



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Armands Grāvelsiņš

ELEKTROENERĢIJAS UN SILTUMENERĢIJAS SEKTORU SASAISTE – IESPĒJA SILTUMAPGĀDES ATTĪSTĪBAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Armands Grāvelsiņš

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorants

**ELEKTROENERĢIJAS UN SILTUMENERĢIJAS
SEKTORU SASAISTE – IESPĒJA
SILTUMAPGĀDES ATTĪSTĪBAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
profesore *Dr. sc. ing.*
ANDRA BLUMBERGA

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Grāvelsiņš, A. Elektroenerģijas un siltumenerģijas sektoru sasaiste – iespēja siltumapgādes attīstībai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2021. gada 16. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 138.

Darbs izstrādāts saistībā ar šādiem projektiem:

- Ziemeļvalstu Enerģētikas pētniecības projekts “*Flex4RES*”, Nr. 2156;
- valsts pētījumu programmas projekts “Latvijas atjaunojamo energoresursu ražošanas un izmantošanas ekonomiskā potenciāla novērtējums un politikas rekomendāciju izstrāde”, Nr. VPP-EM-2018/AER_1_0001;
- valsts pētījumu programmas projekts “Latvijas siltumapgādes un dzesēšanas sistēmu attīstība”, Nr. VPP-EM-EE-2018/1-0002.



Vāka attēls Elīna Grāvelsiņa

<https://doi.org/10.7250/9789934226625>

ISBN 978-9934-22-662-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2021. gada 26. augustā plkst 14 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Pētniece *Dr. sc. ing.* Anna Volkova,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Profesors *Ph. D.* Stelios Rozakis,
Krētas Tehniskā universitāte, Grieķija

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.

Armands Grāvelsiņš (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 75 attēli, 12 tabulas, kopā 210 lappuses. Literatūras sarakstā ir 157 nosaukumi.

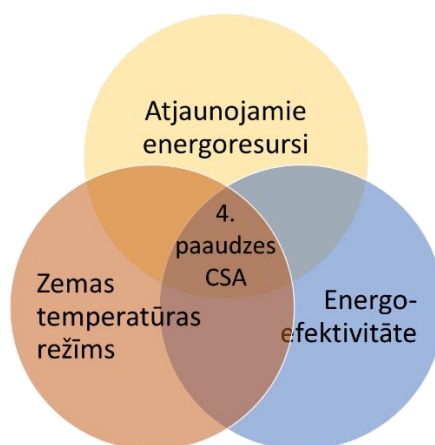
SATURS

IEVADS	5
Darba aktualitāte.....	6
Darba hipotēze.....	7
Darba mērķis un uzdevumi.....	7
Zinātniskā novitāte	7
Praktiskā nozīme	7
Zinātniskā darba aprobācija.....	8
Citas zinātniskās publikācijas	9
Zinātniskā darba aprobācija zinātniskajās konferencēs	10
Citi ziņojumi zinātniskajās konferencēs	11
Monogrāfijas	11
Darba struktūra un apjoms.....	12
1. PĒTĪJUMA METODIKA	14
1.1. Siltumapgādes sistēmas modelēšana.....	14
1.1.1. Nacionālā līmeņa modelis.....	14
1.1.2. Lokālas sistēmas gadījuma izpēte	16
1.2. Elektroapgādes sektora elastības modelēšana.....	18
1.2.1. Sektoru sasaiste nacionālajā līmenī	19
1.2.2. Sektoru sasaiste lokālajā līmenī	21
2. REZULTĀTI.....	23
2.1. Siltumapgādes sistēmas modelēšana.....	23
2.1.1. Nacionālā līmeņa modelis.....	23
2.1.2. Lokālas sistēmas gadījuma izpēte	27
2.2. Elektroapgādes sektora elastība	29
2.2.1. Sektoru sasaiste nacionālajā līmenī	31
2.2.2. Sektoru sasaiste lokālajā līmenī	35
SECINĀJUMI.....	39
LITERATŪRAS SARAKSTS	41

IEVADS

Globāli gandrīz 80 % saražotās enerģijas nāk no fosilajiem resursiem, kas veicina klimata pārmaiņas, ūdens un gaisa piesārņojumu, kā arī dabas resursu izsmelšanu. Individuālā un centralizētā siltumapgāde (CSA), ražojot siltumenerģiju dzīvojamo ēku apsildīšanai un karstā ūdens sagatavošanai, ir atbildīgas par daļu no enerģētikas emisijām [1]. Arī elektroenerģijas ražošanas sektors ir atbildīgs par emisiju radīšanu. Eiropas Savienība (ES) apzinās, ka klimata pārmaiņu mazināšana ir viens no galvenajiem izaicinājumiem, kas jāpārvar, lai nodrošinātu ilgtspējīgu Eiropas izaugsmi, tāpēc ES ir definējusi ambiciozus mērķus dekarbonizācijas veicināšanai un mērķtiecīgi virzās atjaunojamās enerģijas ieviešanas virzienā [2].

Līdzīgi kā citas enerģētikas sistēmas daļas, arī CSA ir pārmaiņu priekšā. Pēdējās desmitgades laikā aizvien lielāka pētnieku uzmanība ir pievērsta ceturtais paaudzes CSA sistēmas attīstīšanai. Ar ceturtais paaudzes CSA konceptu pirmo reizi iepazīstināja Henriks Lunds [3], un pēdējo gadu laikā tas ir attīstījies vēl tālāk, jaunākajos pētījumos jau ir runa par īpaši zemas temperatūras CSA jeb piektās paaudzes CSA konceptu. Galvenie elementi, kas raksturo ceturtais paaudzes CSA sistēmu, ir atjaunojamie energoresursi, zemas temperatūras siltumnesējs, kā arī siltumenerģijas galapatērētāju energoefektivitāte (1. att.).

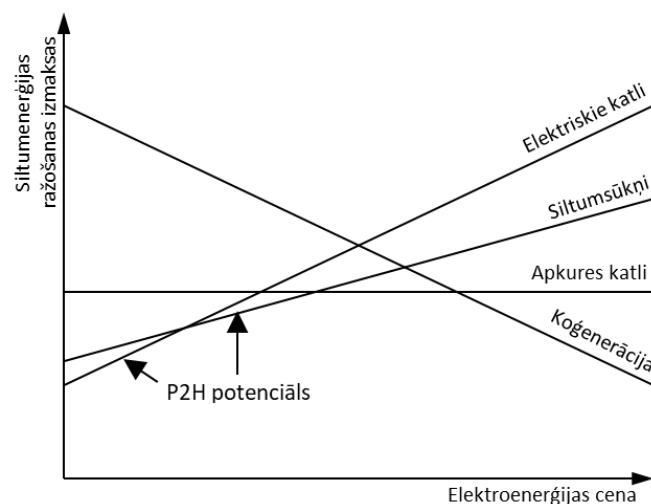


1. att. Galvenie ceturtais paaudzes CSA sistēmas elementi.

Viens no elektroapgādes sektora izaicinājumiem, ko rada dekarbonizācijas mērķi, ir nepieciešamība sasniegt augstu mainīgo atjaunojamo energoresursu (AER) īpatsvaru, tostarp vēja un saules tehnoloģiju. Šiem energoresursiem ir augsta nenoteiktības pakāpe [4]. Lai sasniegtu 100 % atjaunojamu elektroapgādes sektoru, ir jāievieš dažādi elastību veicinoši pasākumi, tā risinot jautājumus, kas saistīti ar ražošanas un patēriņa slodžu sabalansēšanu [5]. Kamēr atjaunojamās enerģijas īpatsvars ir zems, ar fosilās enerģijas tehnoloģijām ir iespējams strauji reaģēt uz elektroenerģijas pieprasījuma izmaiņām, taču, atjaunojamās enerģijas īpatsvaram pieaugot, starpība starp saražoto un patērēto elektroenerģiju pieaug, radot sistēmas elastības problēmas [6]. Ir noteikta robeža, līdz kurai iespējams integrēt atjaunojamās enerģijas tehnoloģijas pašreizējā tehnoloģiskajā un institucionālajā ietvarā. Nav vienas noteiktas vērtības, kas raksturotu visas valstis, jo katrā valstī eksistējošās sistēmas tehnoloģiskās nianse atšķiras. Tomēr pētnieki norāda, ka nav tehnoloģisku šķēršļu

atjaunojamās enerģijas integrēšanai elektroapgādē līdz pat 35 % [7]. Ir vairāki veidi, kā paaugstināt sistēmas spēju pielāgot ražošanas apjomu elektroenerģijas patēriņam, piemēram, akumulēt elektroenerģiju izmantošanai pīķa slodžu brīžos, izmantot energopatērētāju pārvaldības risinājumus, lai salāgotu elektroenerģijas ražošanu ar patēriņu, kā arī pārvērst elektroenerģiju citos enerģijas veidos [8].

Sektoru sasaiste, īpaši elektroapgādes un siltumapgādes sektoru, var sniegt abpusēju labumu. Elektroapgādes sektorā būtu iespējams paaugstināt elektroenerģijas ražošanas apjomu no AER, neuztraucoties par to, kur likt elektroenerģijas pārpalikumus, jo tos varētu pārvērst siltumenerģijā. Siltumenerģijas sektors turpretī tiktu pie lētākas elektroenerģijas, kas pieejama brīžos, kad veidojas elektroenerģijas pārpalikums, un varētu to izmantot, lai ražotu siltumenerģiju ar siltumsūkņiem vai ļoti zemas cenas gadījumā – pat elektriskajiem katliem (2. att.).



2. att. Elektroenerģijas cenas ietekme uz dažādu tehnoloģiju siltuma ražošanas izmaksām [9].

Sektoru sasaiste ļautu abiem sektoriem paaugstināt AER īpatsvaru, tādējādi veicinot ES definēto mērķu sasniegšanu, un tuvinātu energosistēmu oglekļa neitralitātei. Lai arī elektroapgādes un siltumapgādes sektoru sasaiste var sniegt labumu abām sistēmām, visticamāk, ar to nebūs pietiekami, lai pilnībā atrisinātu elektroapgādes sistēmas elastības jautājumus.

Darba aktualitāte

Enerģētikas sektors ir viens no lielākajiem piesārņotājiem pasaulē, tostarp arī Latvijā. Emisijas no fosilo kurināmo sadedzināšanas enerģētikas sektorā veido 65,5 % no Latvijas kopējām siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijām 2018. gadā. Enerģētika iekļauj gan centralizēto, gan decentralizēto enerģijas ražošanu, kā arī transporta sektoru.

2019. gada beigās Eiropas Komisija (EK) prezentēja Eiropas Zaļo kursu – politikas iniciatīvu kopumu ar visaptverošu mērķi līdz 2050. gadam padarīt Eiropu klimatneitrālu. Tas nozīmē, ka visām ES dalībvalstīm ir jākļūst klimatneitrālām. Lai sasniegtu šo mērķi, ir būtiski jāsamazina emisijas visos sektoros.

Lai varētu izlemt par vislabāko energosektora pārveides ceļu un pieņemt pamatotus un ilgtspējīgus lēmumus, nepieciešami rīki, kas palīdzētu atbildēt uz jautājumu, kā energosistēma

varētu attīstīties nākotnē. Enerģētikas sektors ir kompleksa sistēma ar daudziem būtiskiem elementiem, nelinearitātēm un atgriezeniskajām saitēm, ko cilvēka prātam ir grūti apstrādāt. Tāpēc ir nepieciešami matemātiski simulācijas rīki, kas politikas veidotājiem var palīdzēt izstrādāt ekonomiski pamatotas, sociāli taisnīgas un ilgtspējīgas politikas.

Darba hipotēze

Promocijas darba hipotēze: elektroapgādes sektora attīstība, meklējot risinājumus atjaunojamās enerģijas īpatsvara palielināšanai, var kļūt par virzītājspēku siltumapgādes sektora elektrifikācijā un atjaunojamās enerģijas īpatsvara paaugstināšanā.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt enerģētikas sektora siltumapgādes un elektroapgādes sistēmu simulācijas modeļus, ar kuriem būtu iespējams modelēt dažādu līmeņu sistēmas, kā arī novērtēt dažādu parametru un politikas instrumentu ietekmi uz sistēmas darbību. Modelim jāspēj analizēt elektroapgādes un siltumapgādes sektoru sasaistes ietekme abos sektoros.

Galvenie uzdevumi:

- izstrādāt sistēmdinamikas modeļa struktūru siltumapgādes sistēmas attīstības modelēšanai;
- analizēt siltumapgādes sistēmu gan nacionālā, gan lokālā mērogā;
- izvērtēt elektroapgādes sektora elastības nozīmīgumu sistēmas attīstībā;
- energosistēmas modelī iestrādāt sektoru sasaistes elementus;
- analizēt sektoru sasaisti kā elektroapgādes sistēmas elastību veicinošu pasākumu gan nacionālā, gan lokālā mērogā.

Zinātniskā novitāte

Promocijas darbā piedāvāta metode, kā modelēt un analizēt elektroapgādes sistēmas elastību un tās attīstību. Elektroapgādes sistēmas elastības celšana ir būtisks nosacījums, lai būtu iespējams elektroapgādes sistēmā integrēt augstu mainīgās atjaunojamās enerģijas (vējš, saule) daļu. Metode piedāvā skatīties uz sistēmas elastības attīstību kā pakāpienveida procesu, kur mainīgo atjaunojamo resursu pieaugums elektroapgādē izdara spiedienu uz pastāvošo sistēmu, un liek meklēt inovatīvus risinājumus, lai sistēmu pielāgotu jaunajiem apstākļiem.

Izstrādātie rīki ļauj izvērtēt energosistēmu dažādos mērogos – lokālā, reģionālā un nacionālā. Tie ļauj analizēt dažādas tehnoloģijas un to potenciālu. Ir iespējams izvērtēt dažādu politikas instrumentu īstermiņa un ilgtermiņa ietekmi uz sistēmas uzvedību.

Praktiskā nozīme

ES definētie energoefektivitātes un atjaunojamās enerģijas mērķi ir ļoti ambiciozi. Eiropa plāno sasniegt klimatneitralitāti 2050. gadā, taču, lai pārveidotu enerģētikas sektoru

ilgtspējīgā veidā, ir jāanalizē ne tikai visa sistēma kopumā, bet arī katra tās daļa atsevišķi. Pētījumam ir augsta praktiskā nozīmība, jo tas identificē un izvērtē dažādus tehnoloģiju tehniskos un ekonomiskos aspektus, kā arī izvērtē sektoru sasaistes ietekmi uz elektroapgādes un siltumapgādes sistēmu.

Piedāvāto metodiku un iegūtos rezultātus politikas veidotāji var izmantot, lai pieņemtu pamatotus lēmumus politiku izstrādē, kas veicinātu enerģētikas sektora attīstību nacionālā mērogā. Pētījums var būt noderīgs arī pašvaldību pārstāvjiem reģionu attīstības plānošanai, kā arī CSA uzņēmumiem, lai izvēlētos tehnoloģijas.

Zinātniskā darba aprobācija

1. Ziemele, J., Gravelsins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. The Effect of Energy Efficiency Improvements on the Development of 4th Generation District Heating (2016) *Energy Procedia*, 95, pp. 522–527.
2. Ziemele, J., Gravelsins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. Sensitivity analysis of district heating system model for transition from fossil fuel to renewable energy sources (2016) *ECOS 2016 – Proceedings of the 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.
3. Ziemele, J., Gravelsins, A., Blumberga, A., Vigants, G., Blumberga, D. System dynamics model analysis of pathway to 4th generation district heating in Latvia (2016) *Energy*, 110, pp. 85–94.
4. Ziemele, J., Gravelsins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. Combining energy efficiency at source and at consumer to reach 4th generation district heating: Economic and system dynamics analysis (2017) *Energy*, 137, pp. 595–606.
5. Ziemele, J., Gravelsins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. Sustainability of heat energy tariff in district heating system: Statistic and dynamic methodologies (2017) *Energy*, 137, pp. 834–845.
6. Gravelsins, A., Bazbauers, G., Blumberga, A., Blumberga, D., Bolwig, S., Klitkou, A., Lund, P. Modelling Energy Production Flexibility: System Dynamics Approach. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 147, pp. 503–509.
7. Blumberga, A., Cilinskis, E., Gravelsins, A., Svarckopfa, A., Blumberga, D. Analysis of Regulatory Instruments Promoting Building Energy Efficiency. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 147, pp. 258–267.
8. Tukulis, A., Pakere, I., Gravelsins, A., Blumberga, D. Methodology of system dynamic approach for solar energy integration in district heating. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 147, pp. 130–136.
9. Gravelsins, A., Pakere, I., Tukulis, A., Blumberga, D. Solar power in district heating. P2H flexibility concept. *Energy*, 2019, Vol. 181, pp. 1023–1035.
10. Gravelsins, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Bazbauers, G. Power sector flexibility through power-to-heat and power-to-gas application – system dynamics approach. *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23 (3), pp. 319–332.

11. Bolwig, S., Bazbauers, G., Klitkou, A., Lund, P. D., Blumberga, A., Gravelins, A., Blumberga, D. Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 101, pp. 440–452.
12. Lund, P. D., Skytte, K., Bolwig, S., Bolkesjö, T. F., Bergaentzlé, C., Gunkel, P. A., Kirkerud, J. G., Klitkou, A., Koduvere, H., Gravelins, A., Blumberga, D., Söder, L. Pathway analysis of a zero-emission transition in the Nordic-Baltic region. *Energies*, 2019, Vol. 12 (17), 3337.
13. Pakere, I., Gravelins, A., Lauka, D., Bazbauers, G., Blumberga, D. Linking energy efficiency policies toward 4th generation district heating system. *Energy*, 2021.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Rozentale, L., Mo, G. B., Gravelins, A., Rochas, C., Blumberga, D. System dynamics modelling of railway electrification in Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, 24 (2), pp. 247–257.
2. Feofilovs, M., Romagnoli, F., Gravelins, A. System Dynamics Model for Natural Gas Infrastructure with Storage Facility in Latvia. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 147, pp. 549–557.
3. Feofilovs, M., Gravelins, A., Pagano A. J., Romagnoli, F. Increasing Resilience Of The Natural Gas System With Implementation Of Biomethane In The Context Of Latvia: A System Dynamics Model. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 158, pp. 3944–3950.
4. Biseniece, E., Freimanis, R., Purvins, R., Gravelins, A., Pumpurs, A., Blumberga, A. Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation (2018) *Environmental and Climate Technologies*, 22 (1), pp. 22–41.
5. Blumberga, A., Bazbauers, G., Davidsen, P.I., Blumberga, D., Gravelins, A., Prodanuks, T. System dynamics model of a biotechonomy (2018) *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 4018–4032.
6. Ziemele, J., Cilinskis, E., Zogla, G., Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. Impact of economical mechanisms on CO2 emissions from non-ETS district heating in Latvia using system dynamic approach (2018) *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 9 (2), pp. 111–121.
7. Gravelins, A., Muizniece, I., Blumberga, A., Blumberga, D. Economic sustainability of pellet production in Latvia (2017) *Energy Procedia*, 142, pp. 531–537.
8. Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Muizniece, I. Economic analysis of wood products: System dynamics approach (2017) *Energy Procedia*, 128, pp. 431–436.
9. Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Muizniece, I. Economic analysis of wood products: System dynamics approach (2017) *Energy Procedia*, 128, pp. 431–436.
10. Blumberga, D., Indzere, Z., Muizniece, I., Blumberga, A., Bazbauers, G., Gravelins, A. Why Bioeconomy is Actual for Latvia. *Research Achievements in Institute of Energy Systems and Environment* (2017) *Energy Procedia*, 113, pp. 460–465.

