

# **RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

## **Toms Prodanuks**

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorants

# **SILTUMAPGĀDES ILGTSPĒJAS INDIKATORI VIRZĪBĀ UZ KLIMATNEITRALITĀTI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskās vadītājas:

profesore *Dr. habil. sc. ing.*  
DAGNIJA BLUMBERGA

profesore *Dr. sc. ing.*  
MARIKA ROŠĀ

RTU Izdevniecība  
Rīga 2021

Prodaņuks, T. Siltumapgādes ilgtspējas indikatori virzībā uz klimatneitralitāti. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2021. gada 9. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 136.

**<https://doi.org/10.7250/9789934226298>**  
**ISBN 978-9934-22-629-8 (pdf)**

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 17. jūnijā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. ing. Stefan Holler*,  
*HAWK* lietišķo zinātņu un mākslas universitāte, Vācija (Getingene)

Profesors *Dr. sc. ing. Ritvars Sudārs*,  
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing. Edmunds Teirumnieks*,  
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, Latvija

## APSTIPRINĀJUMS

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

Toms Prodanuks.....(paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 29 attēli, 15 tabulu, viens pielikums, kopā 154 lappuses. Literatūras sarakstā ir 88 atsauces.

# SATURS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IEVADS .....                                                                        | 5  |
| Tēmas aktualitāte.....                                                              | 6  |
| Promocijas darba mērķis un uzdevumi .....                                           | 6  |
| Promocijas darba zinātniskās novitātes .....                                        | 7  |
| Izvirzītā hipotēze .....                                                            | 8  |
| Praktiskā vērtība .....                                                             | 8  |
| Darba struktūra .....                                                               | 8  |
| Promocijas darba zinātniskā aprobācija .....                                        | 9  |
| 1. METODIKAS .....                                                                  | 13 |
| 1.1. Iekārtu efektivitātes indikatori un analīze .....                              | 13 |
| 1.2. Regresijas analīze .....                                                       | 15 |
| 1.3. Daudzkritēriju analīze lēmumu pieņemšanai .....                                | 17 |
| 1.4. Emerģijas indikatoru modelis.....                                              | 18 |
| 2. REZULTĀTI .....                                                                  | 20 |
| 2.1. Siltumenerģijas ražošanas efektivitātes aprēķina rezultāti .....               | 20 |
| 2.2. Regresijas analīze .....                                                       | 21 |
| 2.3. Ekonomisko indikatoru analīzes rezultāti siltumenerģijas lietotāja līmenī..... | 25 |
| 2.4. Daudzkritēriju analīzes rezultāti.....                                         | 27 |
| 2.5. Emerģijas indikatoru modelis.....                                              | 28 |
| 2.6. Diskusija par pašvaldību energopārvaldības potenciālu .....                    | 29 |
| SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI .....                                                    | 31 |
| LITERATŪRAS SARAKSTS .....                                                          | 33 |

## IEVADS

Eiropas Savienība ir noteikusi mērķi 2050. gadā sasniegt klimatneitralitāti, kas paredz nodrošināt ekonomiku ar nulles neto SEG emisijām. Šī mērķa sasniegšanai ES ir apstiprinājusi Eiropas Zaļo kursu, kas ietver darbības plānu, lai paātrinātu efektīvu resursu izmantošanu, virzoties uz aprites ekonomiku, atjaunotu bioloģisko daudzveidību un samazinātu piesārņojumu. Pāreja uz klimatneitralitāti ir neatliekama un piedāvā iespēju veidot labāku nākotni. Lai sasniegtu klimatneitralitāti, visām sabiedrības grupām un visiem ekonomikas sektoriem ir jāsniedz savs pienesums [1].

Eiropas Zaļais kurss ir ES izaugsmes stratēģija, kas paredz sasniegt taisnīgu un pārticīgu sabiedrību, uzlabojot tās dzīves kvalitāti. Šis kurss ietver mūsdienīgas, konkurētspējīgas un resursefektīvas ekonomikas izveidi. Eiropadomes Stratēģiskā programma 2019.–2024. gadam kā vienu no savām prioritātēm definējusi “veidot klimatneitrālu, zaļu, taisnīgu un sociālu Eiropu”, kas prasīs ievērojamas izmaiņas tiesību aktos un privātā un publiskā sektora ieguldījumus [2], [3].

Viens no Eiropas Zaļā kursa uzdevumiem ir nodrošināt tīru, pieejamu un drošu enerģiju. Enerģētikas sektora attīstība jānodrošina, balstoties uz atjaunojamajiem energoresursiem, pārtraucot ogļu izmantošanu un īstenojot gāzes dekarbonizāciju. Vienlaikus kā prioritāte ir jānosaka enerģētikas sektora energoefektivitāte. Atjaunojamo resursu, energoefektivitātes un citu ilgtspējīgu risinājumu ieviešana dažādos sektoros palīdzēs sasniegt dekarbonizācijas mērķus ar viszemākajām izmaksām. Ievērojams atjaunojamo resursu izmantošanas izmaksu samazinājums kopā ar dažādiem atbalsta mehānismiem jau ir palīdzējis mazināt radītās SEG emisijas. Tas apliecina, ka īstenotās politikas ir bijušas veiksmīgas, tāpēc jāturpina darbs, lai sasniegtu klimatneitralitāti [4], [5].

Jaunas tehnoloģijas, ilgtspējīgi risinājumi un inovācijas ir ļoti svarīgas Eiropas Zaļā kursa mērķu sasniegšanai. ES ir ievērojami jāpalielina jaunu tehnoloģiju izstrāde un demonstrēšana visos ekonomiskajos sektoros, radot jaunas inovatīvas sadarbības ķēdes. Eiropas Zaļā kursa ieviešanas process paredz arī sadarbību klimata jomā starp universitātēm, institūtiem un uzņēmumiem [6].

Siltumapgādes sektoram kā daļai no enerģētikas sektora ir liela loma ES klimatneitralitātes mērķu sasniegšanā. Energoefektivitātes pasākumi enerģijas patērētāju un ražotāju pusē uztverami kā vienlīdz svarīgi. ES ir izvirzījusi uzdevumu samazināt enerģijas patēriņu lietotāju pusē, būtiski palielinot centralizētās siltumapgādes sistēmas lomu, raugoties caur atjaunojamo energoresursu izmantošanas un energoefektivitātes prizmu. Latvijā būtiska loma paredzēta atjaunojamo energoresursu izmantošanai gan centralizētajās siltumapgādes sistēmās, gan lokālajās apkures sistēmās. To paredzēts īstenot, ieviešot jaunas inovatīvas siltumenerģijas ražošanas tehnoloģijas un metodes. Lai sasniegtu šos mērķus, nepieciešama visu iesaistīto pušu – valsts, pašvaldību, uzņēmumu, augstāko izglītības iestāžu un sabiedrības – līdzdarbība [7].

## **Tēmas aktualitāte**

Siltumenerģijas ražošanas efektivitātes paaugstināšana un patēriņa samazināšana tiek uzskatīta par vienu no galvenajiem līdzekļiem ES klimata un enerģētikas mērķu sasniegšanai līdz 2030. gadam, kas paredz vismaz 40 % SEG emisiju samazinājumu, kā bāzes scenāriju izmantojot 1990. gadu, vismaz 32 % atjaunojamās enerģijas īpatsvaru un energoefektivitātes paaugstināšanu par 32,5 %. Atbilstoši ES klimata un enerģētikas politikai ir izstrādāts Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam, kurā noteiktie nacionālie mērķi un galvenie rīcības virzieni tieši vai pastarpināti ir saistīti ar siltumenerģijas ražošanas efektivitātes paaugstināšanu un patēriņa samazināšanu, izmantojot atjaunojamo enerģiju [7].

Latvijas virzība uz klimatneitralitāti līdz 2050. gadam Eiropas Zaļā kursa ietvaros paredz OMA procesa īstenošanu, kas ietver SEG emisiju samazināšanu visos tautsaimniecības sektoros un CO<sub>2</sub> piesaistes palielināšanu. Enerģētikas sektors ir vislielākais SEG emisiju avots Latvijā, tāpēc būtiskas rīcības būs nepieciešamas siltumenerģijas ražošanas un patēriņa jomā [8].

Lai sasniegtu ES un Latvijas nacionālos mērķus SEG emisiju samazināšanā, atjaunojamās enerģijas īpatsvara palielināšanā un energoefektivitātes paaugstināšanā, jāveic esošās situācijas mērķanalīze, izmantojot dažādas metodikas, un jāsniedz konkrēti priekšlikumi siltumenerģijas ražotājiem, patērētājiem un politikas veidotājiem.

## **Promocijas darba mērķis un uzdevumi**

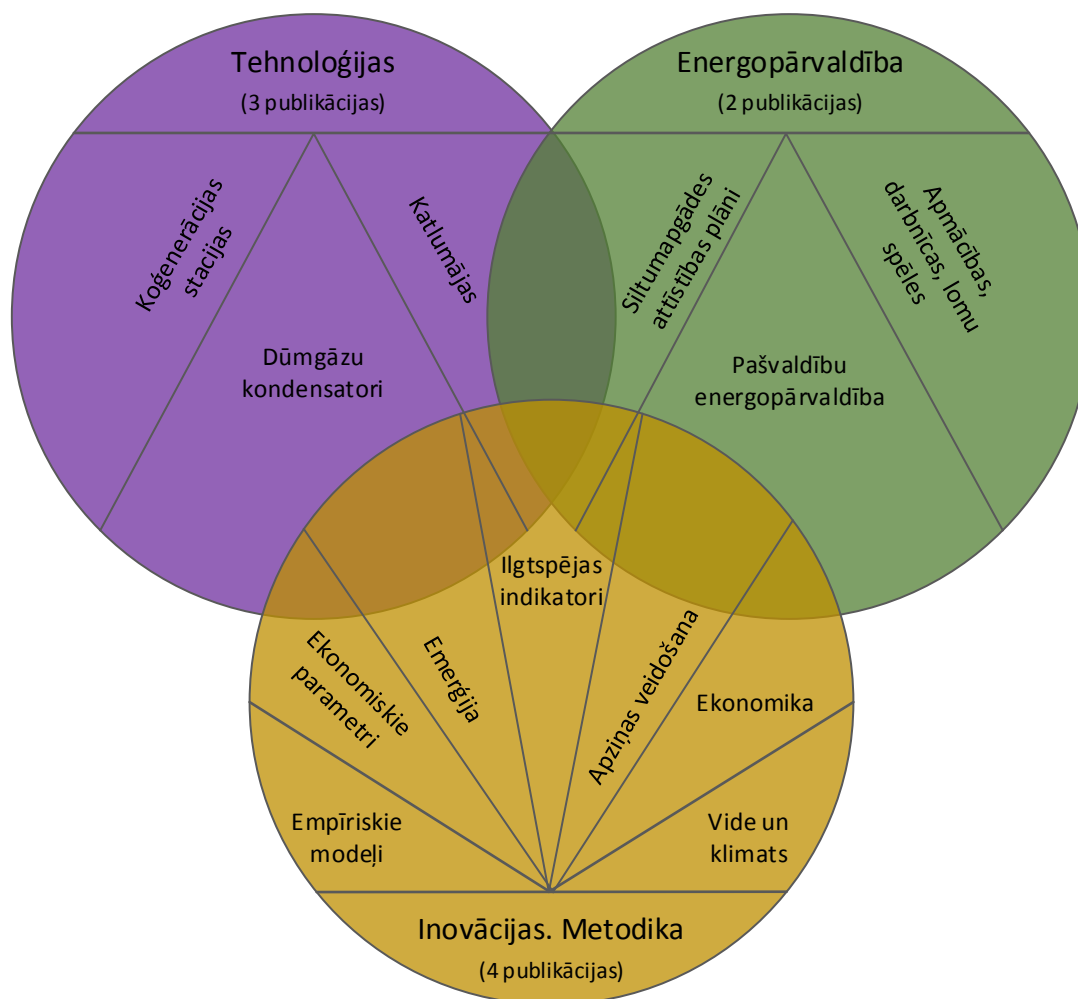
Šī promocijas darba mērķis ir novērtēt Latvijas siltumapgādes sistēmu, izmantojot ilgtspējas indikatorus, ietverot siltumenerģijas ražotājus un patērētājus, kā arī sniegt priekšlikumus par metodikām, kas izmantojamas siltumapgādes sistēmas efektivitātes paaugstināšanai un SEG emisiju samazināšanai, liekot uzsvāru uz atjaunojamo enerģijas resursu izmantošanu.

