kombinētās sistēmas uzstādīšanai, tagadējo vērtību, un tas sniedz saules kolektoru platības un tvertnes tilpuma optimizētās vērtības.

Klaudio Rošā

Saules enerģijas kombinēto sistēmu eksperimentālā izpēte. Optimizācija

Promocijas darba kopsavilkums