11. Ziemele, J., Gravelins, A., Blumberga, D. Decomposition Analysis of District Heating System based on Complemented Kaya Identity (2015) *Energy Procedia*, 75, pp. 1229–1234.

Zinātniskā darba aprobācija zinātniskajās konferencēs

1. Bolwig, S., Bazbauers, G., Klitkou, A., Lund, P. D., Blumberga, A., Gravelins, A., Blumberga, D. “Modelling energy transitions pathways”. *9th International Sustainability Transitions Conference “IST 2018”*, United Kingdom, Manchester, June 12–14, 2018.
2. Tukulis, A., Pakere, I., Gravelins, A., Blumberga, D. “Methodology of system dynamic approach for solar energy integration in district heating”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2018”*, Latvia, Riga, May 16–18, 2018.
3. Blumberga, A., Cilinskis, E., Gravelins, A., Svarckopfa, A., Blumberga, D. “Analysis of Regulatory Instruments Promoting Building Energy Efficiency”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2018”*, Latvia, Riga, May 16–18, 2018.
4. Gravelins, A., Blumberga, A. “Two energy sector modelling approaches. BALMOREL and system dynamic model”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2018”*, Latvia, Riga, May 16–18, 2018.
5. Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Bazbauers, G. “Power sector flexibility through power-to-heat and power-to-gas application – system dynamics approach”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2019”*, Latvia, Riga, May 15–16, 2019.
6. Pakere, I., Gravelins, A., Lauka, D., Bazbauers, G., Blumberga, D. “Linking energy efficiency policies toward 4th generation district heating system”. *6th International Conference on Smart Energy Systems*, Denmark, Aalborg, October 6–7, 2020.
7. Blumberga, A., Bazbauers, G., Gravelins, A., Blumberga, D. “Application of system dynamics for design of national energy and climate plan”. *38th International Conference of the System Dynamics Society*, Norway, Bergen, July 19–24, 2020.
8. Ziemele, J., Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. “The effect of energy efficiency improvements on the development of fourth generation district heating”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2015”*, Latvia, Riga, October 14–16, 2015.
9. Ziemele, J., Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. “System Dynamics Model Analysis of Pathway to 4th Generation District Heating Systems in the Baltic States”. *International Conference on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating*, Denmark, Copenhagen, August 25–26, 2015.
10. Ziemele, J., Chernovska, L., Gravelins, A., Blumberga, A., Blumberga, D. “Development of heat saving platform in the system dynamics model for transition to 4th generation district heating”. *2nd International Conference on Smart Energy*

Systems and 4th Generation District Heating, Denmark, Aalborg, September 27–28, 2016.

Citi ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. Rozentale, L., Mo, G. B., Gravelins, A., Rochas, C., Blumberga, D. “System dynamics modelling of railway electrification in Latvia”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2020”*, Latvia, Riga, May 13–15, 2020.
2. Feofilovs, M., Gravelins, A., Pagano A. J., Romagnoli, F. “Increasing Resilience Of The Natural Gas System With Implementation Of Biomethane In The Context Of Latvia: A System Dynamics Model”. *10th International Conference on Applied Energy “ICAE2018”*, China, Hong Kong, August 22–25, 2018.
3. Feofilovs, M., Romagnoli, F., Gravelins, A. “System dynamics model for natural gas infrastructure with storage facility”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2018”*, Latvia, Riga, May 16–18, 2018.
4. Cilinskis, E., Blumberga, D., Gravelins, A., Blumberga, A. “Three targets in energy transition. Influence of policy tools”. *International scientific conference of Environmental and Climate Technologies “CONNECT 2019”*, Latvia, Riga, May 15–16, 2019.
5. Blumberga, A., Bazbauers, G., Gravelins, A. “Lessons from 10 Years Policy Design in the Energy Efficiency Sector”. *38th International Conference of the System Dynamics Society*, Norway, Bergen, July 19–24, 2020.

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., Prodanuks, T., Kirsanovs, V. *Sustainable Energy Sources*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 146 p. ISBN 978-9934-22-017-3.
2. Barisa, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Gušča, J., Lauka, D., Kārklīņa, I., Muižniece, I., Pakere, I., Priedniece, V., Romagnoli, F., Rošā, M., Seļivanovs, J., Soloha, R., Veidenbergs, I., Vīgants, E., Vīgants, Ģ., Ziemele, J. *Energy System Analysis and Modeling*. Rīga: RTU Press, 2018. 144 p. ISBN 978-9934-22-037-1.
3. Āboltiņš, R., Bariss, U., Blumberga, A., Blumberga, D., Cilinskis, E., Feofilovs, M., Grāvelsiņš, A., Kuzņecova, T., Lupkina, L., Muižniece, I., Rochas, C., Romagnoli, F. *Climate Engineering and Policy*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 204 p. ISBN 978-9934-22-102-6.
4. Blumberga, A., Bažbauers, G., Davidsens, P., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Prodanuks, T. *System Dynamic Modelling in Bioeconomy Sector*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. 332 lpp. ISBN 978-9934-10-801-3.

Darba struktūra un apjoms

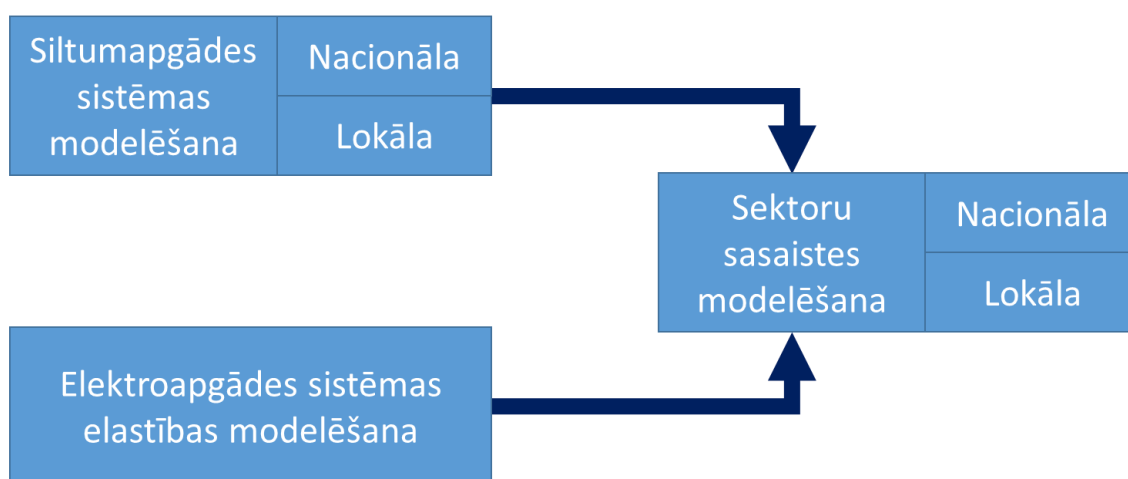
Promocijas darbs balstīts septiņās tematiski saistītās zinātniskajās publikācijās, kas ir prezentētas un to rezultāti aprobēti vairākās zinātniskajās konferencēs. Visi zinātniskie raksti pieejami starptautiski indeksētās datubāzēs. Promocijas darbā izmantotās publikācijas apkopotas 1. tabulā.

1. tabula

Promocijas darbā izmantotās zinātniskās publikācijas

Metodikas solis	Nr.	Publikācijas nosaukums
1. Siltumapgādes sistēmas attīstība – valsts mērogā	1	<i>System dynamics model analysis of pathway to 4th generation district heating in Latvia</i>
	2	<i>Linking energy efficiency policies toward 4th generation district heating system</i>
2. Siltumapgādes sistēmas attīstība – lokālā mērogā	3	<i>Combining energy efficiency at source and at consumer to reach 4th generation district heating</i>
3. Elektroapgādes elastības modelēšana	4	<i>Modelling Energy Production Flexibility: System Dynamics Approach</i>
4. Sektoru sasaiste – valsts mērogā	5	<i>Power sector flexibility through power-to-heat and power-to-gas application – system dynamics approach</i>
5. Sektoru sasaiste – lokālā mērogā	6	<i>Solar power in district heating. P2H flexibility concept</i>
6. Diskusija pār tālākajiem elektroapgādes modelēšanas soļiem	7	<i>Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility</i>

Publikācijās aprakstīta metodika siltumapgādes un elektroapgādes sistēmas virzīšanai uz oglekļa neitralitāti, iekļaujot siltumapgādes un elektroapgādes sektoru savstarpēju sasaisti. Publikācijās apskatītas gan nacionāla, gan lokāla mēroga sistēmas. Darba struktūra redzama 3. attēlā.



3. att. Promocijas darba struktūra.

Promocijas darbā ir ievads un piecas nodaļas:

- literatūras apskats;
- pētījuma metodika;
- rezultāti;
- diskusija;
- secinājumi.

Promocijas darba ievadā norādīts darba mērķis, zinātniskā un praktiskā nozīme, kā arī pārskats par publicētajiem pētījumiem un to aprobāciju dažādās zinātniskajās konferencēs. Šī nodaļa iekļauj pārskatu arī par monogrāfijām un publikācijām, kas atspoguļo autora veikumu citās pētniecības jomās.

Pirmā nodaļa iekļauj literatūras apskatu par energosistēmas pārveidošanas nozīmību, ietverot informāciju par ceturtās paaudzes CSA, ilgtspējīgu elektroapgādes sistēmu un ar to saistītos elastības jautājumus. Otrajā nodaļā aprakstīta metodika siltumapgādes un elektroapgādes sektoru ilgtspējīgas attīstības un savstarpējās sasaistes modelēšanai. Rezultātu nodaļa sniedz ieskatu siltumapgādes sistēmas attīstībā, elektroapgādes sistēmas elastības veicināšanā, kā arī siltumapgādes un elektroapgādes sistēmu attīstībā sektoru sasaistes ietekmē. Diskusijas nodaļa sniedz ieskatu turpmākajos soļos, kas būtu jāmodelē, lai labāk raksturotu elektroapgādes sektora nākotnes attīstības scenārijus. Promocijas darbu noslēdz secinājumi.

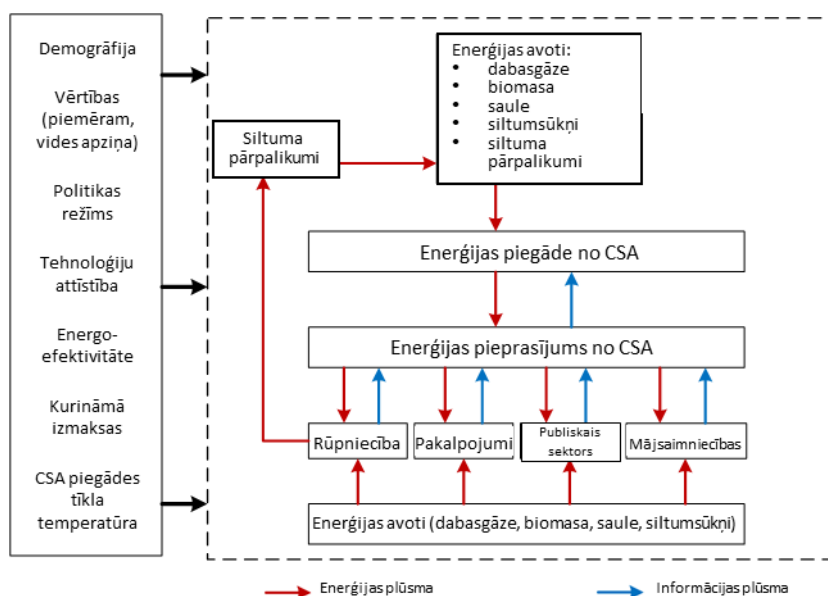
1. PĒTĪJUMA METODIKA

Enerģijas ražošana, izmantojot fosilos kurināmos, ir viens no galvenajiem SEG emisiju avotiem. Lai noteiktu, kā doties oglekļa neitrāla energosektora virzienā, ir jāizpēta dažādi ar energosektoru saistīti aspekti, kā arī dažādu politiku ietekme. Ir svarīgi vērtēt ne tikai katru energosistēmas daļu atsevišķi, bet arī meklēt sadarbības iespējas starp sektoriem. Pētījuma metodika atspoguļo, kā iespējams modelēt siltumapgādes un elektroapgādes sistēmu un ar to saistītos elastības jautājumus, kā arī sektoru sasaisti. Promocijas darbs sniedz piemēru, kā dažādu līmeņu sistēmas var modelēt, izmantojot vienu modelēšanas pieeju. Tam izmantota sistēmdinamikas modelēšanas metode.

1.1. Siltumapgādes sistēmas modelēšana

1.1.1. Nacionālā līmeņa modelis

Promocijas darbā modelētā siltumapgādes sistēma sastāv no divām galvenajām daļām – siltumenerģijas pieprasījuma un siltumenerģijas piedāvājuma (1.1. att.). Lokālajās un individuālajās siltumapgādes sistēmās siltumenerģijas patērētājs pats ir atbildīgs par kurināmā sagādāšanu pietiekamā daudzumā, lai spētu nodrošināt nepieciešamo iekštelpu komforta temperatūru visa gada garumā. Turpretī CSA sistēmas operatoram jāapstrādā daudz siltumenerģijas patērētāju pieprasījums, un šajā gadījumā precīza informācija par pieprasījumu ir īpaši svarīga, lai varētu nodrošināt visus patērētājus ar tiem nepieciešamo siltumenerģijas daudzumu.



1.1. att. Galvenie siltumapgādes sistēmas bloki.

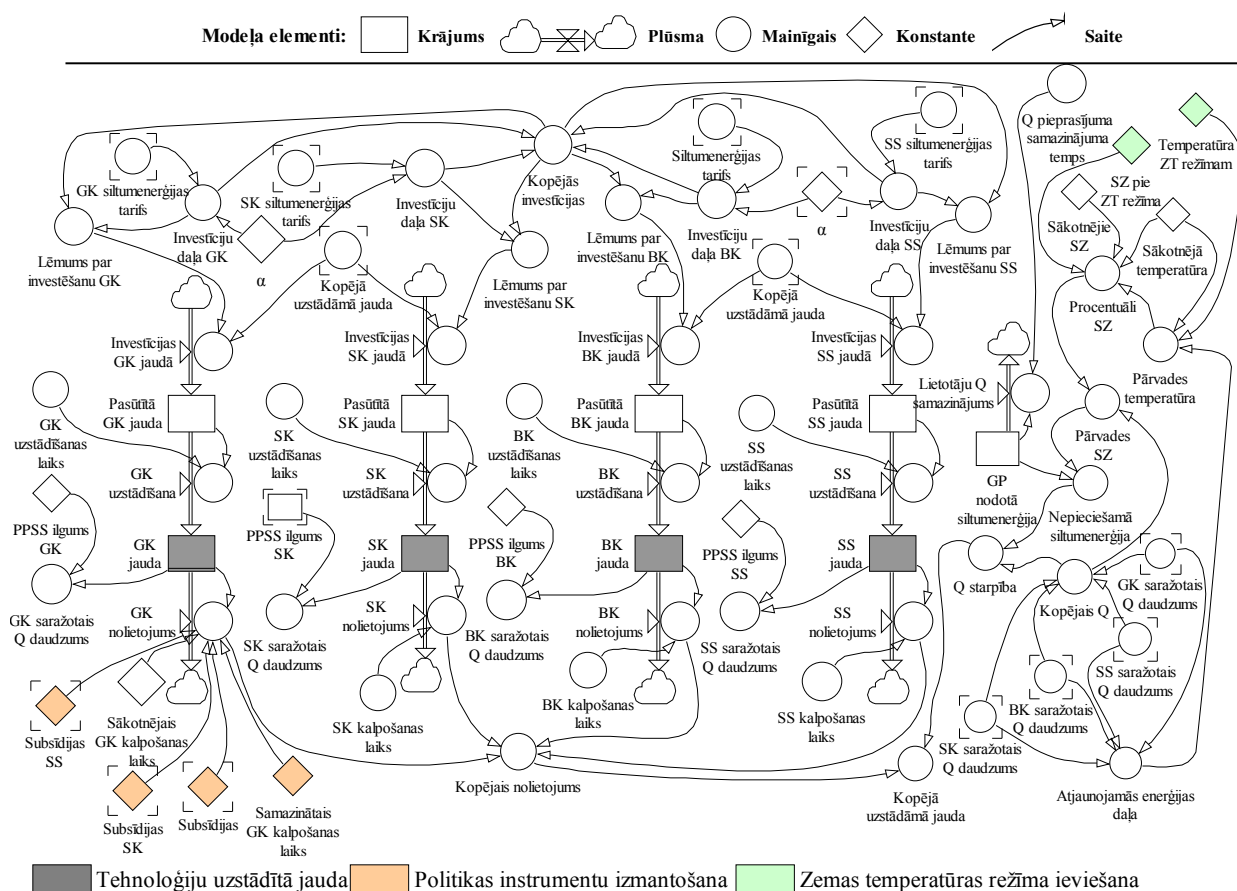
Siltumenerģiju iespējams ražot, izmantojot plašu tehnoloģiju un kurināmā klāstu, tomēr, ņemot vērā Eiropas Savienības mērķus virzībai uz oglekļa neitralitāti, pieprasījums pēc atjaunojamajiem energoresursiem un to tehnoloģijām tikai pieaugs, un tam būs būtiska loma

nākotnes energosistēmā. Kas ir vēl būtiskāk, siltuma pārpalikumu atgūšana no rūpnieciskās ražošanas procesiem un to izmantošana CSA sistēmās ir viena no nākotnes prioritātēm, lai nodrošinātu efektīvu resursu izmantošanu.