Lai sasniegtu mērķi, darbā veikti šādi uzdevumi:

- 1) analizēts siltumenerģijas ražošanas efektivitātes aprēķins, vērtējot trīs dažādus aprēķina veidus, par pamatu ņemot dūmgāzu kondensatora darbību;
- 2) veikta siltumenerģijas ražošanas iekārtu divu un vairāku faktoru regresijas analīze, novērtējot to parametru ietekmi uz sistēmas darbību;
- 3) izstrādāts empīrisks aprēķina modelis dūmgāzu kondensatora darbības optimizācijai, nosakot statistiski nozīmīgus to ietekmējošos parametrus;
- 4) veikts lokālo siltumenerģijas ražošanas iekārtu ekonomisko parametru novērtējums, liekot uzsvāru uz saules kolektoru izmantošanu;
- 5) veikta centralizētās siltumapgādes sistēmas attīstības daudzkritēriju analīze, izmantojot *TOPSIS* metodi;
- 6) analizēta koģenerācijas stacija, izstrādājot enerģijas aprēķina modeli un nosakot enerģijas ilgtspējas indikatorus;
- 7) piedāvāta metodika pašvaldības centralizētās siltumapgādes attīstības plāna izstrādāšanai energopārvaldības kontekstā.

## Promocijas darba zinātniskās novitātes

Promocijas darbā izstrādāts dažādu tehnoloģiju un metožu izvērtējums, kas piedāvā kompleksus risinājumus siltumenerģijas ražotāju energoefektivitātes paaugstināšanai. Zinātniskās izpētes pamatā ir dažādu metodiku piemērošana, lai, izmantojot dažādus indikatorus, izvērtētu siltumenerģijas ražošanas iekārtu ekoeftektivitāti. Promocijas darbs ir balstīts uz trīskāršās spirāles pieejas izmantošanu enerģētikas sektorā, ietverot dažādus indikatorus, metodes un līmeņus.



1. att. Promocijas darba metodiskā pieeja.

Darbā apskatītas un izmantotas vairākas metodes (salīdzinošās analīzes, statistikas datu apstrādes, eksperimentālo datu apstrādes) siltumenerģijas ražošanai un izmantošanai dažādos līmeņos (tehnoloģisko procesu, pašvaldību energoapgādes u. c.) izpētei. Demonstrēts arī dažāds analīzes metožu un indikatoru lietojums, balstoties uz principu “no vienkāršākā (statistikas datu vākšana un apstrāde) uz sarežģītāko (ilgtspējas indikatora noteikšanas metodikas izveides)”. Izveidots arī energoavota emerģijas indikatora modelis, kas apbēts biomasas koģenerācijas stacijas darbības analīzei. Vairāki ilgtspējas indikatori apskatīti koģenerāciju staciju kontekstā, izmantojot enerģijas un emerģijas analīzes metodes. Emerģijas analīzes metode apskatīta koģenerācijas stacijas robežās, analizējot tās piedāvātos indikatorus

dažādiem stacijas darbības režīmiem. Darba izstrādes gaitā, izmantojot eksperimentālos datus, izveidots aktīvā tipa dūmgāzu kondensatora siltuma un masas pārvades aprēķina empīriskais modelis. Novērtēts tieša tipa dūmgāzu kondensatora jaudas pieaugums kontekstā ar potenciāli ceturtās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas siltumnesēju temperatūru. Izstrādāts dūmgāzu kondensatora efektivitātes aprēķina algoritms, salīdzinot teorētiskās un praktiskās energoefektivitātes vērtības. Izveidota metodika pašvaldību siltumapgādes energoplānu izstrādei, ietverot ilgtspējas indikatoru analīzi. Metodika aprobēta, izstrādājot pašvaldības siltumapgādes attīstības plānu.

### **Izvirzītā hipotēze**

Latvijas virzība uz klimatneitralitāti, Eiropas Zaļā kursa ietvarā paaugstinot siltumenerģijas ražošanas un patēriņa efektivitāti un atjaunojamo energoresursu īpatsvaru, vērtējama ar siltumapgādes ilgtspējas indikatoriem.

### **Praktiskā vērtība**

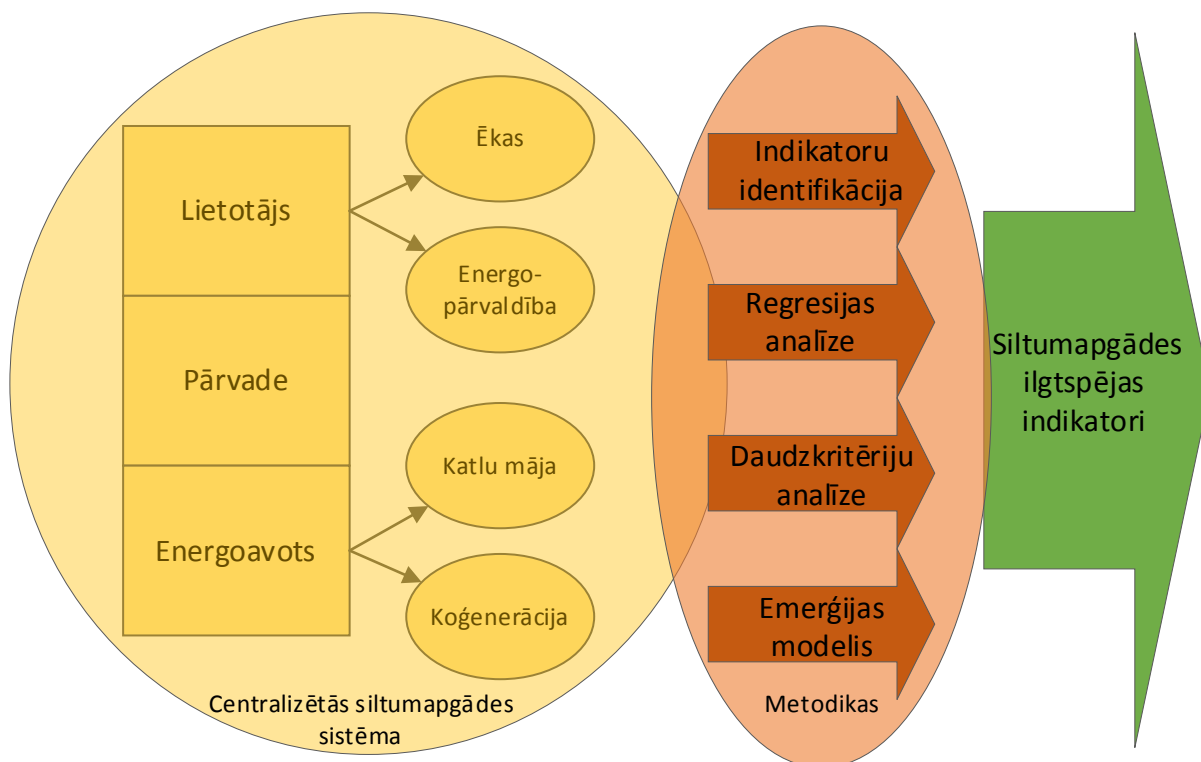
Promocijas darbā gūtie secinājumi un atziņas ir noderīgi Latvijas siltumenerģijas ražošanas un patēriņa energoefektivitātes paaugstināšanas procesā, ņemot vērā noteiktos klimata un enerģētikas mērķus un potenciālos mērķus ceļā uz klimatneitralitāti 2050. gadā.

Promocijas darbā apskatītie indikatori un metodikas valsts līmenī ļauj noteikt siltumapgādes sistēmas attīstības virzību uz klimatneitralitāti. Pašvaldībām izstrādāta metodika energopārvaldības ieviešanai siltumapgādes jomā, sniedzot konkrētu darbības algoritmu sadarbībai ar centralizētās siltumapgādes sistēmas operatoru. Siltumenerģijas ražošanas uzņēmumiem, tostarp CSA sistēmas operatoriem, sniegta metodika un indikatori, lai izvērtētu tehnoloģiju piemērotību, efektivitāti un ekonomiskos rādītājus. Siltumenerģijas lietotāju līmenī izvērtēti lokālie siltumenerģijas avoti. Izstrādātās metodikas ļauj vērtēt visas siltumapgādes sistēmas ilgtspēju.

### **Darba struktūra**

Darbs balstīts uz deviņām tematiski saistītām zinātniskajām publikācijām, kas aptver siltumapgādes sistēmu no enerģijas ražošanas līdz enerģijas galapatērētājam.

Darbā apskatīta siltumapgādes sistēma, ietverot energoavotu un lietotāju analīzi. Izmantojot dažādas metodikas (regresijas analīzi, daudzkritēriju analīzi un enerģijas modeli), analizēti siltumapgādes sistēmas atsevišķi komponenti: koģenerācijas sistēmas, katlumāju darbība, energopārvaldības ieviešana un ēkas. Veikto analīžu rezultātā iegūti siltumapgādes ilgtspējas indikatori, kas ļauj izvērtēt visu siltumapgādes sistēmu.



2. att. Promocijas darba struktūra.

## Promocijas darba zinātniskā aprobācija

### Zinātniskās publikācijas par promocijas darba tēmu

1. Prodaņuks, T., Cimdiņa, G., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Sustainable Development of Biomass CHP in Latvia. Energy Procedia, 2016, vol. 95, 372.–376. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2016.09.026 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).
2. Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Cimdiņa, G., Mohannad, S., Blumberga, D. Emergy Analysis of Biomass CHP. Case Study. Energy Procedia, 2016, Vol. 95, 366.–371. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2016.09.024 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).
3. Cimdiņa, G., Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Review-Based Emergy Analysis of Energy Production. No: Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, Latvija, Rēzekne, 18.–20. jūnijs, 2015. Rēzekne: Rēzeknes Augstskola, 2015, 85.–91. lpp. ISBN 978-9984-44-172-6. ISSN 1691-5402. e-ISSN 2256-070X. Pieejams: doi:10.17770/etr2015vol2.629 (Indeksēts SCOPUS).
4. Prodaņuks, T., Vītoliņš, V., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Comparison of Theoretical and Practical Energy Efficiency Values in Indirect Contact Gas Condensing Unit. Energy Procedia, 2017, Vol. 128, 520.–524. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.072 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).

5. Vīgants, E., Prodaņuks, T., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Modelling of Technological Solutions to 4th Generation DH Systems. *Environmental and Climate Technologies*, 2017, 12, 5.–23. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.1515/rtuct-2017-0007 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).
6. Blumberga, D., Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Blumberga, A. Gas Condensing Unit with Inner Heat Exchanger. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2017, Vol. 11, No. 4, 353.–357. lpp.
7. Prodaņuks, T., Blumberga, D. Methodology of Municipal Energy Plans. Priorities for Sustainability. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 147, 594.–599. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2018.07.076 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).
8. Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Kirsanovs, V., Kamenders, A., Blumberga, D. Analysis of Energy Supply Solutions of Dwelling Buildings. *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23, No. 3, 182.–189. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuct-2019-0088 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).
9. Blumberga, A., Bažbauers, G., Davidsen, P., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Prodaņuks, T. System Dynamics Model of a Biotechnomy. *Journal of Cleaner Production* 2018, Vol. 172, 4018.–4032. lpp. ISSN 0959-6526. Pieejams: doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.132.

### **Monogrāfijas**

1. Barisa, A., Blumberga, A., Grāvelsiņš, A., Rochas, C., Blumberga, D., Dāce, E., Vīgants, E., Romagnoli, F., Galindoms, G., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Ziemele, J., Rošā, M., Sarmaņš, R., Kalniņš, S., Prodaņuks, T., Kirsanovs, V., Ilgtspējīgi energoavoti. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 146 lpp. ISBN 978-9934-22-017-3.
2. Blumberga, A., Bažbauers, G., Davidsens, P., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Prodaņuks, T., Sistēmdinamika biotehonomikas modelēšanai. Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. 332 lpp. ISBN 978-9934-10-801-3.

### **Citas zinātniskās publikācijas**

1. Blumberga, A., Bažbauers, G., Davidsen, P., Grāvelsiņš, A., Prodaņuks, T., Blumberga, D. Moving towards Biotechnomy: an Applied Case in Agriculture Sector. No: Proceedings of the 35th International Conference of the System Dynamics Society and 60th Anniversary of System Dynamics Celebration, Cambridge, 16.–20. jūlijs, 2017. Cambridge: 2017, 1.–29. lpp.
2. Prodaņuks, T., Blumberga, D. Energopatērētāju vadības kursa metodoloģija. No: Konfernce “Vides zinātne un izglītība Latvijā un Eiropā”: tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24.–24. oktobris, 2014. Rīga: 2014, 9.–11. lpp. ISBN 97899341433111.
3. Blumberga, D., Prodaņuks, T. Methodology of Practical Work in Demand Side Management Study Course. No: Abstracts of 55th International Scientific Conference: Subsection: Environmental and Climate Technologies, Latvija, Rīga, 14.–15. oktobris, 2014. Riga: RTU Press, 2014, 33.–33. lpp. ISBN 978-9934-10-612-5.