Siltumapgādes sistēmas modelis tika veidots programmā “Powersim Studio 8”.

Tehnoloģiju jaudas izmantotas kā centrālie modeļa elementi. Tehnoloģijas, kas šobrīd darbojas sistēmā, ir dabasgāzes katli (GK) un biomasas katli (BK), bet ir iekļautas arī tādas pagaidām ne tik plaši izmantotas, taču perspektīvas AER tehnoloģijas kā saules kolektori (SK) un siltumsūkņi (SS).

Tehnoloģiju nolietojšanās ir atkarīga no uzstādīto tehnoloģiju kalpošanas laika. Jaunu tehnoloģiju jaudu uzstādīšana darbojas pretēji nolietojumam. Ja enerģijas ražošanā ir vērojams iztrūkums, salīdzinot ar pieprasījumu, tad tiek uzstādītas papildu tehnoloģiju jaudas.



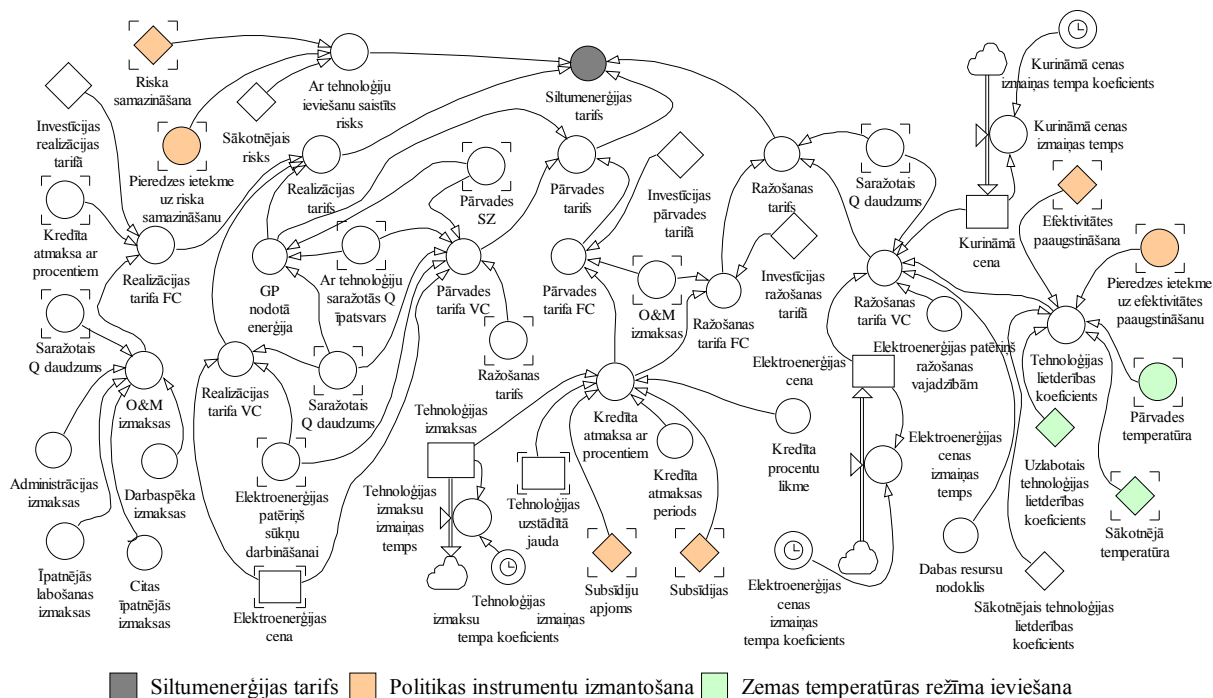
1.2. att. Jaudu nomainīgas apakšmodelis (GK – dabasgāzes katli, BK – biomasas katli, SK – saules kolektori, SS – siltumsūkņi, ZT – zema temperatūra, PPSS – pielāgotās pilnas slodzes stundas, GP – galapatērētājs, PJ – pasūtītās jaudas, I – tehnoloģijas investīciju daļa, Q – saražotais siltums, SZ – siltuma zudumi).

Katrai tehnoloģijas pasūtīto jaudu apjomu nosaka, savstarpēji salīdzinot siltumenerģijas tarifus. Izvēle par labu kādai no tehnoloģijām tiek izdarīta, izmantojot *Logit* funkciju:

$$I_1 = \frac{e^{-\alpha T_1}}{e^{-\alpha T_1} + e^{-\alpha T_2} + \dots + e^{-\alpha T_n}} \quad (1.1.)$$

kur $I_{1...n}$ – tehnoloģijas investīciju daļa; $T_{1, 2}$ – tehnoloģijas siltumenerģijas tarifs, EUR/MWh; α – elastības koeficients, kas apraksta lēmuma pieņēmēju lēmuma pieņemšanas raksturu.

Jaunas tehnoloģiju jaudas tiek uzstādītas, balstoties uz 1.1. vienādojumu. Rezultātā veidojas jauna enerģijas bilance. Ja ar uzstādītajām jaudām pietiek, lai nosegtu enerģijas pieprasījumu, un enerģijas iztrūkums neveidojas, jaunas tehnoloģiju jaudas netiek uzstādītas un tiek darbinātas jau esošās jaudas.



1.3. att. Biomasas katlumāju tarifa aprēķināšanas apakšmodelis (BK – biomasas katli, FC – fiksētās izmaksas, VC – mainīgās izmaksas, O&M – darbināšana un uzturēšana, GP – galpatērētājs, SZ – siltuma zudumi).

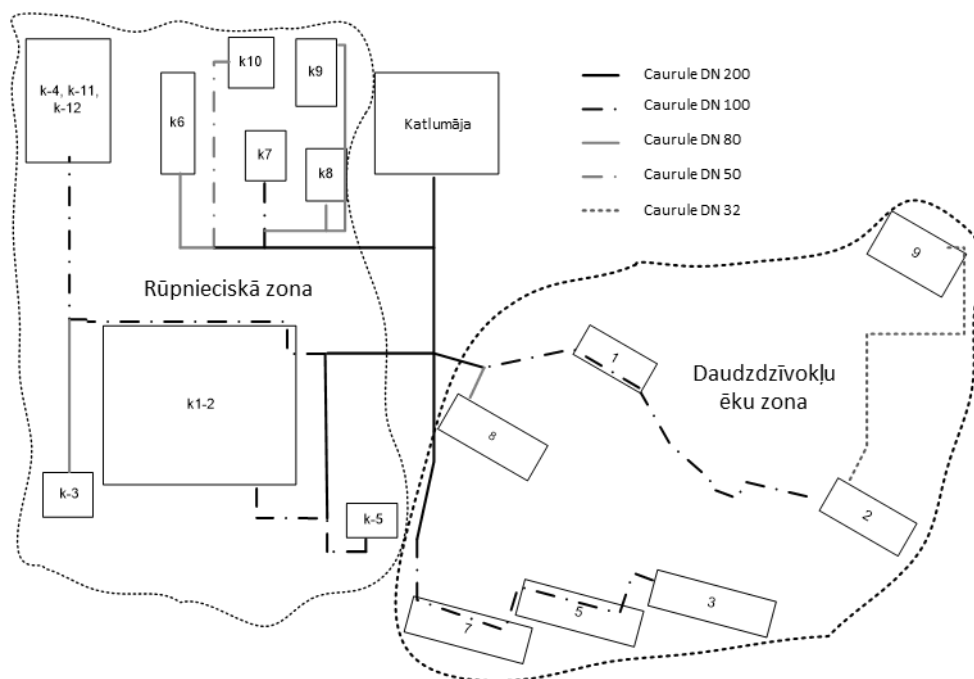
Siltumenerģijas tarifa aprēķināšanas apakšmodelis redzams 1.3. attēlā. Tarifa aprēķina apakšmodelis ir balstīts Latvijas Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas izstrādātajā siltumenerģijas tarifa aprēķina metodikā [10]. Siltumenerģijas tarifu rēķina katrai tehnoloģijai atsevišķi. Siltumenerģijas tarifam ir trīs daļas: ražošanas tarifs; pārvades un sadales tarifs; pārdošanas tarifs. Papildus ražošanas, pārvades un sadales un pārdošanas tarifam kopējais tarifs iekļauj parametru “risks” (neērtību izmaksas). Tas saistīts ar jaunu un mazāk zināmu tehnoloģiju iekļaušanu sistēmā.

1.1.2. Lokālās sistēmas gadījuma izpēte

Pētījums balstīts uz gadījuma izpēti ar CSA apgādātam rajonam Rīgā. Siltumenerģijas ražošanai rajonā izmanto divus dabasgāzes katlus, kuru jauda bāzes slodzes segšanai ir 2,5 MW. Papildu 1 MW dabasgāzes katlu izmanto pīķa slodžu segšanai. Dūmgāzu siltumu atgūst, izmantojot dūmgāzu ekonomāizeru. Siltumenerģiju pārvada, izmantojot 115 °C turpgaitas un 70 °C atgaitas temperatūru (115/70 temperatūras režīms). Siltuma avotam ir divu veidu patērētāji – daudzdzīvokļu ēku zona un rūpnieciskā zona (1.4. att.).

Siltumenerģiju izmanto gan daudzdzīvokļu ēku (18 195 m²), gan rūpniecisko ēku (18 271 m²) apsildei. Siltā ūdens slodzi visa gada garumā sedz tikai daudzdzīvokļu ēkām. Vidējais saražotais siltumenerģijas daudzums apkures sezonā ir aptuveni 900 MWh mēnesī. Apmēram 60 % saražotās enerģijas patērē daudzdzīvokļu ēkas, 40 % – rūpniecības ēkas. Vidējais saražotais siltumenerģijas apjoms vasaras sezonā ir 116 MWh mēnesī, kas nosedz patērētāju pieprasījumu pēc siltā ūdens.

Siltumenerģijas ražošanai izmanto tikai vienu kurināmā veidu – dabasgāzi. Tas nav ilgtspējīgs risinājums. Normalizētais siltumenerģijas patēriņš gada griezumā ir 6100 MWh. Apkures sezonas laikā pārvades zudumi veido pat 110–125 MWh, kas ir 12–14 % no kopējā siltumenerģijas patēriņa, savukārt vasaras sezonā zudumi vidēji ir 13–16 MWh. Zudumu īpatsvars vasaras sezonā attiecībā pret ēkām piegādāto siltumenerģijas daudzumu ir 15–20 %.



1.4. att. Gadījuma izpētes CSA rajons.

Ceturtās paaudzes CSA stratēģija paredz AER, tādu kā saules enerģija ar akumulāciju, zemes siltums (izmantojot siltumsūkņus) un biomasu, integrēšanu sistēmā, vienlaikus samazinot galapatērētāju siltumenerģijas patēriņu, ieviešot siltumenerģijas taupīšanas pasākumus [3].

Gadījuma izpēte apskata atjaunojamo energoresursu iekļaušanu sistēmā, kā arī ņem vērā galapatērētāju siltumenerģijas taupīšanas pasākumu ieviešanas ietekmi.

Dažādu scenāriju efektivitātes raksturlielumi, to izmaksu diapazons un projekta dzīves cikls apkopoti 1.1. tabulā. Bāzes scenārijā izmaksas nav aprēķinātas, jo tās ir balstītas uz ēku pašreizējo stāvokli.

Modeļa scenāriju raksturlielumi

Scenārijs	Ēkas elementi	Siltinājuma biezums, mm	U vērtība, W/(m K)	Energoefektivitātes izmaksas, EUR/m ²	Projekta mūžs, gadi
Bāzes scenārijs (BSc)	Siena	–	1,07		
	Grīda	–	0,82		
	Jumts	–	0,42		
	Logi	–	2,00		
	Ventilācija	–	–		
	Rūpnieciskā zona	–	–		
1. scenārijs (Sc1)	Siena	150	0,19	70,1–85,5 ^a	20
	Grīda	100	0,22	15,2–18,7 ^a	
	Jumts	200	0,15	7,1–8,5 ^a	
	Logi	–	1,50	55,5–70,4 ^a	
	Ventilācija	–	–	–	
	Rūpnieciskā zona	–	–	–	
2. scenārijs (Sc2)	Siena	200	0,15	85,5–95,5 ^a	20
	Grīda	100	0,22	18,7–22,5 ^a	
	Jumts	300	0,11	8,5–12,2 ^a	
	Logi	–	1,10	70,4–94,9 ^a	
	Ventilācija	–	0,75**	25,5–40,0 ^b	
	Rūpnieciskā zona	–	20,00*	87,0–142,0 ^c	
3. scenārijs (Sc3)	Siena	400	0,08	100,0–180,0 ^a	20
	Grīda	100	0,22	18,7–22,5 ^a	
	Jumts	400	0,09	14,5–16,5 ^a	
	Logi	–	0,80	110,0–150,0 ^a	
	Ventilācija	–	0,75**	25,5–40,0 ^b	
	Rūpnieciskā zona	–	40,00*	87,0–142,0 ^c	

^a ēkas elementu energoefektivitātes izmaksas (sienas, grīda, jumts, logi; m²);

^b energoefektivitātes izmaksas uz apkurināmo platību;

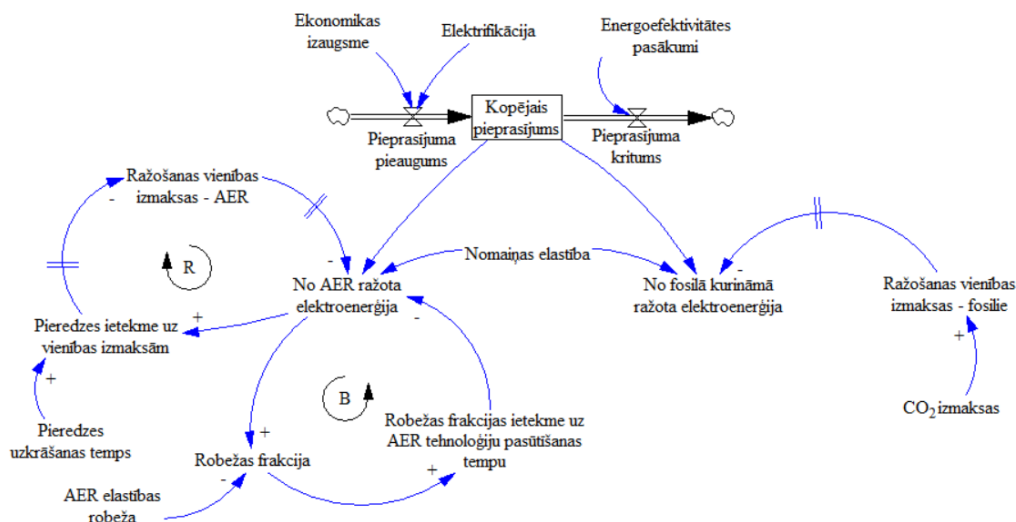
^c energoefektivitātes izmaksas uz MWh;

* siltumenerģijas ietaupījumu īpatsvars;

** siltuma atgūšanas efektivitāte.

1.2. Elektroapgādes sektora elastības modelēšana

1.5. attēlā redzama iespējamā modeļa struktūra ar galvenajām pastipriņošajām un balansējošajām cilpām, kas varētu būt atbildīgas par sistēmas uzvedību. Kā redzams attēlā, lēmums par labu kādai no tehnoloģijām ir atkarīgs no kopējā enerģijas pieprasījuma, ražošanas izmaksām un tehnoloģiju aizstāšanas elastības, kas apraksta ražošanas izmaksu atšķirības ietekmi uz lēmuma pieņemšanu. Salīdzinot elektroenerģijas ražošanas tehnoloģiju vienības izmaksas, tiek pieņemts lēmums, cik daudz elektroenerģijas tiks ražots, izmantojot katru no tirgū pieejamajām tehnoloģijām. Tomēr, ja no AER iegūtās elektroenerģijas saražotais apjoms tuvojas elastības robežai, kas nosaka, cik daudz AER enerģiju iespējams integrēt sistēmā, tiek pārtraukta investēšana jaunās AER jaudās. Tas var radīt plaisu starp kopējo saražoto elektroenerģijas daudzumu un pieprasījumu pēc elektroenerģijas. Šo plaisu var aizpildīt ar importa elektroenerģiju vai papildu uz fosilajiem resursiem balstītu jaudu uzstādīšanu.

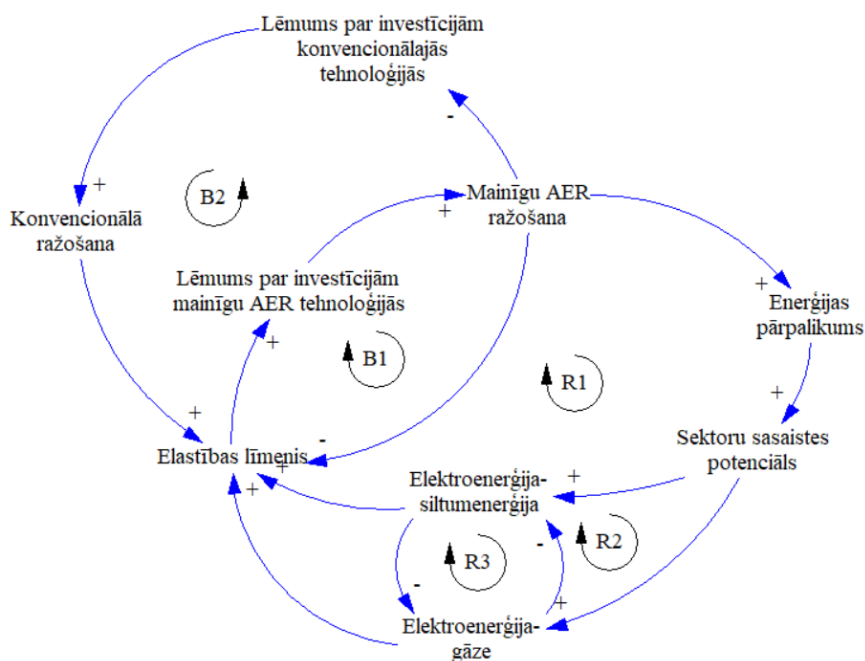


1.5. att. Konceptuālā modeļa struktūra (AER – atjaunojamie energoresursi, R – pastiprinošā cilpa, B – balansējošā cilpa).

Elastības robeža attēlo pašreizējo uzkrāto zināšanu līmeni par laikā mainīgo AER integrēšanu esošajā sistēmā. AER tehnoloģijām attīstoties un uz AER balstītu elektroenerģijas ražošanas tehnoloģiju ražošanas apjomam tuvojoties pašreizējās sistēmas elastības robežai, AER integrēšanas temps samazinās, un spiediens uz inovāciju izstrādāšanu, kas varētu pārraut šo robežu, iespējams, var kļūt stiprāks. Motivācija inovāciju radīšanai var rezultēties daļējā esošās sistēmas pārkonfigurēšanā, vai esošā sistēma var tikt pilnībā sagrauta un aizstāta ar jaunu sistēmu, kurā ir noteiktas jaunas elastības robežas. Lai tas notiktu, parasti nepieciešams politisks atbalsts un institucionālas pārmaiņas.

1.2.1. Sektoru sasaiste nacionālajā līmenī

Konvencionālu un arī mainīgo AER tehnoloģiju būtisko atšķirību dēļ ir jāpievērš uzmanība elektroapgādes sistēmas balansēšanas problēmām, kas rodas mainīgo AER izmantošanas rezultātā. Ir jāievieš elastības veicināšanas pasākumi gan ražošanas, gan patēriņa daļā. Ņemot vērā to, ka Latvijas CSA sistēmā dominē dabasgāzes izmantošana, ir iespējams apgalvot, ka elektroapgādes un siltumapgādes sektoru sasaiste, lai risinātu balansēšanas problēmu, var būt izdevīgs risinājums abām pusēm. Mainīgo AER izmantošanas pieaugums elektroapgādes sektorā var radīt augstu nenoteiktību, un brīžos, kad pieprasījums pēc enerģijas ir zems, bet elektroenerģijas ražošana ar mainīgajiem AER – augsta, enerģijas pārpalikumu var novirzīt siltumenerģijas ražošanai. Protams, elektroenerģijas pārpalikumu var izmantot arī elektroenerģija-gāze (*P2G*) pārveidošanas procesā. Latvijā ir ļoti labi attīstīta dabasgāzes infrastruktūra, un dabasgāze ir viens no galvenajiem resursiem elektroenerģijas un CSA nodrošināšanā, tāpēc nav jāveido jauna infrastruktūra *P2G* procesa attīstīšanai. Vienīgais šķērslis ir ražošanas tehnoloģiju uzstādīšana. Ņemot vērā to, ka ir liels skaits tehnoloģiju, kurās izmanto dabasgāzi, arī *P2G* procesā iegūtajai gāzei būtu pietiekami plašs noieta tirgus. Protams, elektroenerģija-siltumenerģija (*P2H*) un *P2G* procesa attīstība lielā mērā ir atkarīga no spējas sacensties ar esošajiem tirgus dalībniekiem.



1.6. att. Cēlonisko cilpu diagramma.

Kā redzams 1.6. attēlā, cēlonisko cilpu diagramma sastāv no piecām cilpām: trīs pastiprinošām (R1 –R3) un divām balansējošām (B1, B2) cilpām. Pastiprinošās cilpas atbild par sistēmas attīstību un izaugsmi, savukārt balansējošās cilpas ierobežo izaugsmi un cenšas noturēt sistēmu līdzsvarā.

Pirmā un otrā pastiprinošā cilpa (R1 un R2) atbild par AER izmantošanas attīstību un uzstādīto ražošanas jaudu pieaugumu. Mainīgo AER īpatsvaram pieaugot, daudz biežāk rodas situācijas, kad elektroenerģijas piedāvājums nav sabalansēts ar pieprasījumu. Tas izraisa enerģijas pārpalikumu rašanos, ko vietējie patērētāji nespēj izlietot. Ja ir labi attīstīta pārrobežu pārvades infrastruktūra, enerģijas pārpalikumu par zemu cenu var tirgot kaimiņvalstīm, tā veicinot sistēmas elastību, tomēr šajā pētījumā pieņemts, ka pārrobežu elektroenerģijas pārvade nenotiek un elektroenerģijas pārpalikums ir jāizmanto valsts iekšienē. Šajā pētījumā analizēta sektoru sasaiste (*P2H* un *P2G*) kā elektroapgādes sektora elastības veicinātāja. Jo lielāki ir elektroenerģijas pārpalikumi, jo vairāk tos iespējams izmantot *P2H* un *P2G* procesos, kas veicina sistēmas elastības pieaugumu un ļauj palielināt mainīgo AER izmantošanu elektroenerģijas ražošanā. Trešā pastiprinošā cilpa (R3) parāda savstarpēju *P2H* un *P2G* risinājumu konkurenci. Elektroenerģijas pārpalikumu apjoms ir ierobežots, tāpēc arī *P2H* un *P2G* uzstādāmo tehnoloģiju jaudas ir ierobežotas, jo pētījumā pieņemts, ka attiecīgajos procesos izmanto tikai atjaunojamo enerģiju jeb elektroenerģijas pārpalikumu, kas rodas no mainīgo AER izmantošanas. Modelī priekšroka dota tehnoloģijai, kurai ir labāki ekonomiskie rādītāji.

Pirmā balansējošā cilpa (B1) rāda, ka, lai nodrošinātu sistēmas elastību, nepietiek tikai ar mainīgajiem AER, tāpēc, pieaugot AER īpatsvaram, sistēmas elastība mazinās. Tas veicina AER uzstādīšanas tempa samazināšanos. Otrā balansējošā cilpa (B2) rāda, kā konvencionālajām elektroenerģijas ražošanas tehnoloģijām izdodas saglabāt augstu īpatsvaru kopējā sistēmā. Konvencionālās elektroenerģijas ražošanas tehnoloģijas ir tās, kas nodrošina

elektroapgādes sistēmas elastību brīžos, kad AER tehnoloģijas nav spējīgas nosegt enerģijas pieprasījumu laikapstākļu dēļ. Konvencionālajām tehnoloģijām ir īss iedarbināšanas laiks, tāpēc tās spēj ātri reaģēt uz pieprasījuma izmaiņām, tāpēc, ja netiks ieviesti papildu elastību veicinoši pasākumi, konvencionālo ražošanas tehnoloģiju jauda saglabās augstu īpatsvaru.

Elektroenerģijas ražošanas modelis iekļauj sešas elektroenerģijas ražošanas tehnoloģijas: vēja turbīnas, saules paneļus, hidroelektrostacijas, kā arī biogāzes, biomasas un dabasgāzes tehnoloģijas. Tās konkurē savā starpā. Elektroapgādes sistēmas transformācija ir atkarīga no pieejamo tehnoloģiju rentabilitātes. Investīcijas tehnoloģijās aprēķinātas, izmantojot *Logit* funkciju. Tā dod priekšroku tehnoloģijām ar viszemāko tarifu.

Līdzīgs princips izmantots arī CSA tehnoloģiju noteikšanai sistēmā (dabasgāzes un biomasas tehnoloģijas, saules kolektori un siltumsūkņi). Pēc līdzīga principa lēmums par investēšanu konkrētā tehnoloģiskajā risinājumā tiek pieņemts, izvēloties starp *P2H* (izmanto siltumsūkņus) un *P2G* (izmanto elektrolizatorus un metanācijas reaktorus). Modelī ir saskares punkti starp elektroapgādes un siltumapgādes sektoru koģenerācijas formā, kā arī starp siltumapgādes sektoru un elastību veicinošu risinājumu siltumsūkņu veidā. Gāzi, kas iegūta *P2G* procesa rezultātā, var izmantot gan elektroenerģijas, gan siltumenerģijas ražošanā, aizstājot dabasgāzi.

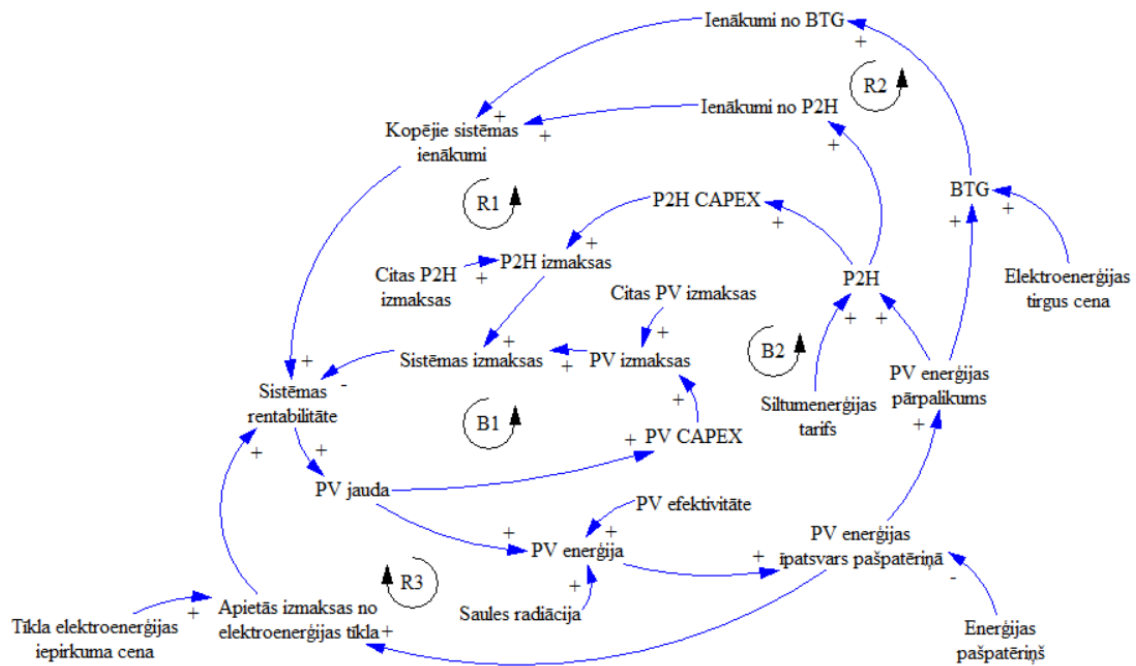
1.2.2. Sektoru sasaiste lokālajā līmenī

Lokālās sistēmas modelēšanas mērķis ir noteikt, vai ir saprātīgi integrēt saules paneļus CSA uzņēmuma sistēmā, lai segtu daļu no uzņēmuma elektroenerģijas pašpatēriņa un elektroenerģijas pārpalikumu no saules paneļiem, pārveidotu siltumenerģijā. Modelis sniedz iespēju salīdzināt dažādas tehnoloģijas, ko var izmantot siltumenerģijas ražošanā no elektroenerģijas pārpalikumiem.

1.7. attēlā redzamā cēlonisko cilpu diagramma apraksta savstarpējās sakarības starp sistēmas elementiem.

Lēmums par papildu saules paneļu platības uzstādīšanu ir balstīts ekonomiskā aprēķinā, tostarp kopējos ieņēmumos no uzstādītās saules paneļu sistēmas un tās izmaksām. Ja darbība ir rentabla, tiek pieņemts, ka daļa peļņas tiek novirzīta jaunu paneļu uzstādīšanai.

Elektroenerģijas pārpalikumu (saules paneļu saražoto, atņemot CSA uzņēmuma pašpatēriņu) pārveido siltumenerģijā vai nodod sadales tīklā. Lēmums par elektroenerģijas pārpalikuma izmantošanu siltuma ražošanai vai nodošanu tīklā ir balstīts ekonomiskos apsvērumos. Abu iespēju potenciālie ienākumi tiek salīdzināti savā starpā, priekšroku dodot rentablākajam. Ja siltumenerģijas pārdošanas tarifs ir augstāks par elektroenerģijas tirgus cenu, elektroenerģijas pārpalikumu pārvērš siltumenerģijā. Vērā tiek ņemti ierobežojumi, ko nosaka siltumenerģijas pieprasījums, kā arī uzstādītā *P2H* jauda.



1.7. att. Cēlonisko cilpu diagramma saules paneļu integrēšanai CSA uzņēmumā (PV – saules paneļi, P2H – elektroenerģija-siltumenerģija risinājums, BTG – elektroenerģijas nodošana tīklā, CAPEX – tehnoloģiju kapitālizmaksas).

2.2. tabula apkopotas galvenās modeļa bāzes scenārija ievades vērtības, iekļaujot gan izmantotās vērtības, gan mērvienības, kā arī literatūras avotus.

2.2. tabula

Bāzes scenārija ievades dati

Ievades parametri	Vienība	Vērtība	Avots
Sākotnējā PV paneļu cena	EUR/m ²	180	[11]
PV paneļu cenas samazinājums	% gadā	5	[11], [12]
PV uzstādīšanas laiks	Gadi	1	[13]
PV paneļu kalpošanas laiks	Gadi	25	[13]
PV paneļu efektivitāte	%	16	[14]
Peļņas daļa jaunu PV uzstādīšanai	%	25	[12]
Saules radiācija	(kWh/m ²)/h	Ikstundas dati	Meteoroloģiskā datubāze [15]
Elektroenerģijas patēriņš	kWh	Ikstundas dati	CSA uzņēmuma dati
Elektroenerģijas nepieciešamība siltumapgādei	kWh	Ikstundas dati	CSA uzņēmuma dati
Siltumenerģijas tarifa pieaugums	%	2	CSA uzņēmuma dati
Siltumenerģijas gala tarifs	EUR/MWh	50	CSA uzņēmuma dati
Siltumsūkņu COP	–	3	[16], [17]
Elektroenerģijas cena	EUR/MWh	Ikstundas dati	Elektroenerģijas tirgus dati
Siltumsūkņu cena	EUR/kW	800	[16], [17]
Siltumsūkņu kalpošanas laiks	Gadi	20	[16]
Siltumsūkņu jaudas nepieciešamība	kWh/m ²	0,2	[16]
Investīciju atmaksāšanās laiks	Gadi	10	Balstīts uz simulācijas laiku
Pilna elektroenerģijas cena	EUR/MWh	Ikstundas dati	Vidējā cena

2. REZULTĀTI

2.1. Siltumapgādes sistēmas modelēšana

2.1.1. Nacionālā līmeņa modelis

Ar sistēmdinamikas modeli analizēti četri dažādi scenāriji. Scenārijos izmantoto politikas instrumentu pārskats apkopots 2.1. tabulā. Analizēti šādi scenāriji:

- bāzes scenārijs;
- fosilo kurināmo nodokļu scenārijs;
- atjaunojamo energoresursu atbalsta scenārijs;
- kombinētais politiku scenārijs.

2.1. tabula

Scenāriju salīdzinājums [18]

	Akcīzes nodokļa pieaugums, %/gadā	CO ₂ nodokļa pieaugums	EE pasākumu atbalsta intensitāte, %	AER integrēšanas CSA atbalsta intensitāte, %	AER integrēšanas individuālajā SA atbalsta intensitāte, %	CSA tīklu nomaiņas atbalsta intensitāte, %
Bāzes scenārijs	0	0 (pēc 2022. gada)	0	0	0	0
Fosilo nodokļu scenārijs	8	Līdz ETS kvotas cenai	30	0	0	0
Subsīdiju scenārijs	0	0 (pēc 2022. gada)	30	40	20	40
Kombinēto politiku scenārijs	8	Līdz ETS kvotas cenai	30	40	20	40

Kopējais atbalsta apjoms un intensitāte apkopota 2.2. tabulā. Modelis ņem vērā daudzdzīvokļu ēku renovācijai vēsturiski pieejamo finansējumu 2016.–2023. gadam. Šis finansējums tiek piešķirts gan bāzes, gan visos politiku scenārijos un tiek pilnībā izmantots. Tas saskan ar reālajā sistēmā novēroto uzvedību. Plānotais energoefektivitātes pasākumu atbalsts līdz 2030. gadam tiek piešķirts visos politiku scenārijos, taču netiek piešķirts bāzes scenārijā.

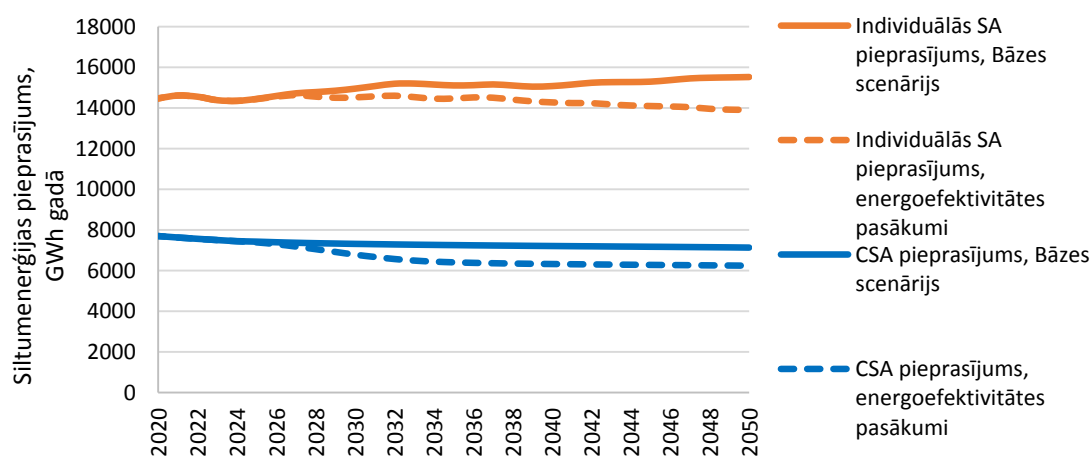
2.2. tabula

Atbalsta apjoms un intensitāte līdz 2030. gadam [18]

	Sektors	Pieejamais finansējums, MEUR	Atbalsta intensitāte, %
Ēku energoefektivitāte	Komercsektors	300	30
	Publiskais sektors	100	30
	Daudzdzīvokļu ēkas	1200	30
	Privātās ēkas	100	30
Atjaunojamie energoresursi	Mājsaimniecības un publiskais sektors	267	20
	Rūpniecība	225	20
	CSA	550	40
	Pāreja uz zemas temperatūras CSA sistēmu	60	40

Iegūtie rezultāti ļauj analizēt ilgtermiņa tendences dažādu energoresursu izmantošanai siltumenerģijas ražošanā gan centralizētās, gan individuālās siltumapgādes sistēmās dažādos politikas scenārijos.