4. Prodaņuks, T., Blumberga, D. Methodology of Demand Side Management Study Course. Experience of Case Studies. *Agronomy Research* 2015, Vol. 13, No. 2, 520.–525. lpp. ISSN 1406-894X. (Indeksēts SCOPUS datubāzē).
5. Fawzy, M., Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Towards Carbon Neutral Combustion. LCOE Analysis of Co-firing Solid Particles and Gaseous Fuel in Latvia. No: *Energy Procedia*, 2017, 428.–433. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.04.030 (Indeksēts SCOPUS un Web of Science).
6. Priedniece, V., Prodaņuks, T., Fawzy, M., Kazulis, V., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Biomass Co-Firing Laboratory Equipment. No: *Energy Procedia*, Latvija, Rīga, 12.–14. oktobris, 2016. Germany: Elsevier, 2017, 390.–395. lpp. ISSN 1876-6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.04.019.
7. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Prodanuks, T., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Treatment of particulate matter pollution: People's attitude and readiness to act, *Environmental and Climate Technologies*, 2020, Vol. 24, No. 2, 231.–246. lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0069>.
8. Kaselofsky, J., Schule, R., Rošā, M., Prodaņuks, T., Jēkabsons, A., Vadovics, E., Vadovics, K., Heinel, T. Top Energy Saver of the Year: Results of an Energy Saving Competition in Public Buildings. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, Vol. 24, No. 3, 278.-293. lpp. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837. Pieejams: doi:10.2478/rtuct-2020-0103.

#### **Dalība zinātniskajās konferencēs**

1. Prodaņuks, T., Cimdiņa, G., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Sustainable Development of Biomass CHP in Latvia: International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2015, 2015. gada 14.–16. oktobris, Rīga, Latvija.
2. Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Cimdiņa, G., Mohannad, S., Blumberga, D. Emergy Analysis of Biomass CHP. Case Study: International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2015, 2015. gada 14.–16. oktobris, Rīga, Latvija.
3. Cimdiņa, G., Prodaņuks, T., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Review-Based Emergy Analysis of Energy Production: 10<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, 2015. gada 18.–20. jūnijs, Rēzekne, Latvija.
4. Prodaņuks, T., Blumberga, D. Methodology of Demand Side Management Study Course. Experience of Case Studies: 6th International Conference “Biosystems Engineering 2015”, 2015. gada 7.–8. maijs, Tartu, Igaunija.
5. Prodaņuks, T., Vītoliņš, V., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Comparison of Theoretical and Practical Energy Efficiency Values in Indirect Contact Gas Condensing Unit: “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2017, 2017. gada 10.–12. maijs, Rīga, Latvija.
6. Vīgants, E., Prodaņuks, T., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Modelling of Technological Solutions to 4th Generation DH Systems: “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2017, 2017. gada 10.–12. maijs, Rīga, Latvija.

7. Prodanuks, T., Blumberga, D. Methodology of Municipal Energy Plans. Priorities for Sustainability: “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018, 2018. gada 16.–18. maijs, Rīga, Latvija.
8. Prodanuks, T., Veidenbergs, I., Kirsanovs, V., Kamenders, A., Blumberga, D. Analysis of Energy Supply Solutions of Dwelling Buildings: CONECT 2019, 2019. gada 15.–17. maijs, Rīga, Latvija.

# 1. METODIKAS

## 1.1. Iekārtu efektivitātes indikatori un analīze

Iekārtu efektivitātes noteikšanas metodika apskatīta, balstoties uz dūmgāzu kondensatora piemēra, aprobējot to vairākās zinātniskajās publikācijās. Šajā nodaļā apskatītas dažādas efektivitātes aprēķina metodes, ņemot dūmgāzu kondensatoru kā atsevišķu iekārtu vai kā vienu no iekārtām kopējā enerģijas ražošanas procesā [9].

Kondensatoru efektivitāti var noteikt trīs veidos:

- 1) kā attiecību starp kondensatora jaudu un katla jaudu;
- 2) uzskatot kondensatoru par daļu no siltumenerģijas ražošanas iekārtas;
- 3) uzskatot kondensatoru par atsevišķu iekārtu.

Visbiežāk kondensatoru efektivitāti zinātniskajos rakstos nosaka procentos kā attiecību starp kondensatora jaudu un katla jaudu.

$$\eta_{c1} = \frac{N_c}{N_{th}} \cdot 100, \quad (1.1.)$$

kur

$\eta_{c1}$  – kondensatora efektivitāte (pirmais veids), %;

$N_c$  – kondensatora jauda, kW;

$N_{th}$  – katla jauda, kW.

Šis efektivitātes veids parāda, cik lielu daļu kondensatora jaudas var atgūt, utilizējot siltuma zudumus no dūmgāzēm ar kondensatora palīdzību. Tomēr šis efektivitātes veids neparāda kurināmā patēriņa ietaupījumu absolūtajos skaitļos, kas ļautu saprast iekārtas lietderību.

Lai aprēķinātu kondensatora kā daļas no kopējās siltumenerģijas ražošanas iekārtas efektivitāti, jāizmanto 1.2. vienādojumu:

$$\eta_{b+c2} = \eta_b + \Delta\eta_{c2}, \quad (1.2.)$$

kur

$\eta_{b+c2}$  – kopējā katla un kondensatora efektivitāte;

$\Delta\eta_{c2}$  – katla efektivitātes pieaugums kondensatora izmantošanas rezultātā.

Kondensatora jaudu var noteikt, aprēķinot entalpiju starpību vai siltumnesēja temperatūras izmaiņas kondensatorā:

$$N_c = L_{wc} c_w (t_{wc2} - t_{wc1}), \quad (1.3.)$$

kur

$L_{wc}$  – siltumnesēja plūsma kondensatorā, kg/s;

$L_{wc}$  – siltumnesējā īpatnējā siltumietilpība, kJ/kgK;

$t_{wc2}$  – kondensatora turpgaitas temperatūra, °C;

$t_{wc1}$  – kondensatora atgaitas temperatūra, °C.

Kondensatora efektivitāti, izmantojot otro metodi ar kurināmā zemāko sadegšanas siltumu, aprēķina ar 1.4. vienādojumu.

$$\Delta\eta_{c2} = \frac{N_c}{N_i} \quad (1.4.)$$

kur

$N_i$  – katlā ievadītā jauda, kW.

Dūmgāzu kondensatoru var aplūkot arī kā atsevišķu siltumenerģijas ražošanas iekārtu, kurā ievadītās siltumenerģijas daudzums ir vienāds ar zudumiem no katla ar dūmgāzēm. Dūmgāzu kondensatora efektivitāti nosaka kā attiecību starp siltumnesēja enerģiju un dūmgāzu siltumenerģijas zudumiem pēc katla. Lai aprēķinātu trešā veida efektivitāti, līdzīgi kā otrā tipa efektivitātes gadījumā, var izmantot augstāko un zemāko sadegšanas siltumu. Efektivitātes aprēķins, izmantojot zemāko sadegšanas siltumu, parādīts 1.5. vienādojumā.

$$\eta_{c3}^L = \frac{N_c}{N_2}, \quad (1.5.)$$

kur

$\eta_{c3}^L$  – kondensatora efektivitāte, izmantojot zemāko sadegšanas siltumu;

$N_2$  – zudumi ar dūmgāzēm no katla, kW.

Viens no svarīgākajiem siltumenerģijas ražošanas iekārtas parametriem ir kurināmā patēriņš, īpaši kurināmā patēriņa samazinājums, palielinot iekārtas energoefektivitāti. Lai aprēķinātu kurināmā ietaupījumu, kondensators jāpieņem kā daļa no siltumenerģijas ražošanas iekārtas. Kurināmā ietaupījumu var aprēķināt, izmantojot šādu vienādojumu:

$$\Delta B = \frac{N_c}{Q_L^d \eta_{b+c2}^L} = \frac{N_c B}{N_b N_c}, \quad (1.6.)$$

kur

$\Delta B$  – kurināmā ietaupījums, kg/s.

Kurināmā ietaupījumu var aprēķināt, arī izmantojot kurināmā augstāko sadegšanas siltumu. Šie aprēķini parādīti 1.7. vienādojumā.

$$\Delta B = \frac{N_c}{Q_H^d \eta_{b+c2}^H} = \frac{N_c B}{N_b N_c}. \quad (1.7.)$$

1.6 un 1.7. vienādojuma trešā daļa sakrīt. Tas ļauj secināt, ka kurināmā ietaupījums nav atkarīgs no efektivitātes aprēķinos izmantotās kurināmā sadegšanas vērtības. Lai iegūtu kurināmā ietaupījuma vērtību, kas salīdzināma ar citām iekārtām, ir ieviests kurināmā ietaupījuma koeficienta aprēķina vienādojums.

$$\delta B = \frac{\Delta B}{B}, \quad (1.8.)$$

kur

$\delta B$  – kurināmā ietaupījuma koeficients.

Kurināmā ietaupījuma koeficientu var izmantot kondensatora aprēķinos un kā kondensatora efektivitātes vērtību, balstoties uz kurināmā samazinājumu.

## 1.2. Regresijas analīze

Regresijas analīze nosaka gadījuma lieluma izmaiņu precīzus kvantitatīvus parametrus un ar funkcionālām sakarībām izsaka stohastiskās saites nozīmīgumu. Regresijas analīzes uzdevums ir [10]:

- noteikt neatkarīgo un atkarīgo gadījuma mainīgo lielumu statistiskās sakarības ciešuma kvantitatīvos parametrus;
- noteikt regresijas vienādojuma (matemātiskā modeļa) koeficientus.

Regresijas analīze sastāv no divām daļām: regresijas vienādojuma noteikšanas ar mazāko kvadrātu vai kādu citu metodi un iegūtā rezultāta statistiskās analīzes. Neatkarīgo mainīgo skaita variācijas un arī dažādās sakarības starp neatkarīgajiem un atkarīgajiem mainīgajiem lielumiem ļauj iegūt dažādus regresijas vienādojumus [11]:

- divu faktoru lineāru;
- vairāku faktoru lineāru;
- linearizētu;
- nelineāru.

Atbilstoši regresijas vienādojuma veidam mainās arī gadījuma lieluma izmaiņu novērtēšanas kvantitatīvo parametru noteikšana. Regresijas analīze sākas ar atkarīgo mainīgo lielumu sadalījuma noteikšanu. Tam jāatbilst normāla sadalījuma noteikumiem, lai to varētu izmantot turpmākajā sadalījumā [10].

Neatkarīgo un atkarīgo gadījuma mainīgo lielumu savstarpējās saites ciešumu (korelāciju) var novērtēt ar korelācijas koeficienta palīdzību. Viena faktora matemātiskā modeļa aplēsēm izmanto Pīrsona vienādojumu [12].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y (m - 1)}, \quad (1.9.)$$

kur

- $x_i, y_i$  – neatkarīgie lielumi un tiem atbilstoši atkarīgo lielumu pāri;
- $\bar{x}, \bar{y}$  – neatkarīgo un atkarīgo lielumu vidējās aritmētiskās vērtības;
- $S_x, S_y$  – lielumu izlases dispersijas.

Daudzfaktoru korelācijas gadījumā lieto daudzfaktoru korelācijas koeficientu  $R$ . Šis koeficients nav statistiski interpretējams, tomēr to nosaka un izmanto kā netiešu regresijas vienādojuma noderības rādītāju [13].

Nelineārās regresijas gadījumā korelācijas koeficienta vietā izmanto korelācijas attiecību. Korelācijas attiecībai nelineārajā regresijā ir tāda pati nozīme kā koeficientam lineārajā regresijā – tā raksturo rezultātu grupēšanos ap nelineārās regresijas līniju. Korelācijas koeficienta vērtība var mainīties no  $-1$  līdz  $+1$ . Ja korelācijas koeficients ir vienāds ar  $0$  vai tuvu tai, tas liecina, ka starp mainīgajiem lielumiem nav sakarības. Savukārt koeficienta

vērtības, kas ir vienādas ar  $-1$  vai  $+1$ , liecina par funkcionālu sakarību starp neatkarīgajiem un atkarīgajiem lielumiem. Jāatzīmē, ka datu statistiskai apstrādei parasti rēķina korelācijas koeficienta kvadrātu. Korelācijas koeficienta kvadrāts  $R^2$  norāda aplūkojamā regresijas vienādojuma raksturojumu, ņemot vērā atkarīgo gadījuma lielumu izmaiņas [14].

Rezultātu nodaļā parādīta regresijas analīze starp dažādiem dūmgāzu kondensatora parametriem, kā arī sakarība starp siltumenerģijas daudzumu, kas saražots ar saules kolektoru, un saules radiācijas daudzumu.