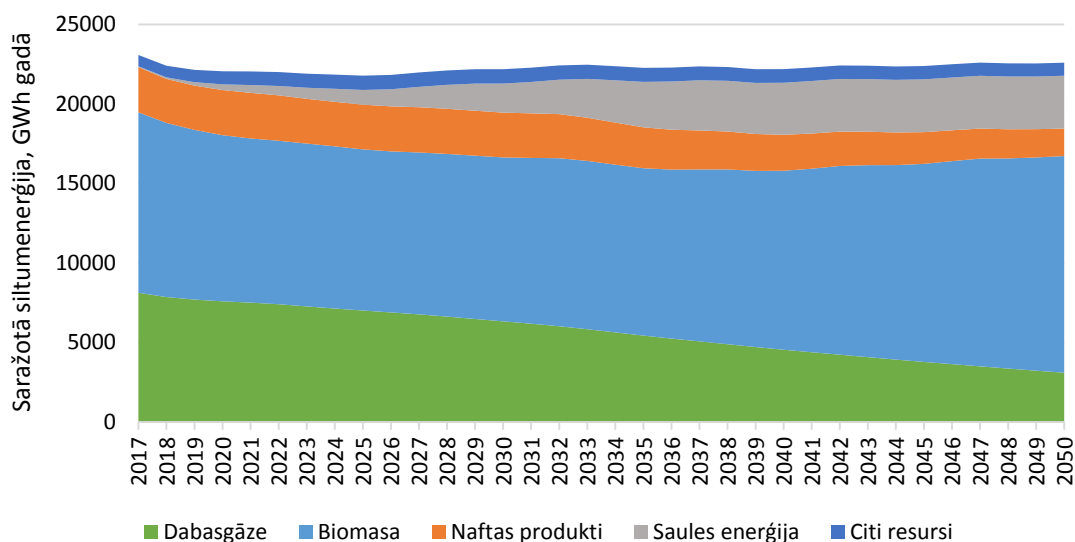
Modelētās siltumenerģijas pieprasījuma tendences centralizētajā un individuālajā siltumapgādē redzamas 2.1. attēlā. Pateicoties energoefektivitātes pasākumu ieviešanai, kopējais siltumenerģijas pieprasījums 2050. gadā, salīdzinot ar bāzes scenāriju, samazinājās par 2504 GWh. CSA siltumenerģijas pieprasījums 2050. gadā samazinājās par 890 GWh, individuālajā siltumapgādē – par 1613 GWh. Bāzes scenārijā kopējais CSA saražotais siltumenerģijas daudzums ir gandrīz 8000 GWh gadā, taču vidējā termiņa un ilgtermiņa perspektīvas rāda, ka saražotais siltumenerģijas apjoms CSA varētu samazināties līdz 7000 GWh gadā.



2.1. att. CSA un individuālās siltumapgādes pieprasījuma prognozes analizētajos scenārijos.

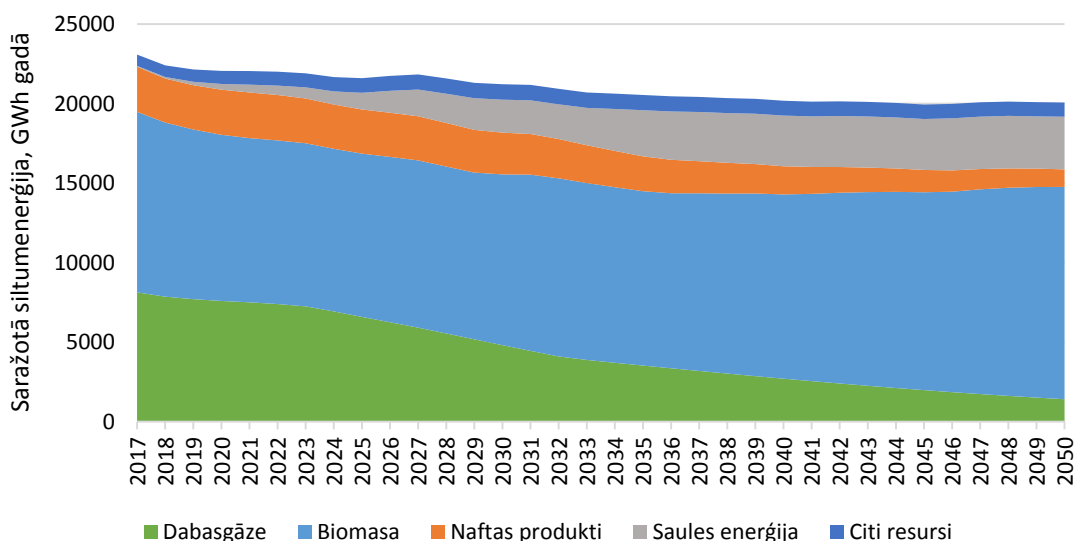
Individuālajā siltumapgādē saražotā siltumenerģija atšķiras no CSA saražotās. Vērojams, ka fosilā kurināmā samazinājuma temps individuālajā siltumapgādē ir lēnāks nekā CSA. Modelī pieņemts, ka elastības koeficients, kas ir atbildīgs par lēmuma pieņemšanu, izvēloties tehnoloģijas, kurās investēt, CSA ir augstāks nekā individuālajā siltumapgādē, tāpēc tehnoloģiju nomaiņa individuālajā siltumapgādē ir daudz lēnāka un AER tehnoloģiju uztvertajiem ekonomiskajiem ieguvumiem ir jābūt ievērojami augstākiem, nekā tas ir CSA.

Bāzes scenārijā biomasas īpatsvars ir augsts gan individuālajā siltumapgādē, gan CSA, atspoguļojot pašreizējo situāciju un esošo politiku atbalstu. Balstoties uz bioekonomikas principiem, augstas kvalitātes biomasas pieejamībai siltumenerģijas ražošanā vajadzētu samazināties, biomasu nākotnē izmantojot produktu ar augstāku pievienoto vērtību ražošanai. Esošie politikas plānošanas dokumenti to neņem vērā un neiekļauj ierobežojumus biomasas kā kurināmā izmantošanai enerģētikas sektorā.



2.2. att. Valsts mērogā saražotā siltumenerģija bāzes scenārijā.

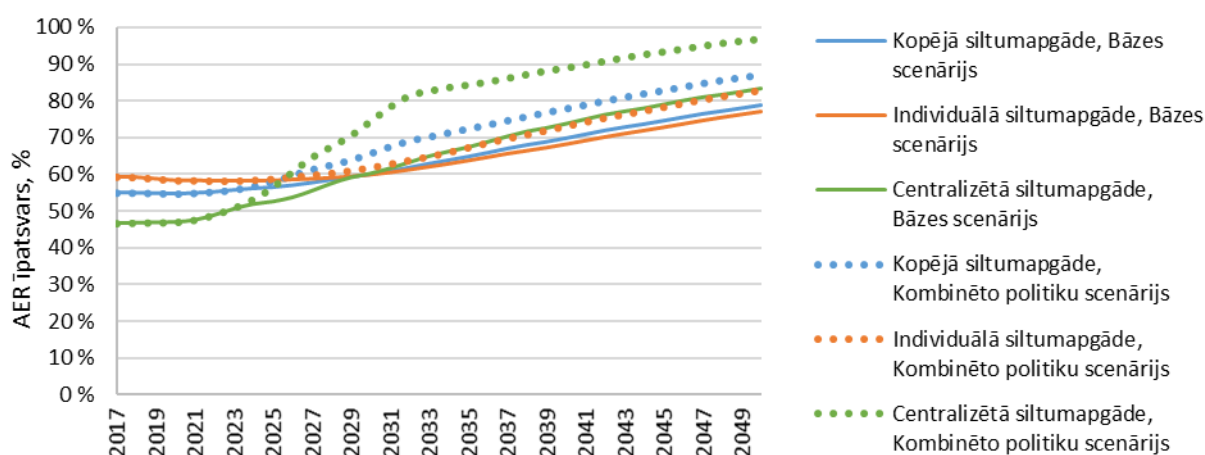
Ja siltumapgādes sistēmas attīstībai izmanto politikas instrumentus, iekļaujot gan energoefektivitātes pasākumus, gan AER integrēšanu, redzams, ka situācija centralizētajā un individuālajā siltumapgādē ievērojami atšķiras no bāzes scenārija. Rezultāti (2.1. att.) rāda, ka kombinēto politiku scenārijā saražotais siltumenerģijas daudzums CSA samazināsies no 8000 GWh 2017. gadā līdz 6000 GWh 2050. gadā. Galvenie enerģijas avoti CSA būs saule un biomasa. Kombinēto politiku scenārijs paredzēja, ka siltumenerģija tiks ražota, arī izmantojot siltumsūkņus un siltuma pārpalikumus no rūpniecības procesiem, taču to integrēšanas temps CSA ir niecīgs, un to potenciāls ir vēl papildus izvērtējams. Kombinēto politiku scenārijā fosilo resursu izmantošana būtiski samazinās – no aptuveni 5000 GWh 2017. gadā līdz 230 GWh 2050. gadā.



2.3. att. Valsts mērogā saražotā siltumenerģija kombinēto politiku scenārijā.

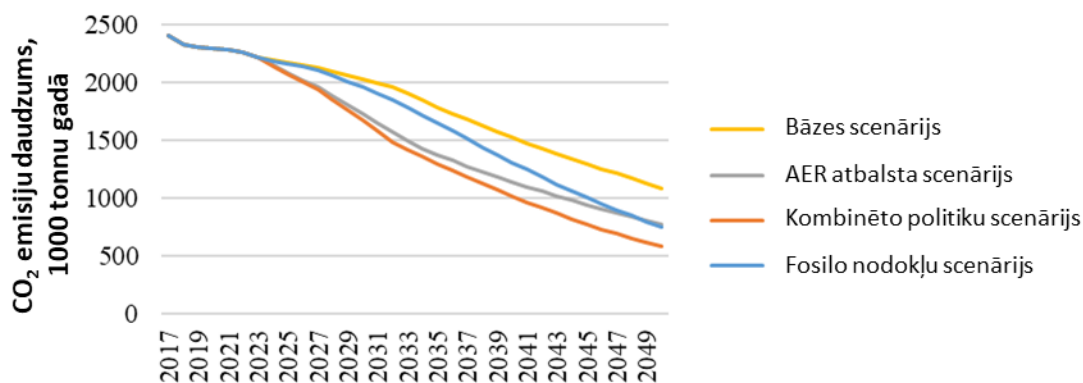
Kombinējot nodokļu politiku izmaiņas un finansiālu atbalstu AER subsīdiju formā, ir iespējams sasniegt ievērojamu fosilā kurināmā izmantošanas samazinājumu nacionālajā mērogā (2.3. att.), tomēr tas pamatā balstās uz plašāku biomasas izmantošanu siltumapgādē. Lai Latvijā veicinātu efektīvāku koksnes resursu izmantošanu, meža apsaimniekošanas un koksnes resursu izmantošanas jomā nepieciešami papildu regulējumi vai ilgtermiņa stratēģija.

Latvijai noteiktais AER īpatsvara mērķis 2030. gadam siltumapgādē ir 57,59 %. Tas ir augstāks nekā Latvijas kopējais AER īpatsvara mērķis 2030. gadam (50 %). Dažādos scenārijos sasniegtais AER īpatsvars centralizētajā, individuālajā un kopējā siltumapgādē atšķiras (2.4. att.). Redzams, ka 2017. gadā AER īpatsvars centralizētajā un individuālajā siltumapgādē ir robežās no 47 % līdz 60 %. Rezultāti rāda, ka bāzes scenārijā kopējās siltumapgādes AER īpatsvars 2030. gadā varētu pieaugt līdz 60 %. Kombinēto politiku scenārijā AER īpatsvars līdz 2030. gadam CSA varētu pieaugt līdz pat 80 %, savukārt individuālajā siltumapgādē – līdz 62 %. Individuālās siltumapgādes lēnais AER īpatsvara pieaugums ir saistīts ar dažādu faktoru iedarbību. AER tehnoloģiju kapitālizmaksas individuālajā siltumapgādē ir daudz augstākas. Individuālajai siltumapgādei pieejams mazāks finansiālais atbalsts (subsīdijas) AER ieviešanai nekā CSA, kas saskan ar Latvijas NEKP 2030. gadam plānoto.



2.4. att. Centralizētās, individuālās un kopējās siltumapgādes AER īpatsvars bāzes un kombinēto politiku scenārijā.

Viens no galvenajiem sistēmas efektivitātes rādītājiem ir novērstās SEG emisijas, kas saistīts ar pieaugošu AER īpatsvaru un augstāku energoefektivitātes līmeni. 2017. gadā kopējās emisijas no siltumapgādes bija 2400 tūkstoši tonnu CO₂.

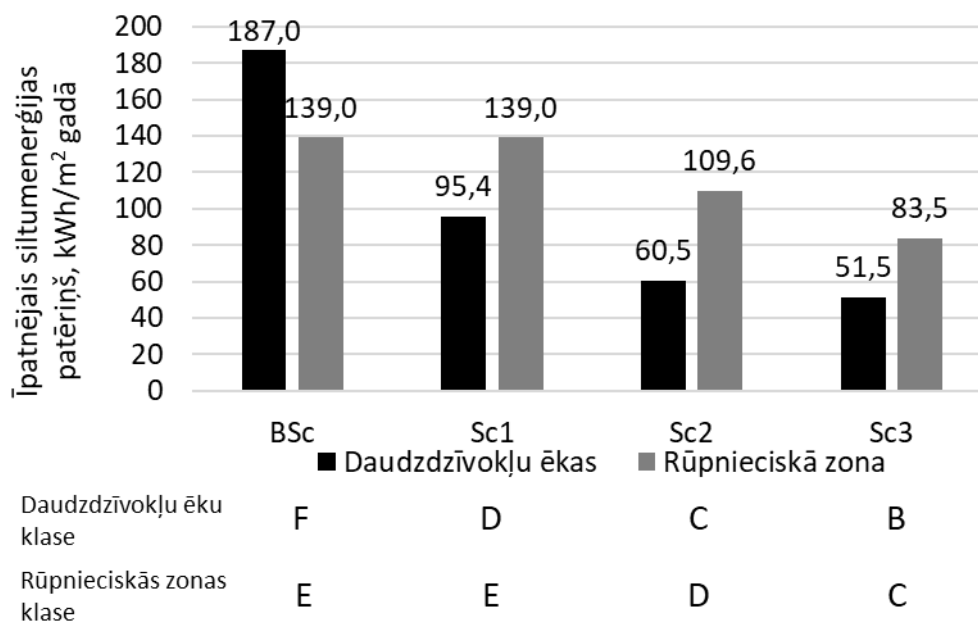


2.5. att. Kopējais siltumapgādē radīto CO₂ emisiju daudzums dažādos scenārijos.

Ieviešot dažādus politikas instrumentus, iespējams sasniegt ievērojamu CO₂ emisiju samazinājumu siltumapgādē. Kā redzams 2.5. attēlā, kombinēto politiku scenārijā iespējams samazināt CO₂ emisijas līdz pat 579 tūkstošiem tonnu 2050. gadā. Ar izmantotajām politikām nepietiek, lai sasniegtu oglekļa neitrālu siltumapgādes sistēmu.

2.1.2. Lokālas sistēmas gadījuma izpēte

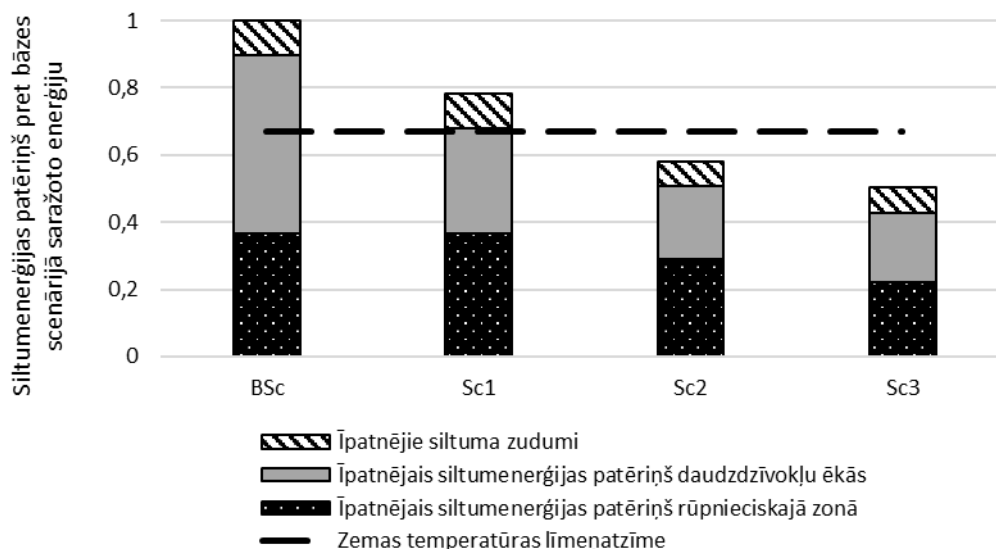
Dažādu scenāriju modelēšanai noteikti dažādi dzīvojamo ēku un rūpnieciskās zonas energoefektivitātes līmeņi. Īpatnējais siltumenerģijas patēriņš un ēku klase noteikta, balstoties uz “Noteikumiem par ēku energosertifikāciju” [19] (2.6. att.).



2.6. att. Dažādu scenāriju īpatnējais siltumenerģijas patēriņš un ēku klases.

Darbā noteikts, kā energoefektivitātes pasākumi ietekmē zema temperatūras režīma ieviešanu un kādi scenāriju nosacījumi ļautu ieviest zemas temperatūras režīmu. 2.7. attēlā redzams bāzes scenārija un citu scenāriju siltumenerģijas patēriņa salīdzinājums. Tikai divi scenāriji (Sc2 un Sc3) ļautu nodrošināt zemas temperatūras sistēmu, nepaaugstinot elektroenerģijas apjomu, kas nepieciešams siltumnesēja pārvadīšanas sūkņu darbināšanai. Lai

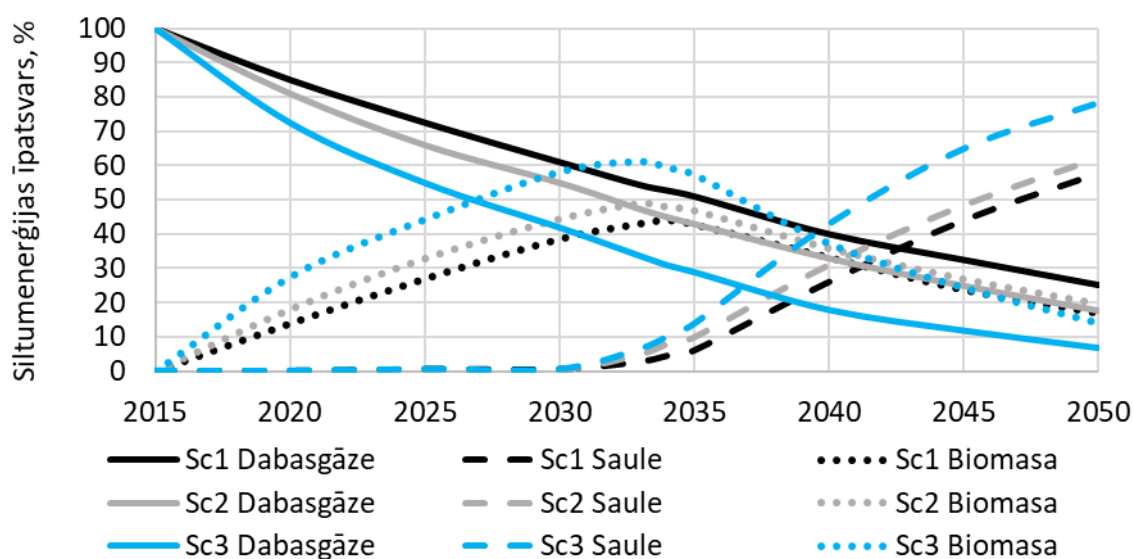
to sasniegtu, uzstādītā siltumenerģijas jauda ir jāpazemina līdz 67 % līmenim no bāzes scenārija vērtības.



2.7. att. Zemas temperatūras līmeņatzīme dažādos scenārijos.

Uzstādītā dabasgāzes siltumenerģijas ražošanas tehnoloģiju jauda gadījuma izpētes teritorijā ir 3,6 MW. Lai palielinātu atjaunojamās enerģijas īpatsvaru, ir jāaizstāj fosilā kurināmā tehnoloģijas ar AER tehnoloģijām, piemēram, ar biomasu vai sauli darbināmas (saules kolektori ar sezonālo akumulāciju) tehnoloģijas, kā arī siltumsūkņu tehnoloģijas.

Katra scenārija siltuma avotu plānojums izveidots, balstoties uz modelēto tehnoloģiju īpatsvaru 2050. gadā (2.8. att.). Atjaunojamās enerģijas tehnoloģiju (saules kolektori ar sezonālo akumulāciju un biomasas katli) īpatsvars pieaug no 75 % pirmajā scenārijā līdz 93 % trešajā scenārijā, tādējādi veicinot sistēmas pakāpenisku pāreju uz sistēmu ar zemu oglekļa saturu.



2.8. att. Siltumenerģijas tehnoloģiju īpatsvara dinamika dažādos scenārijos.

Apraksts ar izveidotajiem sistēmas tehnoloģiskajiem risinājumiem sniegts 2.3. tabulā.

Enerģijas taupīšanas pasākumu ieviešanas rezultātā investīcijas siltuma ražošanas avotā attiecībā pret ietaupīto siltumenerģijas apjomu samazinātos 2,65 reizes (Sc1 pret Sc3, 2.3. tabula).

2.3. tabula

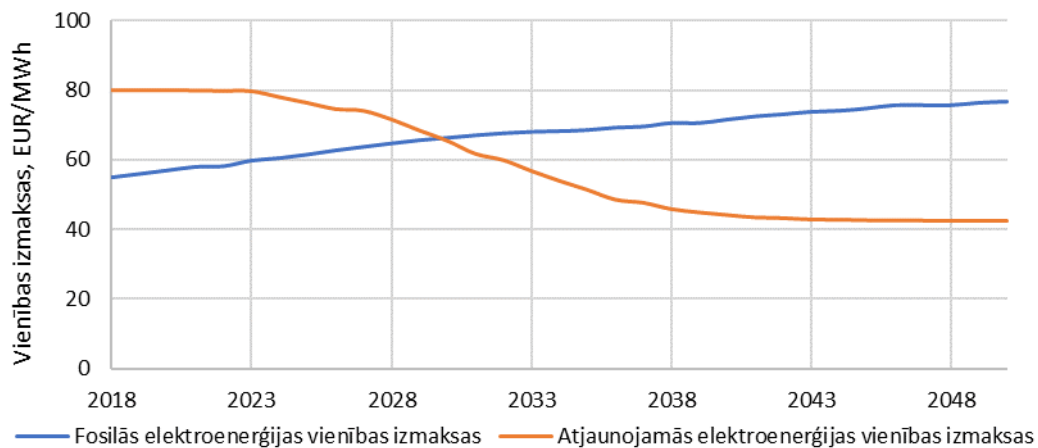
Siltuma avotu plānojums

Parametri	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs
Ar dabasgāzi saražotās enerģijas īpatsvars, %	25,17	17,76	6,94
Ar saules kolektoriem saražotās enerģijas īpatsvars, %	57,67	62,02	78,39
Ar biomasu saražotās enerģijas īpatsvars, %	16,98	19,83	14,16
Saules kolektoru platība, m ²	7367	5120	5429
Siltuma akumulācijas tilpums, m ³	15 170	11 584	16 434
Īpatnējās investīcijas siltuma avotā, EUR/MWh _{ietaupīts}	1467,2	691,3	554,4
Īpatnējās investīcijas siltuma avotā, EUR/MWh _{saražots}	406,3	497,4	550,1

Investīciju analīze rāda, ka investīciju apjoms uz saražoto siltumenerģijas vienību pieaug, tomēr to relatīvais pieaugums (1,35) ir mazāks, salīdzinot ar enerģijas ietaupījumu īpatnējām investīcijām. Iemesls tam var būt saules kolektoru ar sezonālo akumulāciju sistēmas izmēru izmaiņas (Sc2 – kolektoru platība ir 5120 m²; Sc3 – kolektoru platība ir 5429 m²) siltumapgādes sistēmā. To izmaksas būtiski ietekmē kopējās investīcijas.

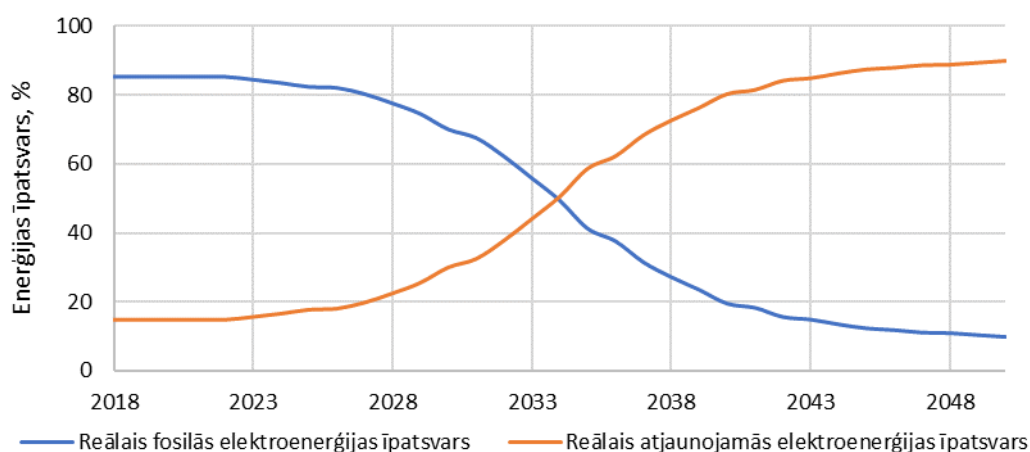
2.2. Elektroapgādes sektora elastība

2.9. attēlā redzams, ka fosilajos resursos balstītu elektroenerģijas ražošanas tehnoloģiju vienības izmaksas vienmērīgi pieaug, jo modelī netika iestrādātas atgriezeniskās saites un tika pieņemts, ka pieaugums notiek ārēju faktoru ietekmē. Vienlaikus uz AER balstītu elektroenerģijas ražošanas tehnoloģiju vienības izmaksu izmaiņas regulē pastiprinošā un balansējošā cilpa.



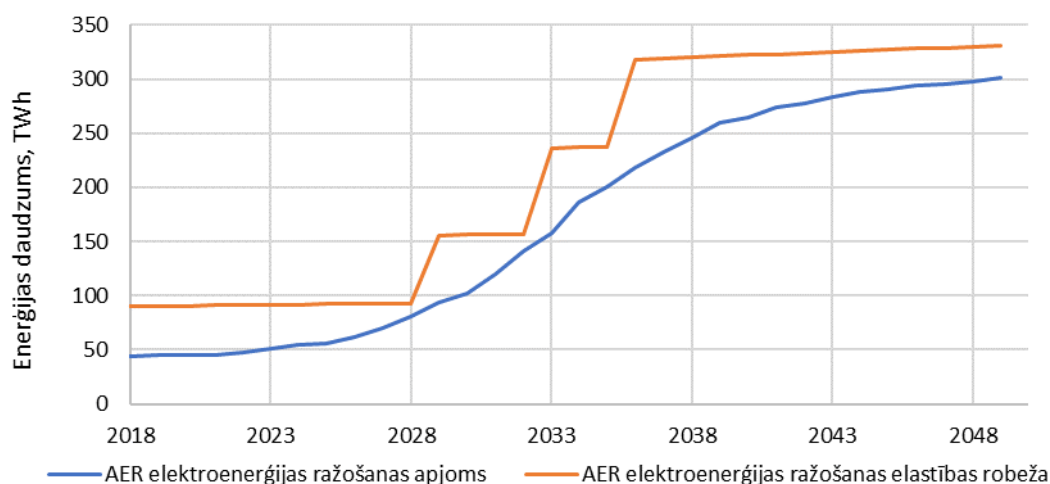
2.9. att. Fosilo resursu un AER elektroenerģijas ražošanas vienības izmaksu dinamika.

AER balstītu elektroenerģijas ražošanas tehnoloģiju vienības izmaksu samazinājums notiek pieredzes efekta ietekmē. 2.10. attēlā redzams, ka, jo vairāk fosilās tehnoloģijas tiek aizstātas ar AER tehnoloģijām un lielāka ir uzstādītā AER tehnoloģiju jauda, jo vairāk pieredzes tiek uzkrāts. Rezultātā ir vērojams AER tehnoloģiju vienības izmaksu samazinājums (2.9. att.). Šis samazinājums nevar turpināties ilgstoši, jo tehnoloģijām ir noteiktas robežas, līdz kurām iespējams veikt uzlabojumus pašreizējo zināšanu ietvarā. Tāpēc, tuvojoties maksimālajam tehnoloģijas piesātinājuma līmenim, samazinās jaunu jaudu uzstādīšanas temps un aizvien mazāk tiek veikti uzlabojumi tehnoloģijās, kā rezultātā AER tehnoloģiju vienības izmaksas nostabilizējas noteiktā līmenī.



2.10. att. Fosilās un atjaunojamās enerģijas īpatsvars.

Pāreja no fosilās enerģijas tehnoloģijām uz AER tehnoloģijām notiek pakāpeniski, jo elektroenerģijas ražošanas uzņēmumiem ir nepieciešams laiks, lai reaģētu uz tehnoloģiju vienību izmaksu izmaiņām, pieņemot lēmumu par jaunām investīcijām. Modelī tas ņemts vērā, izmantojot aizstāšanas elastības koeficientu. Lai gan AER tehnoloģiju vienības izmaksas kļūst zemākas par fosilo resursu tehnoloģiju vienības izmaksām jau ap 2030. gadu (2.9. att.), tomēr ir nepieciešami vairāki gadi, pirms no AER saražotās enerģijas īpatsvars enerģijas bilanci pāršniedz no fosilā kurināmā saražotās enerģijas īpatsvaru.



2.11. att. Atjaunojamās elektroenerģijas daudzums atkarībā no elastības robežas.

2.11. attēlā redzama no AER iegūtās elektroenerģijas ražošanas dinamika atkarībā no elastības robežas. Kad no AER saražotās elektroenerģijas daudzums tuvojas sistēmas elastības robežai, enerģētikas uzņēmumi kļūst mazāk ieinteresēti investēt jaunu AER tehnoloģiju jaudu uzstādīšanā, tāpēc jāievieš inovācijas, lai varētu pacelt sistēmas elastības robežu. Esošās tehnoloģiskās sistēmas sagraušānu inovāciju rezultātā modelē turpmāk raksturotajā veidā. Sasniedzot noteiktu no AER ražotas elektroenerģijas sliekšni (80 % no maksimālās esošās elastības robežas), sistēma tiek sagrauta, un tas rada jaunas un augstākas elastības robežas. Modelis parāda, ka, ja sliekšņa vērtību nosaka pārāk augstu (100 % vai tuvu tam), var kļūt neiespējami sasniegt noteikto sliekšni (jo tiek pārtrauktas investīcijas AER tehnoloģijās) un esošā sistēma netiek sagrauta. Tā rezultātā no AER saražotās enerģijas apjoms paliek zem sākotnējās elastības robežas, nostabilizējoties šajā pozīcijā.

2.2.1. Sektoru sasaiste nacionālajā līmenī

Šajā pētījumā testēti un salīdzināti četri dažādi scenāriji. Pirmais scenārijs apraksta situāciju, kad netiek ieviestas nekādas atbalsta politikas un sistēma attīstās, balstoties tirgus principos.

2.4. tabula

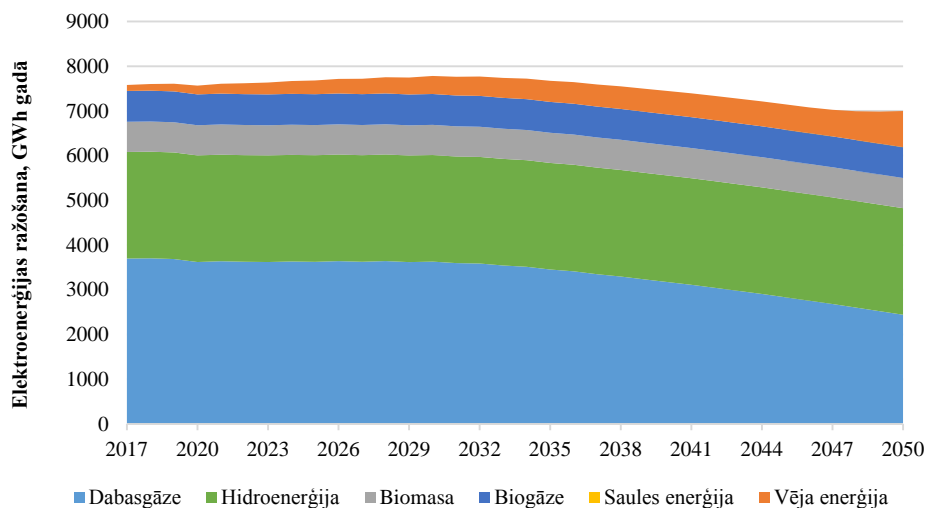
	Pētītie scenāriji		
	Kapitālizmaksu subsīdijas		Vejs
	<i>P2G</i>	<i>P2H</i>	
1. scenārijs			
2. scenārijs	70 %		
3. scenārijs		30 %	
4. scenārijs			30 %

Otrajā scenārijā tiek piešķirtas subsīdijas elektroenerģija-gāze pārveidošanas tehnoloģiju kapitālizmaksu segšanai, lai veicinātu *P2G* procesa attīstību. Latvija izmantota kā gadījuma izpētes piemērs, un, ņemot vērā labi attīstīto dabasgāzes infrastruktūru, *P2G* tehnoloģiskais risinājums tika uzskatīts kā dzīvotspējīgs risinājums elektroapgādes elastības veicināšanai.

Trešais scenārijs analizē elektroenerģija-siltumenerģija tehnoloģiskā risinājuma ietekmi uz elektroapgādes un siltumapgādes attīstību. Šajā scenārijā *P2H* tehnoloģiskajam risinājumam (siltumsūkņi) tiek piešķirtas subsīdijas kapitālizmaksām ar 30 % intensitāti.

Ceturtajā scenārijā vēja turbīnu tehnoloģijām (gan sauszemes, gan atkrastes) tiek piešķirtas subsīdijas kapitālizmaksu segšanai, lai veicinātu mainīgo AER tehnoloģiju attīstību un pieaugošu elektroenerģijas pārpalikumu gadījumā analizētu, vai tas veicina arī *P2H* un *P2G* tehnoloģiju attīstību.

Pirmā scenārija simulācijas rezultāti rāda, ka elektroapgādes sektora dekarbonizācija notiek ļoti lēni un bez papildu atbalsta instrumentiem AER tehnoloģiju ieviešanas veicināšanai dabasgāze saglabā savu dominējošo lomu elektroenerģijas ražošanā (2.12. att.).

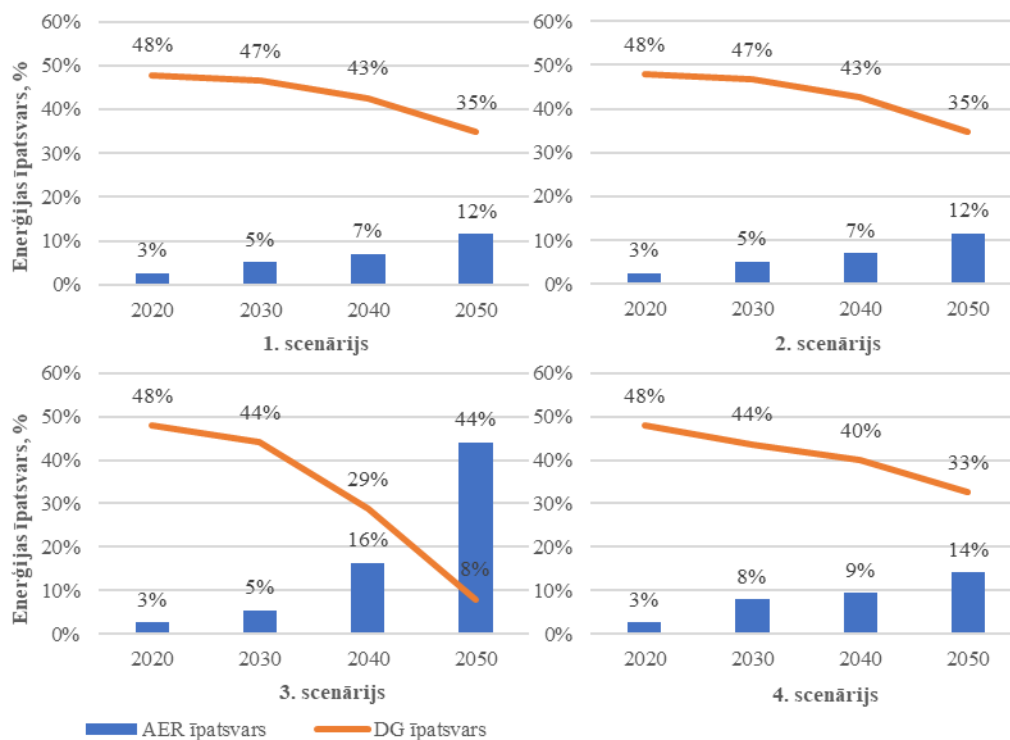


2.12. att. Elektroenerģijas ražošanas sektora attīstība (pirmais scenārijs).