Dūmgāzu kondensatora empīriskā analīze veikta, izmantojot *STATGRAPHICS Centurion XVI* datorprogrammu. Lai veiktu empīrisku kondensatora analīzi, izmantota daudzfaktoru regresijas analīze [15].

Daudzfaktoru regresijas analīze veikta, lai iegūtu matemātisku modeli, kas raksturo atkarīgo mainīgo, izmantojot divus vai vairākus neatkarīgos mainīgos. Turpmākajā solī ar regresijas analīzes palīdzību jānosaka lineārā regresijas vienādojuma koeficienti, jāveic rezultātu statistiskā analīze un ar sākotnējo datu palīdzību jānosaka regresijas vienādojums.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (1.10.)$$

kur

$y$  – atkarīgais mainīgais lielums;

$b_0$  – regresijas brīvais loceklis;

$b_1, \dots, b_n$  – regresijas koeficienti;

$x_1, \dots, x_n$  – neatkarīgie mainīgie lielumi.

Regresijas vienādojumu koeficientu  $b_0, \dots, b_n$  statistiskās nozīmības novērtēšanai izmanto  $t$  kritēriju, kuram ir Stjudenta sadalījums ar brīvības pakāpēm.

$$f = m - (n + 1). \quad (1.11.)$$

Lielums  $m$  raksturo statistiskajai analīzei pakļauto datu apjomu,  $n$  – neatkarīgo mainīgo skaitu regresijas vienādojumā. Lai veiktu novērtēšanu, katra koeficienta ar datorprogrammu aprēķināto  $t$  kritēriju salīdzina ar vērtību  $t_{\text{tab}}$ , ko atrod Stjudenta sadalījuma tabulās atbilstoši izvēlētajai nozīmības līmeņa  $P$  un  $f$  brīvības pakāpēm. Ar enerģētiku saistīto datu apstrādē bieži izmanto nozīmības līmeni  $P = 0,05$ , kam atbilst ticamības varbūtība  $1 - P = 0,95$ . Ja vērtējamajam koeficientam ir spēkā noteikums  $|t| > t_{\text{tab}}$ , tad tas ir nozīmīgs un atstājams regresijas vienādojumā. Pretējā gadījumā šis vienādojuma saskaitāmais jāatmet, un analīze jāveic no jauna, līdz visi atstātie koeficienti ir statistiski nozīmīgi. Visu šo procedūru veic iepriekš minētā datorprogramma.

Novērtējumu veic ar dispersijas analīzes palīdzību, izmantojot Fišera kritēriju  $F$ . Šo darbību ietvaros aplūko atkarīgā mainīgā lieluma dispersijas attiecību pret atlikumu dispersiju.

$$F(f_1, f_2) = \frac{S_y^2(f_1)}{S_{\text{atl}}^2(f_2)}, \quad (1.12.)$$

kur

$S_y^2(f_1)$  – atkarīgā mainīgā lieluma  $y$  dispersija;

$S_{\text{atl}}^2(f_2)$  – atlikuma dispersija.

Atlikumu nosaka kā atkarīgā mainīgā lieluma un ar regresijas vienādojuma palīdzību aprēķinātās vērtības starpību  $y_i - y_i^{\text{apr}}$ . Brīvības pakāpes  $f_1$  un  $f_2$  aprēķina ar vienādojumiem:

$$\begin{aligned} f_1 &= m - 1 \\ f_2 &= m - 1. \end{aligned} \quad (1.13.)$$

Ja  $F$  kritēriju vērtība būs lielāka par kritisko, ko nosaka no  $F$  sadalījuma tabulām, ņemot vērā brīvības pakāpes  $f_1$  un  $f_2$ , kā arī nozīmības līmeni  $P$ , tas nozīmē, ka vienādojums apraksta analizējamās datus un to var izmantot turpmākajai analīzei [16].

### 1.3. Daudzkritēriju analīze lēmumu pieņemšanai

Daudzkritēriju analīzi izmanto, lai analizētu ekonomiskos, sociālos, vides un institucionālos parametrus kopskatā, apskatot kādas sistēmas attīstības scenārijus. Viens no daudzkritēriju analīzes veidiem ir *TOPSIS*, kas sasaista dažādus faktorus un nosaka labāko attīstības scenāriju.

*TOPSIS* metode sākas ar izejas datu matricas sastādīšanu [17].

$$\begin{matrix} & b_1 & b_2 & \dots & b_j & \dots & b_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} b_{11}^k & b_{12}^k & \dots & b_{1j}^k & \dots & b_{1n}^k \\ b_{21}^k & b_{22}^k & \dots & b_{2j}^k & \dots & b_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{i1}^k & b_{i2}^k & \dots & b_{ij}^k & \dots & b_{in}^k \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{n1}^k & b_{n2}^k & \dots & b_{nj}^k & \dots & b_{nn}^k \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1.14.)$$

Pēc matricas sastādīšanas datus normalizē, izmantojot šādu metodiku:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}. \quad (1.15.)$$

Nākamais solis ir svērtās normalizētās matricas vērtību aprēķins.

$$v_{ij} = w_j n_{ij}. \quad (1.16.)$$

Tad nosaka pasākumus atdalīšanai no pozitīvā ideālā risinājuma un negatīvā ideālā risinājuma. Saskaņā ar relatīvi pozitīvu ideālo risinājumu aprēķiniem izmanto šādu vienādojumu:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}. \quad (1.17.)$$

Aprēķina relatīvi pozitīvo ideālo risinājumu un nosaka piedāvāto risinājumu sadalījumu. Daudzkritēriju analīzes rezultāti, izvēloties siltumenerģijas ražošanas attīstības scenāriju, parādīti 2.4. nodaļā.

## 1.4. Emerģijas indikatoru modelis

Lai veiktu emerģijas analīzi, izmantoti dažādi raksturlielumi un indikatori. Visi resursi, kas izmantoti produkta vai pakalpojuma radīšanā, ir iedalīti četrās grupās: atjaunojamie resursi (R); neatjaunojamie resursi (N); materiāli (G); pakalpojumi (S). Aprēķinos materiālus un pakalpojumus apvieno vienā grupā, kas ir importētā emerģija (F). Atjaunojamos un neatjaunojamos resursus ņem no apkārtējās vides, un par tiem tieši netiek maksāts, piemēram, saules enerģija un gaiss. Materiālus un pakalpojumus importē sistēmā no citām sistēmām [18].

Emerģijas jauda (angļu val. *empower*) ir emerģijas plūsmas vērtība. Tās mērvienība ir emdžouli gadā. Dažāda veida plūsmas var salīdzināt, tās visas izsakot emerģijas jaudā [18].

Kāda produkta vai pakalpojuma emerģijas attiecība pret tā enerģiju ir definēta kā pārveides koeficients (angļu val. *transformity*). Pārveides koeficienta mērvienības ir saules emdžouls pret džoulu (seJ/J). Pārveides koeficients ir emerģija, kas ir vajadzīga, lai radītu vienu džoulu enerģijas, kas nepieciešama, lai radītu produktu vai pakalpojumu. Jo vairāk produkta ražošanā ir vajadzīga enerģijas pārveidošana, jo lielāks būs šī produkta pārveides koeficients. Tas ir tāpēc, ka, katru reizi pārveidojot enerģiju no vienas formas citā, pieejamā enerģija tiek izmantota, lai radītu mazāku citas enerģijas formas daudzumu. Tāpēc emerģija pieaug, savukārt enerģija samazinās, un pārveides koeficients pieaug strauji. Vislielākais pārveides koeficients ir cilvēku sniegtajiem pakalpojumiem un informācijai, jo informācijas enerģija ir tā, kas nodrošina informācijas plūsmu, piemēram, papīrs, cietais disks, cilvēka smadzenes u. c. Piemēram, ja 100 000 J saules gaismas ir vajadzīgi, lai radītu 100 J enerģijas no augiem, tad pārveides koeficients ir 1000 seJ/J. Jo vairāk enerģijas ir vajadzīgs (pārveides koeficients pieaug), lai no saules enerģijas iegūtu cita veida enerģiju, jo augstākas kvalitātes enerģija tā ir [19].

Lai varētu salīdzināt sistēmas, kurām veikta emerģijas analīze, izmanto dažādus emerģijas indikatorus [20]:

- emerģijas pakalpojumu attiecība (angļu val. *energy yield ratio*);
- vides slodzes attiecība (angļu val. *environmental loading ratio*);
- emerģijas ilgtspējības indekss (angļu val. *energy sustainability index*);
- emerģijas jaudas blīvums (angļu val. *empower density*);
- atjaunojamie resursi procentos (angļu val. *percent renewable*);
- emerģijas investīciju attiecība (angļu val. *energy investment ratio*).

Emerģijas pakalpojumu attiecība (EYR) ir indikators, kas rāda produktu vai pakalpojumu tiešo devumu ekonomikai no šo produktu vai pakalpojumu radīšanas. Šis indikators ir svarīgs tām sistēmām, kas rada produktus, kas svarīgi citu produktu ražošanai. Emerģijas attiecības indikatoru aprēķina ar 1.18. vienādojumu [20].

$$EYR = \frac{Em}{Em_F} = \frac{Em_F + Em_R + Em_N}{Em_F}, \quad (1.18.)$$

kur

$Em$  – kopējā emerģija, seJ gadā;

$Em_F$  – kopējā importētā emerģija, seJ gadā;

$Em_R$  – kopējā atjaunojamo resursu emerģija, seJ gadā;

$Em_N$  – kopējā neatjaunojamo resursu emerģija, seJ gadā.

Emerģijas attiecība ir kopējās emerģijas attiecība pret importētās emerģijas attiecību. Jo lielāka ir emerģijas attiecība, jo lielāks ir atjaunojamo un neatjaunojamo resursu patēriņš, kas liecina par vietējo resursu izmantojumu [20].

Vides slodzes attiecība ( $ELR$ ) ir importēto un neatjaunojamo resursu emerģijas summas attiecība pret atjaunojamo resursu emerģiju. Vides slodzes attiecību aprēķina ar 1.19. vienādojumu [20].

$$ELR = \frac{Em_F + Em_N}{Em_R}. \quad (1.19.)$$

Jo lielāka ir  $ELR$  vērtība, jo lielāka ir slodze uz vidi. Liela slodze uz vidi ir konstatējama, kad  $ELR$  vērtība pārsniedz desmit. Lielu slodzi uz vidi var izskaidrot ar lielu importēto resursu īpatsvaru vai lielu neatjaunojamo resursu daudzumu sistēmā [20].

Apskatot iepriekšējos emerģijas indikatorus, jāsecina, ka, lai sistēma būtu ilgtspējīga, vajadzīga augsta emerģijas pakalpojumu attiecība un zema slodzes attiecība. Šo sakarību parāda emerģijas ilgtspējas indikators ( $ESI$ ), ko aprēķina ar 1.20. vienādojumu [20].

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}. \quad (1.20.)$$

Ja  $ESI$  ir mazāks par vienu, apskatītajā produkta ražošanas sistēmā ir augsts neatjaunojamo resursu īpatsvars, kas liecina par neilgtspējīgu ražošanu.  $ESI$ , kas ir lielāks par vienu, liecina, ka sistēma ir ilgtspējīga. Tomēr, augot  $ESI$  vērtībai, palielinās atjaunojamo resursu īpatsvars, savukārt samazinās to pakalpojumu skaits, kas ietekmē vietējo ekonomiku, kas, piemēram, ir darbinieku algas [20].

Emerģijas aprēķini sākas ar enerģijas sistēmas diagrammas izveidi. Tā palīdz gūt priekšstatu par sistēmu, tās sastāvdaļām, procesiem un problēmām. Enerģijas sistēmas diagramma parāda galvenos parametrus, kas jāiekļauj emerģijas aprēķinu tabulā. Emerģiju un emerģiju uz naudas vienību aprēķina katrai ieejošajai plūsmai un produktam.

Emerģijas analīzes nenoteiktību būtiski ietekmē divi faktori. Vispirms jāatzīmē nepietiekami un neprecīzi literatūrā pieejamie emerģijas vienību pārveides koeficientu dati. Tas pārsvarā attiecināms uz rūpnieciskiem produktiem un transporta sistēmām. Identificēt galvenokārt var vispārējus vai aptuvenus rādītājus.

Nākamais nenoteiktības avots ir neprecīza procesa inventarizācija un nepilnīgs procesa ievaddatu novērtējums. Piemēram, ražošanas procesa emisijas rada slodzi uz vidi, un šī slodze ir jānovērtē. Lai to veiktu, ir vajadzīga informācija par reģiona ekosistēmas stāvokli, un tam ir nepieciešams atsevišķs pētījums un novērtējums.