Lai gan no dabaspāzes saražotās elektroenerģijas daudzums pirmajā scenārijā samazinājās par 34 %, ne viss apjoms tika aizstāts ar AER. No AER saražotās elektroenerģijas apjoms pieauga tikai par 17,4 %. Tas saistīts ar elektroenerģijas pieprasījuma samazinājumu 2050. gadā. Liela daļa no pašreizējā elektroenerģijas apjoma tiek ražots hidroelektrostacijās (HES), un tika pieņemts, ka HES jauda visu simulācijas periodu saglabāsies nemainīga un tās netiks likvidētas. Šajā pētījumā HES netiek apskatītas kā mainīgs AER. Mainīgo AER kategorijā iekļautas tikai saules un vēja tehnoloģijas. Redzams, ka pirmajā scenārijā vislielāko jaudas pieaugumu piedzīvo vēja enerģijas tehnoloģijas (+508,5 %), savukārt saules tehnoloģijas nesaņēma nepieciešamo impulsu, lai iekļūtu sistēmā. Jāpiebilst, ka pētījumā apskatīta tikai centralizēta elektroenerģijas ražošana, tāpēc mājsaimniecību saules paneļi un citi decentralizēti risinājumi netika modelēti un neparādīsies kopējā enerģijas bilancē.

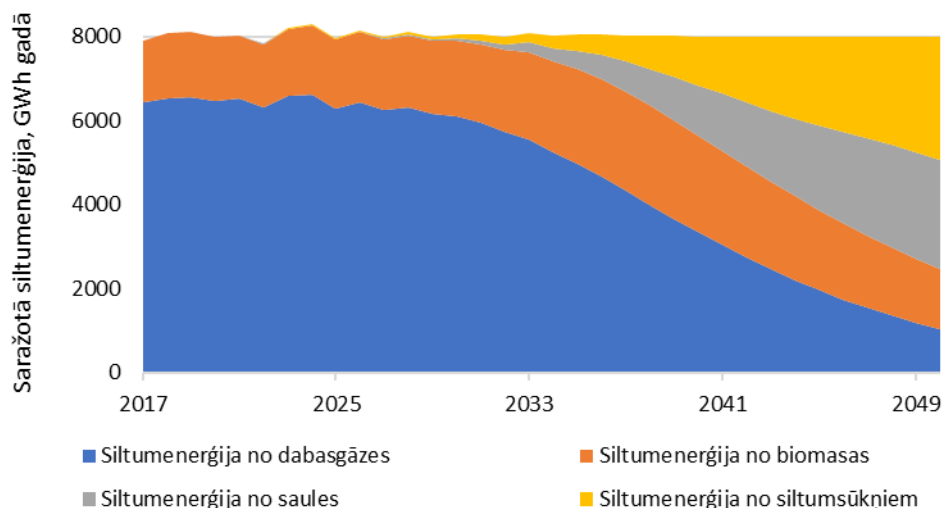
Salīdzinot visu četru scenāriju rezultātus, redzams, ka vislielāko iespaidu uz sistēmas uzvedību atstāj subsīdiju piešķiršana siltumsūkņiem jeb *P2H* risinājumam (2.13. att.).

Pirmais scenārijs, kurā netiek izmantoti atbalsta instrumenti, un otrais scenārijs, kurā tiek piešķirtas subsīdijas *P2G* risinājumam, uzrādīja gandrīz identiskus rezultātus AER un dabaspāzes īpatsvaram 2050. gadā (2.13. att.). To var skaidrot ar faktu, ka, lai gan dabaspāzes infrastruktūra ir ļoti labi attīstīta un *P2G* risinājumam tiek piešķirtas subsīdijas 70 % apmērā no kapitālizmaksām, kopējās izmaksas joprojām ir pārāk augstas, lai *P2G* risinājums būtu ekonomiski dzīvotspējīgs. Tikai 7 % no elektroenerģijas pārpalikuma otrajā scenārijā tika izmantoti *P2G* risinājumam, savukārt citos scenārijos šis skaitlis bija mazāks par 1 %. Tas nozīmē, ka, visticamāk, nepieciešami vēl citi atbalsta pasākumi, piemēram, samazināta elektroenerģijas tīkla maksa, lai *P2G* risinājumu padarītu investoriem pievilcīgu.



2.13. att. Mainīgo AER un dabasgāzes īpatsvara salīdzinājums visiem scenārijiem.

Ceturtais scenārijs, kurā subsīdijas tiek piešķirtas vēja enerģijas tehnoloģijām, dod tikai 2 % AER īpatsvara pieaugumu, salīdzinot ar pirmo scenāriju. Iespējams, tas ir tāpēc, ka lielu daļu enerģijas iegūst no HES. Tas nozīmē, ka, lai palielinātu mainīgo AER īpatsvaru, ir jāaizstāj dabasgāzes tehnoloģijas, taču 30 % atbalsta intensitāte nav pietiekama.

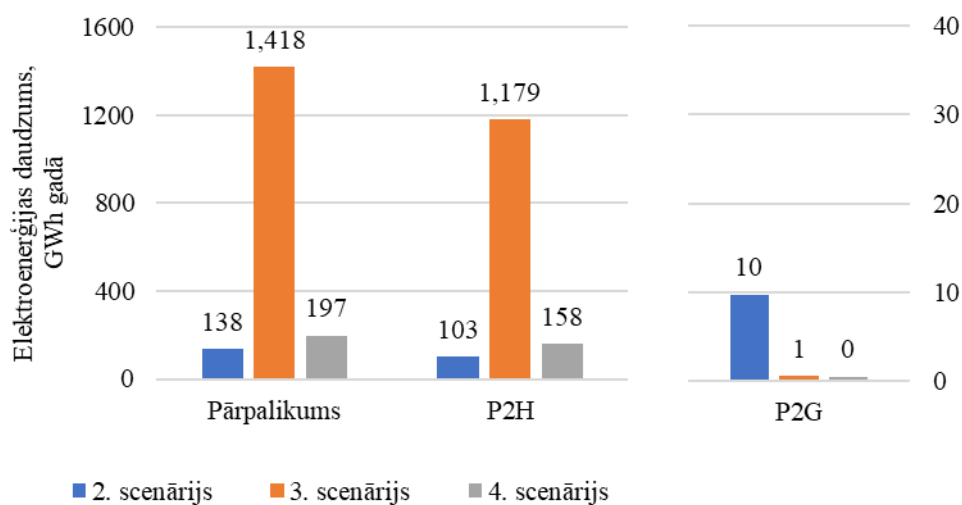


2.14. att. Siltumenerģijas ražošanas sektora attīstība (trešais scenārijs).

Atšķirīgs rezultāts vērojams trešajā scenārijā, kad finansiāls atbalsts tiek piešķirts *P2H* risinājumam CSA. 2.14. attēlā redzams, ka ar siltumsūkņiem (tehnoloģija, kas izmantota *P2H* risinājumam) 2050. gadā tiek saražoti 37 % no kopējā siltumenerģijas daudzuma, savukārt dabasgāzes izmantošanas īpatsvars samazinās no 81 % līdz 13 %. Jāatzīmē, ka *P2H* var

attīstīties tikai tad, ja ir pietiekams AER elektroenerģijas pārpalikums, un trešajā scenārijā gan vēja, gan *P2H* tehnoloģijas attīstās straujāk nekā citos scenārijos. Kā iemesls būtu jāmin tas, ka elektroapgādes un siltumapgādes sektori sistēmā ir sasaistīti arī ar dabasgāzes koģenerācijas tehnoloģijām. Lai elektroenerģijas ražošanā aizstātu dabasgāzes tehnoloģijas, ir vienlaikus jāaizstāj attiecīgās tehnoloģijas arī siltumenerģijas ražošanā, lai neveidotos siltumenerģijas iztrūkums. Siltumenerģijas ražošana koģenerācijā tiek skatīta kā galvenā prioritāte, jo tai ir jāsedz noteikta siltumenerģijas pieprasījuma daļa attiecīgajā rajonā un to nav iespējams slēgt, pirms nav iegādāta alternatīva siltumenerģijas ražošanas tehnoloģija, pat tad, ja pieejams atbalsts elektroenerģijas tehnoloģiju nomainīšanai. Atšķirīga situācija ir ar atbalsta pieejamību siltumenerģijas tehnoloģiju nomainīšanai. Koģenerācijas staciju var slēgt, ja atbalsts ļauj to aizstāt ar citu siltumenerģijas ražošanas tehnoloģiju, neskatoties uz elektroenerģijas sektoru, jo elektroenerģijas iztrūkumu īstermiņā var aizstāt ar elektroenerģijas importu. Tas būtu rentablāk nekā koģenerācijas stacijā elektroenerģijas ražošanu pārslēgt uz kondensācijas režīmu.

Subsīdijas siltumsūkņu kapitālizmaksām ļautu mainīgo AER īpatsvaru elektroenerģijas ražošanā pacelt līdz 44 % un dabasgāzes īpatsvaru samazināt līdz 8 % 2050. gadā (2.13. att.). Tas ir vislabākais energoapgādes dekarbonizācijas scenārijs, kā arī vislabākais sektoru sasaistes scenārijs, kam piemīt visaugstākais elastības līmenis.



2.15. att. Sektoru sasaistes līmenis dažādos scenārijos.

2.15. attēlā salīdzināts sektoru sasaistes līmenis dažādos scenārijos. Kā jau minēts iepriekš, vislielākais elektroenerģijas pārpalikums veidojas trešajā scenārijā, kurā ir arī augstākais *P2H* ražošanas apjoms. Tas ir scenārijs, kurā tiek piešķirtas subsīdijas siltumsūkņiem. Nākamais veiksmīgākais scenārijs ir ceturtais scenārijs ar atbalstu vēja tehnoloģijām. Tikai otrajā scenārijā konstatējams vērā ņemams sintētiskās dabasgāzes ražošanas apjoms, kas iegūts, izmantojot *P2G* procesu, taču pat šajā scenārijā *P2G* nespēj konkurēt ar *P2H* risinājumu un dabasgāzes cenu, tāpēc nepieciešami vēl papildu tehnoloģiju attīstības pētījumi, lai risinājumu padarītu konkurētspējīgu.

2.2.2. Sektoru sasaiste lokālajā līmenī

Izveidotais sistēmdinamikas modelis izvērtē dažādas saules elektroenerģijas sistēmu konfigurācijas un atjaunojamās enerģijas atbalsta politikas instrumentus. 2.5. tabulā apkopoti analizētie scenāriji.

1., 2. un 5. scenārijs apraksta sistēmu ar dažādām uzstādītajām saules paneļu platībām bez siltumsūkņu jeb *P2H* koncepta integrēšanas. Saules enerģija tiek izmantota tikai pašpatēriņam vai nodota tīklā.

3., 4., 6. un 7. scenārijā parādīta siltumsūkņu uzstādītās jaudas ietekme uz sistēmu, ja uzstādītās saules paneļu platības ir 1000 m² un 500 m². Izmantotā vērtība apraksta to saules paneļu slodzes daļu, ko tiešā veidā var izmantot siltumenerģijas ražošanai ar siltumsūkņiem.

8.–12. scenārijs apraksta gadījumus, kad tiek piešķirts papildu atbalsts atjaunojamās enerģijas tehnoloģijām subsīdiju formā, lai daļēji segtu saules paneļu un siltumsūkņu investīciju izmaksas. 13.–16. scenārijs parāda elektroenerģijas un siltumenerģijas tarifu pieauguma ietekmi uz sistēmu, jo tie tieši ietekmē ekonomiskos ieguvumus no elektroenerģijas pārveidošanas siltumenerģijā.

2.5. tabula

Analizēto scenāriju pārskats

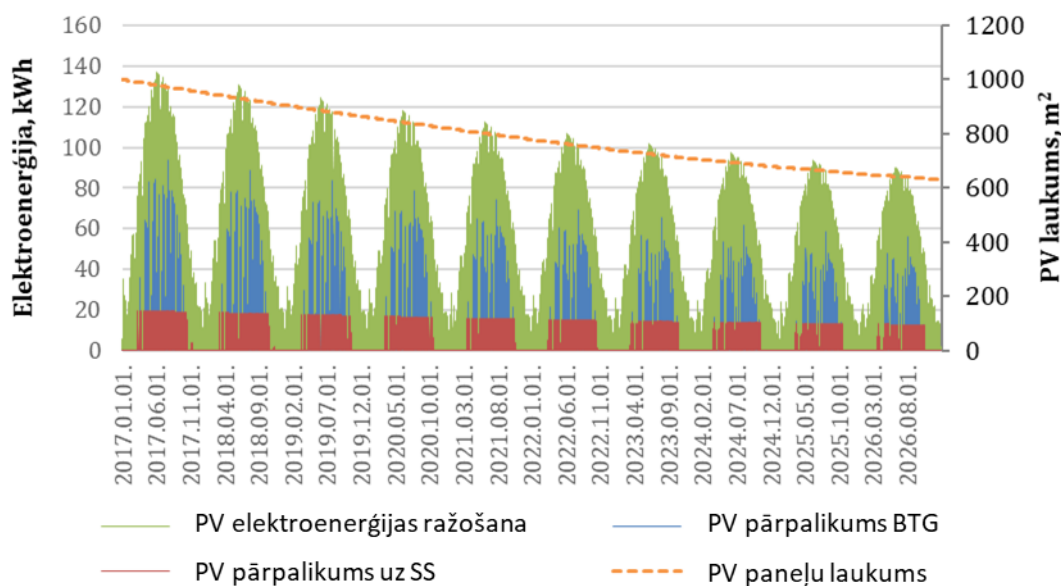
	Sākotnējā PV platība	Siltumsūkņa jaudas faktors	PV subsīdijas	Siltumsūkņu subsīdijas	Elektroenerģijas cenās pieaugums	Siltumenerģijas cenās pieaugums
	m ²	–	%	%	%	%
Bāzes scenārijs	1000	0,1	0	0	0	0
Sc1	100	0	0	0	0	0
Sc2	1000	0	0	0	0	0
Sc3	1000	0,05	0	0	0	0
Sc4	1000	0,2	0	0	0	0
Sc5	500	0	0	0	0	0
Sc6	500	0,05	0	0	0	0
Sc7	500	0,1	0	0	0	0
Sc8	1000	0,1	20	0	0	0
Sc9	1000	0,1	40	0	0	0
Sc10	1000	0,1	0	20	0	0
Sc11	1000	0,1	0	40	0	0
Sc12	1000	0,1	40	40	0	0
Sc13	1000	0,1	0	0	20	0
Sc14	1000	0,1	0	0	50	0
Sc15	1000	0,1	0	0	0	20
Sc16	1000	0,1	0	0	0	50

Bāzes scenārijs apraksta saules paneļu sistēmu, kuras uzstādītā platība ir 1000 m² un sākotnējā siltumsūkņu jauda ir 20 kW. Saules elektroenerģijas ražošana modelēta, izmantojot pieejamos ikstundas saules radiācijas datus. Saules elektroenerģijas ražošana saskaņota ar ikstundas elektroenerģijas patēriņu un elektroenerģijas tirgus cenu.

2.16. attēls parāda saražoto saules elektroenerģijas daudzumu, kā arī saražotās enerģijas pārpalikuma izmantošanu. Saules elektroenerģijas īpatsvars kopējā uzņēmuma patēriņā pirmajā gadā veido 20 %, samazinās līdz 13 % – septītajā gadā. Aptuveni 81 % no saražotās

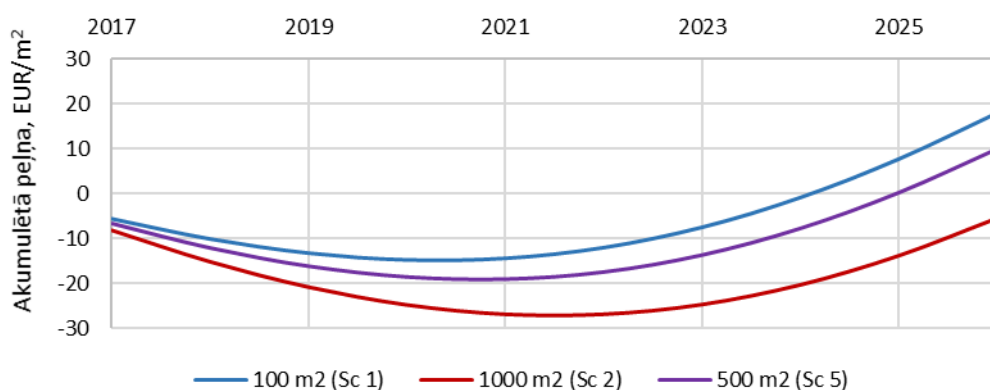
enerģijas tiek izmantots pašpatēriņam, kas nozīmē, ka atlikusī enerģijas daļa ir elektroenerģijas pārpalikums. To iespējams nodot tīklā vai, izmantojot siltumsūkņus, pārvērst siltumenerģijā, ja elektroenerģijas tirgus cena ir zema.

Uzstādītā saules paneļu platība 10 gadu laikā samazinās no 1000 m² līdz 630 m², jo tiek pieņemts, ka ne visi paneļi nokalpos pilnu kalpošanas laiku, ko noteicis paneļu ražotājs. Ja saules paneļi uzrādītu augstu ekonomisko izdevīgumu, uzņēmums būtu gatavs investēt papildu paneļos. Šādā gadījumā, ja investīcijas būtu augstākas par tehnoloģiju nolietojuma tempu, saules paneļu platība pieaugtu.



2.16. att. Saražotā saules elektroenerģija, pārpalikumu izmantošana un izmaiņas uzstādītajā saules paneļu platībā bāzes scenārijā (PV – saules paneļi, SS – siltumsūkņi, BTG – elektroenerģijas nodošana tīklā).