Veicot emerģijas aprēķinus un izmantojot emerģijas vienības pārveides koeficientu literatūras datus, ir rūpīgi jāseko datu izcelsmei un aprēķinu ķēdei, lai emerģiju neiekļautu divkārt. Viens no iespējamajiem variantiem ir izmantot biosfēras kopējās iedarbības datus, izslēdzot atsevišķu ķēdes posmu iedarbi.

## 2. REZULTĀTI

### 2.1. Siltumenerģijas ražošanas efektivitātes aprēķina rezultāti

Efektivitātes aprēķini veikti dūmgāzu kondensatoram. Kā minēts literatūras analizē un metodoloģijas nodaļā, var aprēķināt trīs dūmgāzu kondensatora efektivitātes veidus:

- 1) dūmgāzu kondensatora un katla jaudas attiecību;
- 2) kondensatora kā daļas no siltumenerģijas ražošanas sistēmas efektivitāti;
- 3) kondensatora kā atsevišķas iekārtas efektivitāti.

Visi aprēķinos izmantotie vienādojumi parādīti 1.1. nodaļā. 2.1. tabulā parādīti dūmgāzu kondensatora un katla jaudas attiecības aprēķinu rezultāti.

2.1. tabula

Dūmgāzu kondensatora efektivitāte (pirmais veids)

| Nr.  | Nosaukums                                                            | Mērvienība | Vērtība |
|------|----------------------------------------------------------------------|------------|---------|
| 1.   | Kondensatora jaudas attiecība                                        |            | 0,302   |
| 1.1. | Efektivitātes pieaugums, izmantojot kondensatoru $\Delta\eta_{c1}^L$ |            | 0,256   |
| 1.2. | Efektivitātes pieaugums, izmantojot kondensatoru $\Delta\eta_{c1}^H$ |            | 0,2     |
| 1.3. | Kurināmā ietaupījums $\Delta B$                                      | kg/s       | 0,19    |
| 1.4. | Kurināmā ietaupījums $\delta B$                                      |            | 0,23    |

Pirmā veida efektivitāti parasti norāda dūmgāzu kondensatoru iekārtas specifikācijā, tomēr šie dati bieži vien ir maldinoši siltumenerģijas ražotājam. Šīs aprēķina vērtības ir izmantojamas uzstādītās jaudas un slodzes plānošanai, taču nenorāda kopējās siltumenerģijas ražošanas iekārtas efektivitātes pieaugumu.

Otrā veida efektivitāti aprēķina, pieņemot, ka dūmgāzu kondensators ir daļa no siltumenerģijas ražošanas sistēmas. Aprēķinu rezultāti parādīti 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Dūmgāzu kondensatora efektivitāte (otrais veids)

| Nr.  | Nosaukums                                                            | Mērvienība | Vērtība |
|------|----------------------------------------------------------------------|------------|---------|
| 2.1. | Efektivitātes pieaugums, izmantojot kondensatoru $\Delta\eta_{c2}^L$ |            | 0,256   |
| 2.2. | Efektivitātes pieaugums, izmantojot kondensatoru $\Delta\eta_{c1}^H$ |            | 0,2     |
| 2.3. | Iekārtas ( $N_{th} + N_c$ ) efektivitāte $\eta_{b+c}^L$              | %          | 110     |
| 2.4. | Iekārtas ( $N_{th} + N_c$ ) efektivitāte $\eta_{b+c}^H$              | %          | 86,23   |
| 2.5. | Kurināmā ietaupījums $\Delta B$                                      | kg/s       | 0,19    |
| 2.6. | Kurināmā ietaupījums $\delta B$                                      |            | 0,23    |

Izmantojot efektivitāti, kas ir daļa no siltumenerģijas ražošanas sistēmas, aprēķinātās efektivitātes vērtības 2.1., 2.2., 2.5., 2.6. ir vienādas ar pirmā veida efektivitātes aprēķina rezultātiem. Tomēr otrā veida efektivitāte parāda kopējo siltumenerģijas ražošanas sistēmas

efektivitāti. Gadījumā, kad tiek izmantots zemākais kurināmā sadegšanas siltums, efektivitāte ir 110 %, savukārt, izmantojot augstāko kurināmā sadegšanas siltumu, aprēķinātā siltumenerģijas ražošanas sistēmas efektivitāte ir 86,23 %. Efektivitātes vērtība, izmantojot augstāko sadegšanas siltumu, parāda tiešu termodinamisko saistību ar kurināmā patēriņu.

Trešā veida dūmgāzu kondensatora energoefektivitāte ir aprēķināta, pieņemot, ka kondensators ir atsevišķa iekārta. Aprēķinu rezultāti parādīti 2.3. tabulā.

2.3. tabula

Dūmgāzu kondensatora efektivitāte (trešais veids)

| Nr.  | Nosaukums                               | Mērvienība | Vērtība |
|------|-----------------------------------------|------------|---------|
| 3.1. | Kondensatora efektivitāte $\eta_{c3}^L$ | %          | 172,3   |
| 3.2. | Kondensatora efektivitāte $\eta_{c3}^H$ | %          | 58      |

Aprēķina rezultāti parāda, ka, ja dūmgāzu kondensatoru uzskata par atsevišķu iekārtu, tā efektivitātes aprēķini jāveic, izmantojot augstāko sadegšanas siltumu. Ja aprēķinos izmanto zemāko sadegšanas siltumu, netiek ņemti vērā ūdens tvaiki zudumos ar dūmgāzēm un aprēķini ir neprecīzi.

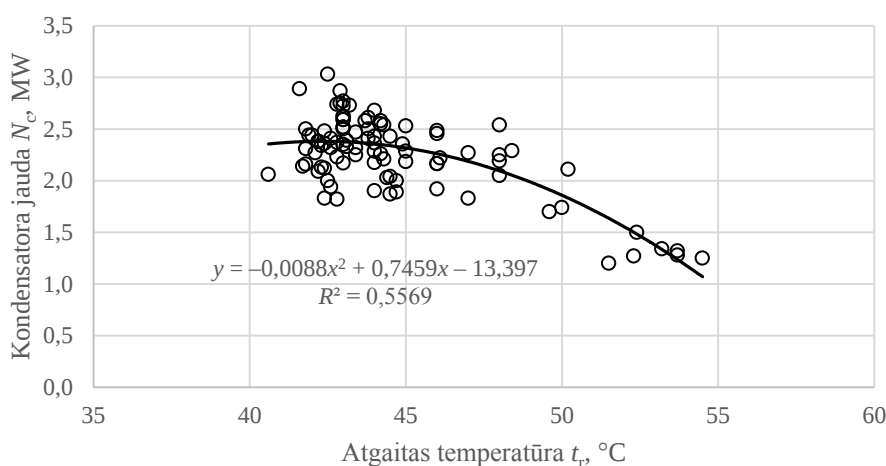
## 2.2. Regresijas analīze

### Divu faktoru regresijas analīze

Divu faktoru regresijas analīze veikta vairākām sistēmām, lai apskatītu tās lietderību enerģijas ražošanas sistēmu analīzē. Pirmā sistēma, kuras parametri ir analizēti, ir biomasas katls ar dūmgāzu kondensatoru.

Lai iegūtu rezultātus, tika veikti vairāku uzstādītā biomasas katla parametru mērījumi un noteikta sakarība starp tiem. Kā minēts metodikā 1.2. nodaļā, regresijas analīzei izvēlētie parametri ir balstīti uz literatūras analīzi un parametru sakarībām.

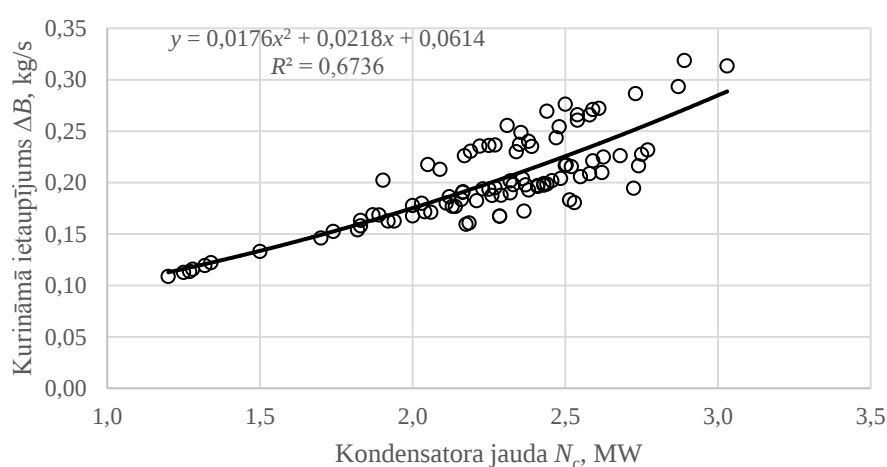
2.1. attēlā apskatīta sakarība starp kondensatora jaudu un centralizētās siltumapgādes sistēmas siltumnesēja atgaitas temperatūru, kas tiek izmantota dūmgāzu kondensatorā.



2.1. att. Sakarība starp kondensatora jaudu un atgaitas temperatūru.

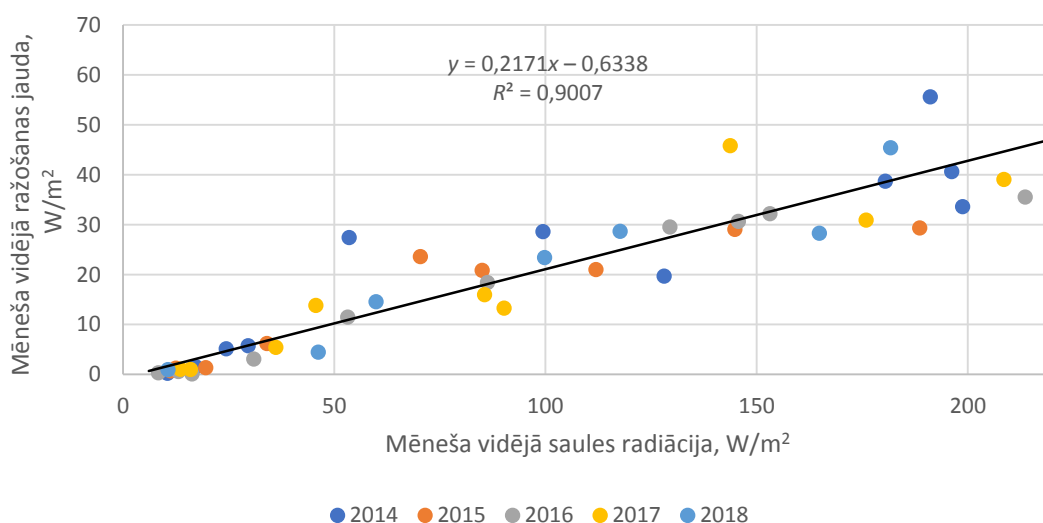
2.1. attēlā redzams, ka dūmgāzu kondensatora jauda samazinās, pieaugot atgaitas temperatūrai. Sakarību starp abiem parametriem var aprakstīt ar vienādojumu, kas parādīts 2.1. attēlā. Apskatītā sakarība sakrīt ar citos pētījumos aprakstīto. Kad atgaitas temperatūra ir augsta, tā nespēj kondensēt visu dūmgāzēs esošo tvaiku, tādēļ dūmgāzu kondensatora jauda ir mazāka.

Dūmgāzu kondensatora uzstādīšanas mērķis ir paaugstināt siltumenerģijas ražošanas efektivitāti, nodrošinot nepieciešamo siltumenerģijas slodzi ar mazāku kurināmā patēriņu. Siltumenerģijas ražošanas sistēmas efektivitāte ir tieši saistīta ar kurināmā patēriņa samazinājumu. Viens no analizētajiem parametriem ir kurināmā patēriņa samazinājums jeb kurināmā ietaupījums (kg/s). Lai pierādītu kondensatora izmantošanas lietderību, sakarība starp kurināmā ietaupījumu un kondensatora jaudu ir parādīta 2.2. attēlā.



2.2. att. Sakarība starp kurināmā ietaupījumu un kondensatora jaudu.

2.2. attēlā redzama laba sakarība starp kurināmā ietaupījumu un kondensatora jaudu. Var secināt, ka, lai paaugstinātu siltumenerģijas ražošanas efektivitāti, dūmgāzu kondensators jāizmanto ar tā maksimālo jaudu.



2.3. att. Sakarība starp kolektoru ražošanas jaudu un saules radiāciju.

Otrā analizētā sistēma ir saules kolektori. Saules kolektoru darbība ir tieši atkarīga no pieejamās saules enerģijas. Tomēr saules kolektoru sistēmā ir arī citi faktori, kas var ietekmēt saražotās siltumenerģijas daudzumu. 2.3. attēlā redzama sakarība starp mēneša vidējo pieejamo saules enerģijas jaudu un mēneša vidējo saražotās siltumenerģijas jaudu.

Sakarība starp vidējo mēneša saules radiāciju un ražošanas jaudu ir redzama 2.3. attēlā. Dažos gadījumos redzams, ka ir novirzes no ražošanas līknes, kas liecina par citu faktoru, kas saistīti ar kolektoru sistēmas darbības nodrošināšanu, ietekmi. Šāda analīze ļauj pārliecināties, ka ir gadījumi, kad kolektori ar vienādiem saules radiācijas parametriem var saražot vairāk siltumenerģijas. Pēc šādas analīzes nākamais solis ir noteikt, kādi citi faktori ietekmē saules kolektoru ražošanas jaudu. Šādiem nolūkiem var izmantot vairāku faktoru regresijas analīzi.

### Daudzfaktoru regresijas analīze

Daudzfaktoru regresijas analīzi izmanto, lai noteiktu vairāku faktoru (neatkarīgo mainīgo) ietekmi uz atkarīgo mainīgo. Vairāku faktoru regresijas analīze aprobēta uz siltumenerģijas ražošanas sistēmas, kurā uzstādīts biomasas ūdenssildāmais katls un dūmgāzu kondensators. Divu faktoru regresijas analīze starp kurināmā ietaupījumu un kondensatora jaudu parādīja augstu sakarību, tāpēc vairāku faktoru regresijas analīzei kā atkarīgais mainīgais izvēlēta dūmgāzu kondensatora jauda, lai noteiktu optimālus kondensatora darbināšanas apstākļus. Vairāku faktoru regresijas analīzes mērķis ir iegūt vienādojumu, kas apraksta kondensatora jaudu, balstoties uz statistiski nozīmīgiem parametriem.

Vairāku faktoru regresijas analīze veikta, balstoties uz šādiem soļiem:

- kondensatora jaudai kā atkarīgajam mainīgajam veikts normālā sadalījuma tests;
- noteikts regresijas vienādojums;
- veikta rezultātu statistiskā analīze.

Vairāku faktoru regresijas analīzi var izmantot, ja atkarīgais mainīgais, šajā gadījumā kondensatora jauda, atbilst normālam sadalījumam. Šīs prasības neattiecas uz neatkarīgajiem mainīgajiem. Pārbaude apstiprina, ka vairāku faktoru analīzi var izmantot, ja rezultāts ir pozitīvs. 2.4. tabulā parādīts normālā sadalījuma statistikas kopsavilkums.

2.4. tabula

Kondensatora jaudas normālā sadalījuma statistikas kopsavilkums

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Skaitis                | 94        |
| Vidējā vērtība         | 2,249 99  |
| Mediāna                | 2,315     |
| Standarta novirze      | 0,377 428 |
| Variācijas koeficients | 16,7747 % |
| Minimums               | 1,2       |
| Maksimums              | 3,03      |
| Izkliede               | 1,83      |
| Standarta asimetrija   | -1,99     |
| Standarta ekscess      | 1,89      |

Statistikas kopsavilkumā iekļautas mainīguma vērtības, galveno tendenču vērtības un formas vērtība. Tās izmanto, lai noteiktu, vai analizētajam mainīgajam ir normāls sadalījums. Standarta asimetrijas un standarta ekscesa vērtības, kas ir ārpus diapazona  $-2 \dots +2$ , norāda uz novirzēm no normālā sadalījuma, kas liecina par izmantoto datu neatbilstību. Analizētajā gadījumā standarta asimetrija un standarta ekscess ir iepriekš minētajā diapazonā, kas liecina par datu atbilstību normālam sadalījumam. Pēc analīzes veikšanas var secināt, ka izmantotā atkarīgā mainīgā datus var izmantot vairāku faktoru regresijas analīzei.

Vairāku faktoru regresijas analīze sāka ar neatkarīgu mainīgo kritisku izvērtējumu. Kā neatkarīgie mainīgie vairāku faktoru analīzē iekļauti šādi parametri:

- dūmgāzu plūsma kondensatorā ( $G_k$ );
- izsmidzināmā ūdens plūsma ( $G_{sp}$ );
- katla jauda ( $N_{kt}$ );
- skābekļa daudzums dūmgāzēs ( $O_2$ );
- kurināmā zemākais sadegšanas siltums ( $Q_{zd}$ );
- atgaitas ūdens temperatūra ( $t_{k1}$ );
- gaisa temperatūra ( $t_{ag}$ );
- dūmgāzu temperatūra pirms kondensatora ( $t_{g1}$ );
- dūmgāzu temperatūra pēc kondensatora ( $t_{g2}$ );
- izsmidzināmā ūdens temperatūra ( $t_{sp}$ );
- kurināmā mitruma daudzums ( $W_d$ ).

Vairāku faktoru lineārais regresijas vienādojums, kas iegūts, izmantojot *STATGRAPHICS* programmu, apraksta sakarību starp kondensatora jaudu un 11 neatkarīgajiem mainīgajiem. Vairāku faktoru regresijas analīzes rezultāti parādīti 2.5. tabulā.

2.5. tabula

Vairāku faktoru regresijas analīzes rezultāti

| Parametrs                                           | Novērtējums  | Standartklūda | $t$ vērtība | $P$ vērtība |
|-----------------------------------------------------|--------------|---------------|-------------|-------------|
| Konstante                                           | -2,267 34    | 1,275 22      | -1,778      | 0,0790      |
| Dūmgāzu plūsma kondensatorā ( $G_k$ )               | 0,005 339 73 | 0,001 369 33  | 3,899 52    | 0,0002      |
| Izsmidzināmā ūdens plūsma ( $G_{sp}$ )              | 0,380 81     | 0,074 631 5   | 5,102 54    | 0,0000      |
| Katla jauda ( $N_{kt}$ )                            | 0,109 595    | 0,039 604 5   | 2,767 23    | 0,0069      |
| Skābekļa daudzums dūmgāzēs ( $O_2$ )                | -0,0691 925  | 0,029 251 4   | -2,365 44   | 0,0203      |
| Dūmgāzu temperatūra pirms kondensatora ( $t_{g1}$ ) | 0,011 138 8  | 0,004 565 9   | 2,439 57    | 0,0168      |
| Atgaitas ūdens temperatūra ( $t_{k1}$ )             | -0,037 789 4 | 0,008 455 31  | -4,469 31   | 0,0000      |
| Izsmidzināmā ūdens temperatūra ( $t_{sp}$ )         | 0,043 563 6  | 0,006 120 45  | 7,117 71    | 0,0000      |
| Kurināmā mitruma daudzums ( $W_d$ )                 | 0,008 849 48 | 0,002 713 02  | 3,261 86    | 0,0016      |

Kā redzams 2.5. tabulā, trīs izvēlētie neatkarīgie mainīgie nav pietiekami statistiski nozīmīgi un tiek izslēgti no vienādojuma. Analīzes rezultātā iegūts šāds vienādojums:

$$N_k = -2,267\,34 + 0,005\,339\,73G_k + 0,380\,81G_{sp} + 0,109\,595N_{kt} - 0,069\,192\,5O_2 \\ + 0,011\,138\,8t_{g1} - 0,037\,789\,4t_{k1} + 0,043\,563\,6t_{sp} + 0,008\,849\,48W_d.$$

Tā kā  $P$  vērtība ir mazāka par 0,05, statistiski nozīmīga sakarība novērojama radītajam vienādojumam, ja ticamība ir 95 %. Dispersijas analīzes rezultāti parādīti 2.6. tabulā.

2.6. tabula

#### Dispersijas analīze

| Avots    | Kvadrātu summa | $df$ | Vidējais kvadrāts | $F$ vērtība | $P$ vērtība |
|----------|----------------|------|-------------------|-------------|-------------|
| Modelis  | 11,3595        | 8    | 1,419 93          | 63,91       | 0,0000      |
| Atlikums | 1,888 57       | 85   | 0,022 218 5       |             |             |
| Kopā     | 13,248         | 93   |                   |             |             |

Izveidotā modeļa determinācijas koeficients ( $R^2$ ) norāda, ka vienādojums raksturo 85,74 % dūmgāzu kondensatora mainīgumu. Pielāgotais determinācijas koeficients ir 84,4 %, kas ir vairāk piemērots, salīdzinot vienādojumus ar dažādu neatkarīgo mainīgo daudzumu. Aprēķinātā standartklūdas vērtība ir 0,149. Šo vērtību izmanto, lai izveidotu ticamas prognozēšanas robežas.

Ar izveidoto aprēķina vienādojumu iespējams noteikt dūmgāzu koģenerācijas jaudas aprēķina optimālos parametrus. Izmantojot šo aprēķina modeli un analizējot neatkarīgo mainīgo vērtības, iespējams paaugstināt dūmgāzu kondensatora jaudu, attiecīgi palielinot siltumenerģijas ražošanas sistēmas darbības efektivitāti.

### 2.3. Ekonomisko indikatoru analīzes rezultāti siltumenerģijas lietotāja līmenī

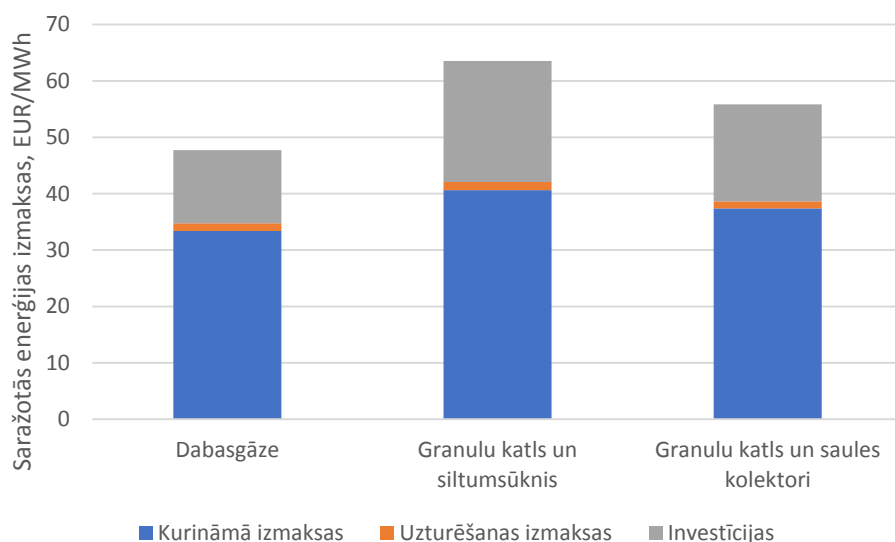
Analīzes rezultāti aprobēti trīs daudzdzīvokļu dzīvojamās ēkās, kurās siltumenerģiju nodrošina vietējā enerģijas ražošanas sistēma. Pirmajai ēkai uzstādīts dabasgāzes katls, otrajai ēkai uzstādīta kombinēta sistēma ar granulu katlu un siltumsūkni, trešajai ēkai uzstādīta kombinēta sistēma ar granulu katlu un saules kolektoru. Siltumenerģijas ražošanas sistēmas raksturojošie parametri parādīti 2.7. tabulā.

2.7. tabula

#### Siltumenerģijas ražošanas iekārtu raksturojums

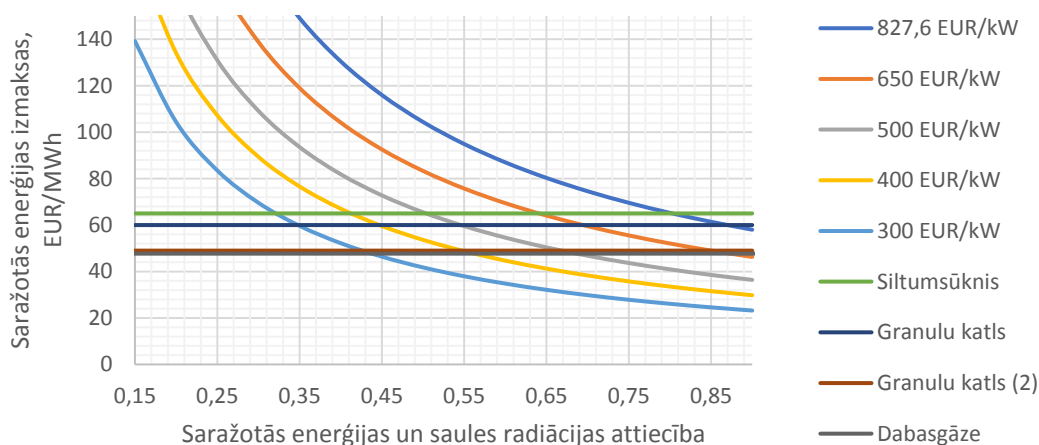
|                                | Dabasgāzes katls       | Granulu katls un siltumsūknis |                           | Granulu katls un saules kolektori |              |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Uzstādīšanas gads              | 2010                   | 2018                          | 2011                      | 2011                              | 2011         |
| Uzstādītā iekārta              | <i>Buderus Logamax</i> | <i>NBE RTB</i>                | <i>Stiebel Eltron WPF</i> | <i>GD-Turbo</i>                   | <i>TS300</i> |
| Jauda, kW                      | 2 × 100                | 50                            | 2 × 16,9                  | 100                               | 29           |
| Uzturēšanas izmaksas, EUR gadā | 500                    | 100                           | 150                       | 100                               | 150          |
| Efektivitāte, %                | 87,7                   | 93,4                          | COP 3.1                   | 82,9                              | —            |

Pēc ikgadējo izmaksu aprēķināšanas saražotās enerģijas izmaksas ir noteiktas katrai enerģijas ražošanas sistēmai. Aprēķinātās saražotās enerģijas izmaksas redzamas 2.4. attēlā.



2.4. att. Aprēķinātās saražotās enerģijas izmaksas.

Tālāk padziļināti apskatīta granulu katla un saules kolektoru kombinētā sistēma. Ņemot vērā saules kolektoru saražotās enerģijas daudzumu un investīcijas, aprēķināts, ka gada vidējās izmaksas par saražoto enerģiju ir 234 EUR/MWh. Lai saprastu nepieciešamo saules kolektoru sistēmas efektivitātes pieaugumu un investīciju samazināšanās mērogu, apskatīta efektivitātes un saražotās enerģijas izmaksu sakarība, salīdzinot ar pārējām ražošanas sistēmām.



2.5. att. Dažādu siltumenerģijas ražošanas iekārtu un saules kolektoru sistēmas salīdzinājums.

Salīdzinājumā izmantotas piecas īpatnējās investīciju vērtības, no kurām 827,6 EUR/kW ir esošā situācija, lai noteiktu punktu, kurā saules kolektoru sistēmas saražotās enerģijas izmaksas sasniedz pārējo analizēto sistēmu saražotās enerģijas sistēmu izmaksas. Analizējot radīto grafiku, var noteikt, ka saules kolektoru efektivitātei jāsasniedz 32 % un to īpatnējām investīcijām jāsamazinās līdz 300 EUR/kW, lai sasniegtu pārējo sistēmu īpatnējās investīcijas. Šī brīža situācija rāda, ka uzstādīto saules kolektoru efektivitāte šobrīd pieaug un var sasniegt 50 %. Šādā gadījumā īpatnējām investīcijām jāsamazinās līdz 500 EUR/kW.

## 2.4. Daudzkritēriju analīzes rezultāti

Daudzkritēriju analīze, izmantojot *TOPSIS* metodiku, aprobēta centralizētās siltumapgādes sistēmā vienā no Latvijas pašvaldībām. Centralizētā siltumapgāde nodrošina apkuri un karsto ūdeni vairāk nekā 100 ēkām, kuru enerģijas gala patēriņš ir aptuveni 25 GWh un siltumapgādes tīkls ir 16 km garumā.

Izmantojot *TOPSIS* metodi, analizēti trīs dažādi vidēja termiņa attīstības scenāriji karstā ūdens nodrošināšanai vasarā. Lai analizētu piedāvātos scenārijus, izmantoti četri dažādi indikatori:

- investīcijas, EUR/kW;
- kurināmā izmaksas, EUR/MWh;
- emisijas,  $t_{CO_2}/MWh$ ;
- atbilstība valsts un pašvaldības plānošanas dokumentiem.

Ekspertu grupai tika lūgts noteikt iepriekš minēto indikatoru nozīmību, ņemot vērā, ka indikatoru svaru summai jābūt viens. Attīstības scenāriju izvērtējumam izvēlētie indikatori svāri parādīti 2.8. tabulā.

2.8. tabula

Izmantotie parametri attīstības scenāriju analīzē

|                                    | Investīcijas,<br>EUR/kW | Kurināmā izmaksas,<br>EUR/MWh | Emisijas,<br>$t_{CO_2}/MWh$ | Atbilstība plānošanas<br>dokumentiem |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Dabāsgāzes katls                   | 0                       | 23,4                          | 0,202                       | 0                                    |
| Šķeldas katls                      | 250                     | 18                            | 0                           | 1                                    |
| Saules kolektori ar<br>akumulāciju | 650                     | 0                             | 0                           | 1                                    |
| Svari                              | 0,3                     | 0,2                           | 0,35                        | 0,15                                 |

Investīcijas dabāsgāzes katlam ir 0 EUR/kW, jo šobrīd katlumājā jau ir esošs dabāsgāzes katls. Vislielākās investīcijas nepieciešamas, lai uzstādītu saules kolektoru ar akumulāciju. Vislielākās kurināmā izmaksas ir dabāsgāzei, un tās izmantošana nākotnē neatbilst valsts un pašvaldību plānošanas dokumentiem.

Atbilstoši *TOPSIS* aprēķinu metodoloģijai, kas raksturota 1.3. nodaļā, iegūtie rezultāti parādīti 2.9. tabulā.

2.9. tabula

*TOPSIS* aprēķinu rezultāti

|                                    | Pozitīvais ideālais<br>risinājums | Negatīvais ideālais<br>risinājums | Relatīvi pozitīvais ideālais<br>risinājums | Rangs |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-------|
| Dabāsgāzes katls                   | 0,270                             | 0,277                             | 0,506                                      | 2     |
| Šķeldas katls                      | 0,208                             | 0,248                             | 0,544                                      | 1     |
| Saules kolektori ar<br>akumulāciju | 0,292                             | 0,216                             | 0,425                                      | 3     |

Rezultāti liecina, ka analizētajā pašvaldības centralizētās siltumapgādes sistēmā vislabākais attīstības scenārijs ir uzstādīt šķeldas katlu, lai nodrošinātu karstā ūdens apgādi vasarā.

## 2.5. Emerģijas indikatoru modelis

Latvijas koģenerācijas stacijas emerģijas indikatori aprēķināti, balstoties uz 1.4. nodaļā aprakstītajiem vienādojumiem. Lai veiktu aprēķinus, izstrādāta koģenerācijas stacijas procesa shēma, nosakot analīzes robežas.

Emerģijas analīzes aprēķinu rezultāti ir šādi: atjaunojamo resursu emerģijas plūsma ir  $5,07 \cdot 10^{20}$  seJ gadā, neatjaunojamo resursu emerģijas plūsma ir  $4 \cdot 10^{18}$  seJ gadā, pakalpojumu emerģijas plūsma ir  $4,62 \cdot 10^{20}$  seJ gadā.

Aprēķinot apskatītā objekta svērto vidējo pārveides koeficientu un savienoto pārveides koeficientu, iegūts, ka svērtais vidējais pārveides koeficients ir  $4,18 \cdot 10^5$  seJ/J, savienotais pārveides koeficients ir  $4,1 \cdot 10^5$  seJ/J. Svērtais vidējais pārveides koeficients ir lielāks par savienoto pārveides koeficientu, tāpēc var secināt, ka resursi tiek izmantoti efektīvi.

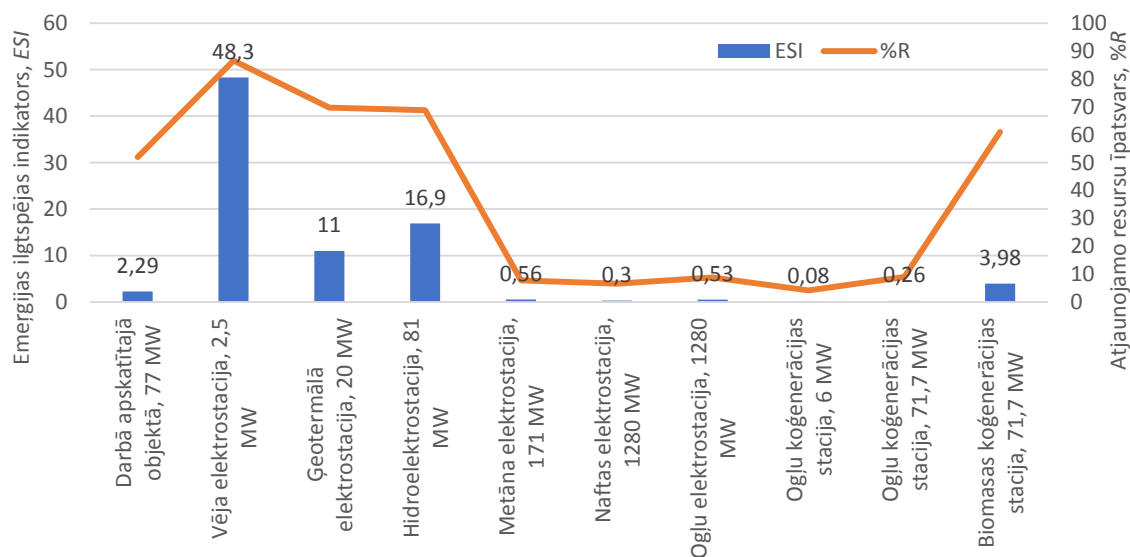
Mazu daļu no sistēmā ievadītajiem resursiem aizņem neatjaunojamie energoresursi, kas ievadīti tiešā veidā. Tomēr jāņem vērā, ka ievadīto resursu sadalījums rāda tiešā veidā ievadītos resursus. Lai nodrošinātu pakalpojumus, neatjaunojamus resursus izmanto arī netiešā veidā, piemēram, transportā, investīcijās, kas iekļauj objekta celtniecību, patērētajā elektroenerģijā, kur daļa ir ražota no neatjaunojamiem resursiem, u. c. Aprēķinātie emerģijas analīzes indikatori parādīti 2.10. tabulā.

2.10. tabula

Emerģijas analīzes indikatori

| Nosaukums                       | Apzīmējums | Vērtība              |
|---------------------------------|------------|----------------------|
| Emerģijas attiecība             | <i>EYR</i> | 2,11                 |
| Vides slodzes attiecība         | <i>ELR</i> | 0,92                 |
| Emerģijas ilgtspējas indekss    | <i>ESI</i> | 2,29                 |
| Emerģijas jaudas blīvums        | <i>ED</i>  | $3,89 \cdot 10^{16}$ |
| Atjaunojamo resursu izmantojums | %R         | 52,12                |
| Emerģijas investīciju attiecība | <i>EIR</i> | 0,9                  |

Emerģijas attiecība koģenerācijas stacijā ir 2,11. Šī indikatora vērtība liecina, ka sistēmā ir ievadīts liels daudzums pakalpojumu un iegūta sekundārā enerģija, kas atbilst emerģijas attiecības indikatora raksturojumam. Vides noslodzes attiecība ir zem vērtības 2, kas liecina, ka uz apkārtējo vidi nav lielas ietekmes, jo šajā objektā daudz izmanto atjaunojamo enerģiju. Emerģijas ilgtspējas indekss, kas ir emerģijas attiecības un vides noslodzes attiecības dalījums, ir lielāks par vērtību 1. Tas liecina, ka koģenerācijas stacijā saražotā enerģija ir ilgtspējīga, tomēr ir koģenerācijas stacijas, kur emerģijas ilgtspējas indekss ir augstāks.



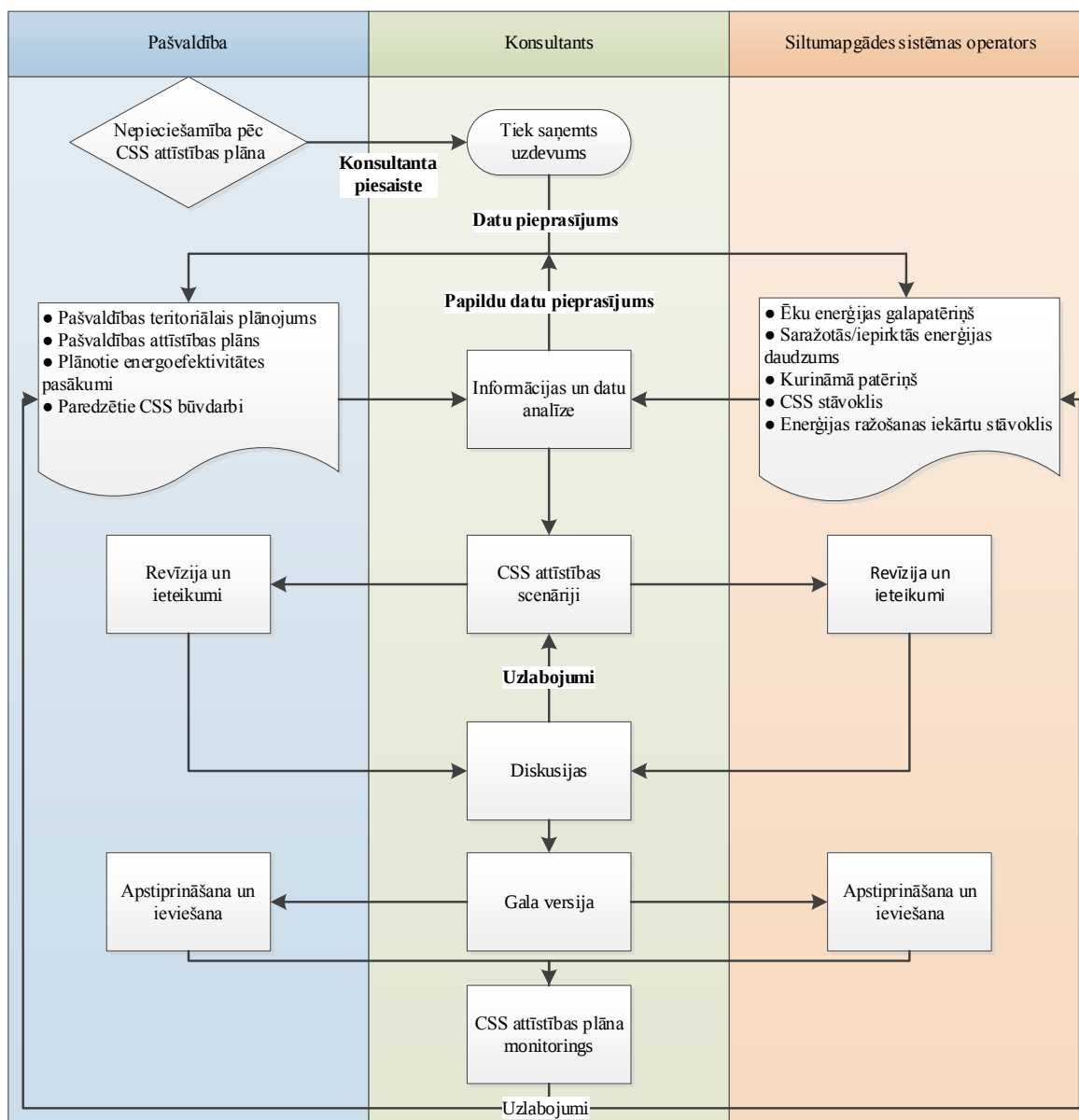
2.6. att. Emerģijas indikatoru salīdzinājums.

Salīdzinot darbā apskatīto koģenerācijas staciju ar citām enerģijas ražošanas sistēmām, redzams, ka enerģijas ražošanas sistēmās, kurās enerģijas ražošana nenotiek sadedzināšanas ceļā, emerģijas ilgtspējas indikators ir ievērojami lielāks, lai arī atjaunojamo resursu īpatsvars būtiski neatšķiras. Tomēr enerģijas ražošanas sistēmās, kur kā kurināmo izmanto neatjaunojamus resursus, emerģijas ilgtspējas indikators ir vairākas reizes zemāks.

## 2.6. Diskusija par pašvaldību energopārvaldības potenciālu

Energopārvaldība pašvaldībās ir kritiski nepieciešama enerģijas jomas sakārtošanai un attīstībai, lai sasniegtu valsts definētos mērķus enerģijas patēriņa samazināšanai, efektivitātes paaugstināšanai un atjaunojamo resursu īpatsvara palielināšanai ceļā uz klimatneitralitāti. Pašvaldībās nozīmīgu enerģijas galapatēriņa daļu veido siltumenerģijas patēriņš, tāpēc svarīga ir centralizētās siltumapgādes attīstības plāna izstrāde.

Lai sagatavotu veiksmīgu centralizētās siltumapgādes attīstības plānu, ļoti svarīga ir iesaistīto pušu sadarbība, nodrošinot nepieciešamās informācijas efektīvu apmaiņu, kā arī iesaistīto pušu atbildības noteikšana. Visu iesaistīto pušu darbībām jābūt noteiktām, lai izvēlēto attīstības scenāriju izvērtējums būtu optimāls. Lai sāktu attīstības plāna izstrādes procesu, nepieciešams pašvaldības lēmums par CSA sistēmas attīstības plāna izstrādi. Pēc lēmuma pieņemšanas jāatrod enerģētikas konsultants un jānosaka veicamie uzdevumi. Lai sasniegtu optimālu rezultātu, nepieciešamie uzdevumi jāizstrādā, piedaloties visām iesaistītajām pusēm.



2.7. att. Izstrādātais attīstības scenāriju izvērtējuma algoritms.

Pēc uzdevumu apstiprināšanas konsultants izstrādā plānu, kā sasniegtami rezultāti, kā arī pieprasa nepieciešamos datus no pašvaldības un CSS operatora. Pašvaldībai jāsniedz informācija par plānotajiem energoefektivitātes pasākumiem, plānoto potenciālo siltumapgādes sistēmas lietotāju pieaugumu, būvējot jaunas ēkas, jāsniedz piekļuve teritoriālajam plānojumam un attīstības un rīcības plānam. CSS operators sniedz informāciju par enerģijas ražošanu, karstā ūdens un apkures galapatēriņu, izmantoto kurināmo un CSS stāvokli.

Sekojoš izstrādātajam algoritmam, iespējams izveidot ilgtspējīgu CSA attīstības plānu, tajā iestrādājot ilgtspējīgus siltumapgādes indikatorus.

## SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

Promocijas darbā, izmantojot dažādas metodes, veikts siltumapgādes sistēmas ilgtspējas indikatoru izvērtējums, skatot tos kontekstā ar Latvijas definēto mērķi sasniegt klimatneitralitāti līdz 2050. gadam. Lai arī literatūrā jau ir piedāvāti dažādi siltumapgādes ilgtspējas indikatori, darbā veikta šo indikatoru papildu analīze, piedāvājot jaunus risinājumus un lietojuma veidus, aprobējot tos Latvijā esošās siltumapgādes sistēmās.

Darbā apskatīti siltumenerģijas ražošanas efektivitātes aprēķini, tos balstot uz dūmgāzu kondensatora piemēra. Apskatīti trīs dažādi efektivitātes aprēķina veidi, norādot to izmantošanas priekšrocības un trūkumus. Dūmgāzu kondensatora efektivitātes kā kondensatora un katla jaudas attiecības vērtības ir izmantojamas uzstādītās jaudas un slodzes plānošanai, taču tās nenorāda kopējās siltumenerģijas ražošanas iekārtas efektivitātes pieaugumu. Gadījumā, kad dūmgāzu kondensators ir siltumenerģijas ražošanas sistēmas daļa, reprezentējošāku rezultātu dos efektivitātes aprēķins, izmantojot augstāko sadegšanas siltumu, kas ļauj aprēķināt kurināmā patēriņa samazinājumu. Augstākais sadegšanas siltums efektivitātes aprēķinā jāizmanto arī tad, ja dūmgāzu kondensatoru uzskata par atsevišķu siltumenerģijas ražošanas iekārtu.

Darbā apskatīta divu un vairāku faktoru regresijas analīze, veicot dūmgāzu kondensatora parametru analīzi, kā arī saules kolektoru efektivitātes novērtējumu. Ar vairāku faktoru regresijas analīzes metodiku izstrādāts empīrisks modelis optimālai dūmgāzu kondensatora darbināšanai. Izstrādātais modelis raksturo 84,4 % dūmgāzu kondensatora mainīgumu, nosakot statistiski nozīmīgus neatkarīgos parametrus. Izmantojot šo aprēķina modeli un analizējot neatkarīgo mainīgo vērtības, iespējams paaugstināt dūmgāzu kondensatora jaudu un tādējādi palielināt siltumenerģijas ražošanas sistēmas darbības efektivitāti.

Enerģijas lietotāju līmenī apskatītas lokālās siltumenerģijas ražošanas iekārtas, vērtējot to ekonomiskos parametrus. Darbā noteiktas optimālās saules kolektoru uzstādīšanai nepieciešamās investīcijas atkarībā no kolektoru efektivitātes, salīdzinot ar citām lokālās siltumenerģijas ražošanas sistēmām. Ja investīcijas ir 300 EUR/kW, saules kolektoru efektivitātei jābūt 35 %, lai to uzstādīšana būtu izdevīgāka nekā siltumsūkņa un granulu katla izmantošana. Sasniedzot efektivitāti 45 %, saules kolektoru izmantošana gada griezumā ir efektīvāka nekā citi analizētie lokālie siltumenerģijas avoti.

Darbā veikta Latvijā esošās centralizētas siltumapgādes sistēmas daudzkritēriju analīze, izvērtējot dažādus energoavota uzstādīšanas attīstības scenārijus. Iekļaujot četrus dažādus indikatorus, analizēti trīs energoavota veidi, izmantojot *TOPSIS* metodi. Rezultāti rāda, ka konkrētās centralizētās siltumapgādes sistēmas gadījumā vislabākais risinājums ir uzstādīt jaunu šķeldas kalnu.

Izstrādājot emerģijas modeļa aprēķinu Latvijā esošai koģenerācijas stacijai, noteikta tās ievadītā emerģijas plūsma un saražotās siltumenerģijas un elektroenerģijas pārveides koeficients ( $3,46 \cdot 10^5$  seJ/J un  $5,59 \cdot 10^5$  seJ/J). Papildus aprēķināti emerģijas indikatori. Koģenerācijas stacijas emerģijas ilgtspējas indikators ir 2,29, un atjaunojamo resursu īpatsvars ir 52,1 %.

Pašvaldības energopārvaldības kontekstā izstrādāta un aprobēta centralizētās siltumapgādes sistēmas attīstības plāna izstrādes metodika. Noteikta arī iesaistīto pušu atbildība un veicamie uzdevumi veiksmīga plāna izstrādei, kas ir pamats pašvaldības siltumapgādes jomas sakārtošanai.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Eiropas Komisija, *Tīru planētu -- visiem! Stratēģisks Eiropas ilgtermiņa redzējums par pārticīgu, modernu, konkurētspējīgu un klimatneitrālu ekonomiku*. 2018.
- [2] Eiropadome, "Jauna stratēģiskā programma 2019.–2024. gadam," 2019.
- [3] Eiropas Komisija, *EIROPAS PARLAMENTA UN PADOMES REGULA ar ko izveido klimatneitralitātes panākšanas satvaru un groza Regulu (ES) 2018/1999 (Eiropas Klimata akts)*. Brisele, 2020.
- [4] Eiropas Komisija, "Eiropas zaļais kurss," p. 24, 2019, [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_lv](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_lv).
- [5] Eiropas Komisija, "A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives," *Eur. Comm.*, vol. COM(2020), pp. 1–26, 2020.
- [6] Eiropas Komisija, "Eiropas 2030. gada klimatisko ieceru vērēna kāpināšana. Investīcijas klimatneitrālā nākotnē cilvēku labā," 2020.
- [7] The Ministry of Economic Affairs, "Latvijas nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021. – 2030. gadam," vol. 19122018, no. 2, 2018.
- [8] VARAM, "Stratēģija Latvijas oglekļa mazietilpīgai attīstībai līdz 2050 . gadam," 2019.
- [9] D. Blumberga, I. Veidenbergs, F. Romagnoli, C. Rochas, and A. Žandekis, *Bioenerģijas tehnoloģijas*. Rīga, 2011.
- [10] D. Blumberga, *Energoefektivitāte*. Rīga: Apgāds "Pētergailis," 1996.
- [11] S. Humpage, "An introduction to regression analysis," *Sensors (Peterborough, NH)*, vol. 17, no. 9, pp. 68–74, 2000, doi: 10.1002/9781118267912.ch6.
- [12] M. M. Mukaka, "Statistics Corner: A Guide to Appropriate Use of Correlation Coefficient," *Malawi Med. J.*, vol. 24, no. 3, pp. 69–71, 2012, [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23638278/>.
- [13] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and V. G. G., *Intruduction to linear regression analysis*, 5th ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [14] G. K. Uyanik and N. Güler, "A Study on Multiple Linear Regression Analysis," *Procedia – Soc. Behav. Sci.*, vol. 106, pp. 234–240, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.12.027.
- [15] Statgraphichs Centurion manual XVI, "Multiple regression." pp. 1–27, 2009.
- [16] H. J. Seltman, *Experimental Design and Analysis*. 2018.
- [17] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*. 1981.
- [18] H. T. Odum, *Environmental accounting: emergy and environment decision making*. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [19] M. T. Brown and S. Ulgiati, "Emergy analysis and environmental accounting," *Encyclopedia of Energy*. pp. 329–354, 2004.
- [20] M. T. Brown and S. Ulgiati, "Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation." 1997.
- [21] M. T. Brown and S. Ulgiati, "Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation," *Ecol. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 51–69, 1997.