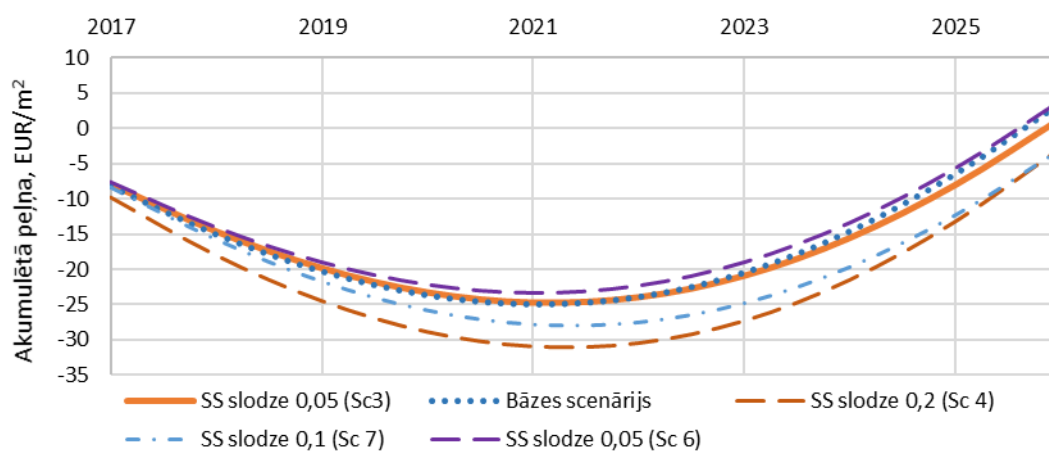
Aptuveni 47 % no elektroenerģijas pārpalikuma tiek pārvērsti siltumenerģijā un nodoti CSA tīklā, savukārt atlikušais apjoms tiek nodots elektroenerģijas sadales tīklā. Tomēr elektroenerģijas pārvēršanu siltumenerģijā limitē uzstādītā siltumsūkņu jauda, tāpēc daļa no saules elektroenerģijas pārpalikuma tiek nodota tīklā tikai nepietiekamas siltumsūkņu jaudas dēļ.



2.17. att. Scenāriju bez siltumsūkņiem īpatnējā akumulētā peļņa.

Lai savstarpēji salīdzinātu dažādus scenārijus gan ar siltumsūkņu uzstādīšanu, gan bez tās, kā galvenais indikators vērtēta akumulētā peļņa no 1 m² uzstādītās saules paneļu platības. 2.17. attēlā redzami scenāriji, kuros siltumsūkņi netiek izmantoti, un viss elektroenerģijas pārpalikums tiek nodots tīklā (ja ir elektroenerģijas pārpalikums). Visaugstākais peļņas rādītājs un visātrākais atmaksāšanās laiks tiek sasniegts pirmajā scenārijā ar 100 m² uzstādīto saules paneļu platību. Kopējā akumulētā peļņa 2026. gadā ir 18 EUR/m². 2.17. attēlā redzams, ka otrais scenārijs nav ienesīgs un tā atmaksāšanās laiks ir ilgāks par simulācijas periodu, savukārt 500 m² saules paneļu platība dod 10 EUR/m² akumulēto peļņu.

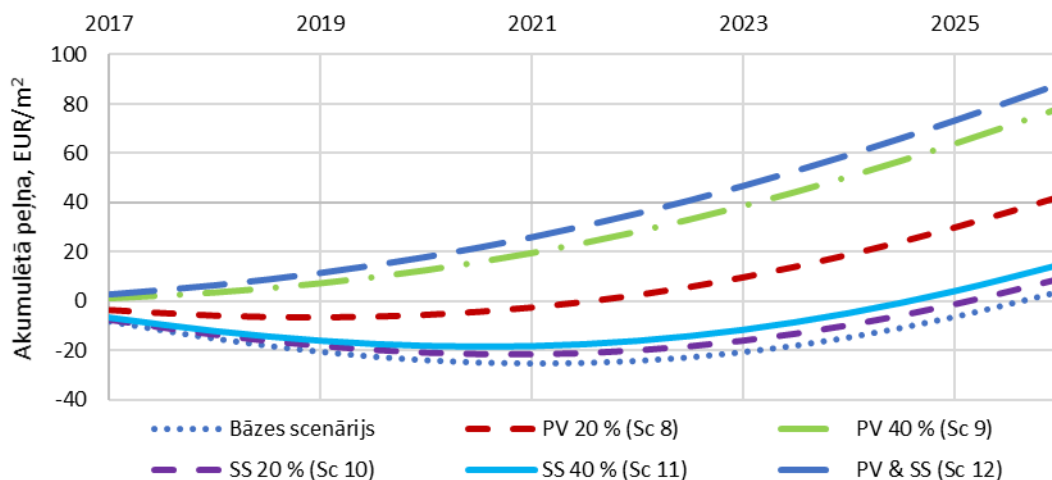
2.18. attēlā redzams, ka visaugstākie akumulētās peļņas rādītāji ir bāzes scenārijam un sestajam scenārijam (500 m² saules paneļi + siltumsūkņi). Viszemākie peļņas rādītāji ir ceturtajam un septītajam scenārijam, kurā izmantotas lielākas siltumsūkņu jaudas.



2.18. att. Īpatnējā akumulētā peļņa scenārijiem ar siltumsūkņiem (SS – siltumsūkņi).

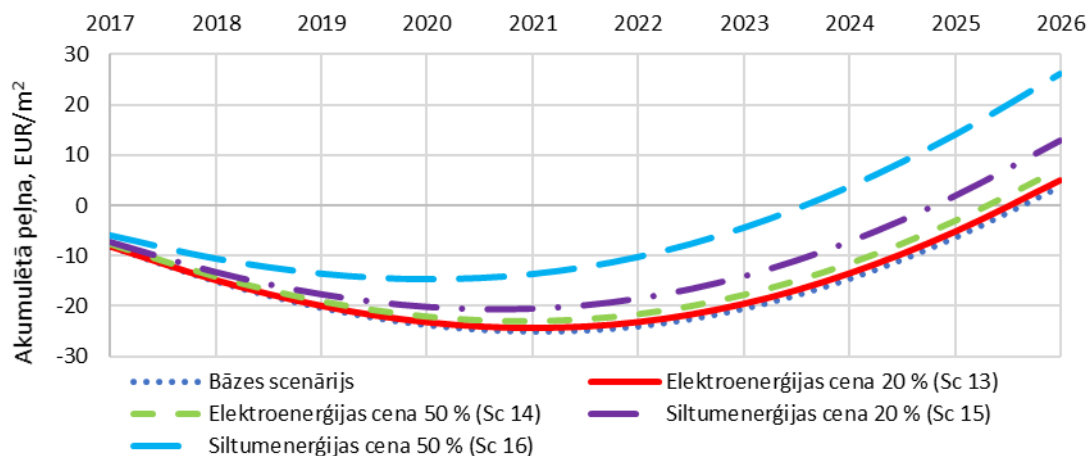
Vairāki pētnieki savos pētījumos uzsver, ka *P2H* konceptu iespējams padarīt izdevīgāku ar papildu atbalsta instrumentiem vai atšķirīgām tarifa struktūrām [9], [20], [21]. Šajā pētījumā analizētie scenāriji ietver papildu atbalstu subsīdiju formā gan saules paneļu, gan siltumsūkņu iegādei un uzstādīšanai.

2.19. attēlā redzami akumulētās peļņas rādītāji scenārijiem ar finansiālu atbalstu subsīdiju formā. Iegūtie rezultāti salīdzināti ar bāzes scenāriju. Scenāriji ar subsīdiju piešķiršanu saules paneļu uzstādīšanai (20 % un 40 %) uzrāda augstākus akumulētās peļņas rādītājus nekā scenāriji ar atbalstu siltumsūkņiem. Visaugstākā vērtība (88,25 EUR/m²) tiek sasniegta 12. scenārijā, kad atbalsts tiek piešķirts gan saules paneļiem, gan siltumsūkņiem. Tikai nedaudz zemāks rezultāts ir devītajam scenārijam, kurā atbalsts 40 % apmērā tiek piešķirts tikai saules paneļu iegādei un uzstādīšanai.



2.19. att. Īpatnējā akumulētā peļņa dažādiem scenārijiem ar atbalsta instrumentiem (PV – saules paneļi, SS – siltumsūkņi).

2.20. attēlā redzams, kādu ietekmi uz saules paneļu akumulētās peļņas rādītājiem atstāj elektroenerģijas un siltumenerģijas cenu pieaugums. Ja siltumenerģijas tarifs paaugstinās par 20 %, akumulētā peļņa pieaug par 71 % 15. scenārijā, savukārt elektroenerģijas cenas pieaugums nedod tikpat strauju peļņas rādītāju pieaugumu.



2.20. att. Īpatnējā akumulētā peļņa dažādiem scenārijiem ar paaugstinātu elektroenerģijas un siltumenerģijas tarifu.

Elektroenerģijas pārpalikumu, kas tiek pārvērsts siltumenerģijā, īpatsvars nepieaug papildu atbalsta pasākumu vai augstāka siltumenerģijas tarifa gadījumā. Tas ir saistīts ar siltumsūkņu jaudas ierobežojumiem, kas neļauj pārvērst lielāku elektroenerģijas pārpalikumu daļu siltumenerģijā.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā analizēti dažādi siltumapgādes sistēmas modeļi un scenāriji. Rezultāti liecina, ka AER integrācija siltumapgādes sistēmā ir ne tikai iespējama, bet nākotnē tas būs ekonomiski visizdevīgākais risinājums. Tas galvenokārt notiks AER tehnoloģiju attīstības rezultātā, kas veicinās kapitālizmaksu samazināšanos, un būtiska loma siltumapgādes sistēmas transformēšanā būs arī dažādām politikām, kas vērstas uz oglekļa nospieduma mazināšanu.

Vērtējot siltumapgādes sistēmu atsevišķi no elektroapgādes sistēmas, galveno konkurenci fosilās enerģijas tehnoloģijām veidos saules un biomasas tehnoloģijas. Sākotnējie rezultāti liecina, ka, izmantojot atbilstošus atbalsta pasākumus, CSA sistēma bez problēmām var sasniegt augstu atjaunojamās enerģijas piesātinājuma līmeni. Rezultāti redzami 2.1.1. apakšnodaļā. Individuālajā siltumapgādē pāreja uz AER ir lēnāka. Ir jātestē individuālās siltumapgādes papildu atbalsta politikas, lai virzītu sistēmu tuvāk oglekļa neitralitātei.

Nacionālā mēroga modelis paredz, ka AER īpatsvars individuālajā siltumapgādē bāzes scenārijā varētu pieaugt no sākotnējiem 59 % 2017. gadā līdz 77 % 2050. gadā, bet promocijas darbā norādīto politiku scenārijā pat līdz 83 %. Centralizētajā siltumapgādē politiku scenārijs parāda vēl ievērojamāku AER īpatsvara pieaugumu. Centralizētajā siltumapgādē AER īpatsvars bāzes scenārijā varētu pieaugt no sākotnējiem 47 % 2017. gadā līdz 83,5 % 2050. gadā, bet promocijas darbā norādīto politiku scenārijā pat līdz 97 %. Tas nozīmē, ka gan individuālajai, gan centralizētajai siltumapgādei ir augsts AER izmantošanas potenciāls, tomēr pašreizējais un tuvākajā nākotnē plānotais politikas ietvars ir labvēlīgāks centralizētās siltumapgādes sistēmām. Tas rezultējas zemākā AER īpatsvarā individuālajā siltumapgādē.

Arī lokālā mēroga centralizētās siltumapgādes sistēmas modelis rāda augstu atjaunojamās enerģijas potenciālu. Sākotnējā sistēmas pāreja notiek biomasas izmantošanas virzienā, tomēr 2050. gadā sistēmā jau dominā saules kolektoru ar sezonālo akumulāciju izmantošana. AER īpatsvars lokālajā sistēmā 2050. gadā pārsniedz 92 %.

Elektroapgādes sektora attīstība AER virzienā ir nenovēršama, jo ES ir definējusi mērķi līdz 2050. gadam sasniegt oglekļa neitralitāti. Tas nozīmē, ka mainīgo AER integrācija elektroapgādes sistēmā ir nenovēršama un tas pilnībā pārveidos elektroapgādes sektoru. Šim sektoram būs jāklūst daudz elastīgākam, lai spētu sabalansēt ražošanas un patēriņa slodzes brīdī, kad sistēmā būs sasniegts augsts atjaunojamās enerģijas īpatsvars. Būs jāievieš dažādi elastību veicinoši pasākumi, piemēram, sektoru sasaiste.

Konceptuālais elektroapgādes sistēmas modelis parāda elektroapgādes sistēmas elastības paaugstināšanas nozīmību uz atjaunojamo energoresurus integrēšanu sistēmā. Esošās tehnoloģiskās sistēmas sagraušana inovāciju rezultātā ir būtiska, lai veicinātu elastības robežas paaugstināšanu. Pašreizējā elastības robeža ir nepietiekama, lai nodrošinātu augstu atjaunojamās enerģijas izmantošanu elektroapgādē, tai pašā laikā neradot nestabilitāti sistēmā. Lai atjaunojamo enerģiju padarītu pievilcīgāku un veicinātu sliekšņa pārkāpšanu, aiz kura notiek esošās sistēmas sagraušana un jaunas izveidošana, uz esošo sistēmu nepieciešams izdarīt spiedienu mērķētu politiku formā.

Sektoru sasaiste var palīdzēt balansēt sistēmu, un brīžos, kad atjaunojamās enerģijas ražošana sasniedz pīķi un veidojas elektroenerģijas pārpalikumi, ir iespēja pārvērst šo enerģiju citās enerģijas formās. Tā, piemēram, var būt gāze vai siltumenerģija, ko ir vieglāk uzkrāt nekā elektroenerģiju. Siltumapgādes sistēma var būt ieguvēja no šīs sasaistes, un atjaunojamā elektroenerģija var kļūt par vienu no galvenajiem enerģijas avotiem CSA. 2.2.1. apakšnodaļas rezultāti liecina, ka sektoru sasaiste var kļūt par abu sektoru attīstības dzinējspēku. Ja ir augsts pieprasījums pēc atjaunojamās elektroenerģijas pārpalikumiem, elektroapgādes sektors daudz labprātāk investēs jaunu mainīgo AER tehnoloģiju uzstādīšanā, savukārt CSA uzņēmumi daudz labprātāk investētu siltumsūkņos, ja zinātu, ka būs pieejama lēta atjaunojamā elektroenerģija, ar ko tos darbināt. Nacionālā mēroga sektoru sasaistes modeļa rezultāti norāda uz augstu sasaistes potenciālu starp elektroapgādes un siltumapgādes sektoriem. Atbalsta piešķiršana siltumsūkņu tehnoloģijām ļautu paaugstināt atjaunojamās elektroenerģijas izmantošanu siltumenerģijas ražošanā līdz pat 37 % no kopējā siltumenerģijas apjoma. Atjaunojamās enerģijas izmantošana centralizētajā siltumapgādē veicinātu arī mainīgo atjaunojamo energoresursu izmantošanas īpatsvara pieaugumu elektroenerģijas ražošanā līdz 44 %, ņemot vērā pieaugošo pieprasījumu pēc mainīgās atjaunojamās enerģijas.

Lokālā mēroga sistēma arī norāda uz elektroapgādes un siltumapgādes sektoru sasaistes ekonomisko izdevīgumu, tomēr ir svarīgi izvēlēties atbilstošas uzstādītās siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas jaudas. Saules PV jaudu būtu jābalsta uz uzņēmuma elektroenerģijas patēriņu. Ja sistēma būs par lielu, arī atmaksāšanās laiks būs ilgāks. Tas pats attiecas uz siltumsūkņiem. Atbilstoša jauda būtu jāizvēlas, balstoties uz plānoto elektroenerģijas pārpalikumu. Lielākas siltumsūkņu jaudas nodrošinātu iespēju izmantot visu elektroenerģijas pārpalikumu pārveidošanai siltumā pīķa ražošanas periodos, tomēr pārējā laikā siltumsūkņu jaudas tiktu nepilnīgi noslogotas. Tas nozīmētu ilgāku atmaksāšanās laiku siltumsūkņu tehnoloģijām. Pareizi izvēlētām sistēmām atmaksāšanās laiks var būt robežās no septiņiem līdz deviņiem gadiem, bet ar papildu atbalstu sistēma var kļūt izdevīga jau pirmā gada laikā.

Gan valsts, gan lokāla mēroga modeļi norāda uz atjaunojamās enerģijas potenciālu integrēšanai siltumapgādes un elektroapgādes sistēmā, kas liecina par to, ka ne tikai liela mēroga, bet arī mazākās sistēmās AER tehnoloģiju uzstādīšana ir ekonomiski pamatota.

Dažādu politiku testēšana rāda, ka noteikti politikas pasākumi, piemēram, atbalsts AER tehnoloģijām, nodokļu celšana fosilajām tehnoloģijām, galapatērētāju energoefektivitātes pasākumi u. c., spēj stimulēt AER integrēšanu energosistēmā un fosilo resursu aizstāšanu. Tomēr analizētie politikas instrumenti ir nepietiekami, lai energosistēmu līdz 2050. gadam padarītu oglekļa neitrālu. Tas nozīmē, ka ir jāanalizē vēl citi politikas instrumenti, īpaši individuālās siltumapgādes sistēmām.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Sayegh, M. A.; Danielewicz, J.; Nannou, T.; Miniewicz, M.; Jadwiszczak, P.; Piekarska, K.; Jouhara, H. 2017. Trends of European research and development in district heating technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68: 1183–1192.
- [2] International Renewable Energy Agency, “Renewable Energy Prospects for the European Union”, 2018.
- [3] Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; Svendsen, S.; Thorsen, J. E.; Hvelplund, F. et al. 2014. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 68:1–11.
- [4] J. M. Alemany, B. Arendarski, P. Lombardi, and P. Komarnicki, “Accentuating the renewable energy exploitation: Evaluation of flexibility options”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, pp. 131–151, Nov. 2018.
- [5] W. Deason, “Comparison of 100 % renewable energy system scenarios with a focus on flexibility and cost”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 3168–3178, Feb. 2018.
- [6] Verdolini E, Vona F, Popp D. Bridging the gap: Do fast-reacting fossil technologies facilitate renewable energy diffusion? *Energy Policy* 2018;116:242–256.
- [7] Alizadeh MI, Parsa Moghaddam M, Amjady N, Siano P, Sheikh-El-Eslami M. K. Flexibility in future power systems with high renewable penetration: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;57:1186–1193.
- [8] Bertsch J., Growitsch C., Lorenczik S., Nagl S. Flexibility in Europe's power sector — An additional requirement or an automatic complement? *Energy Economics* 53 (2016) 118–131.
- [9] Moller Sneum D., Sandberg E., Koduvere H., Olsend O. J., Blumberga D. Policy incentives for flexible district heating in the Baltic countries. *Utilities Policies* 51 (2018) 61–72.
- [10] The Public Utilities Commission. Methodology for Calculation of Heat Supply Tariff. 2010 <http://likumi.lv/doc.php?id=208283>.
- [11] Feldman D., Barbose G., Margolis R., James T. et al. Photovoltaic System Pricing Trends Historical, Recent, and Near-Term Projections 2014 Edition. Available online: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64898.pdf> [05.05.2018].
- [12] Nemet G., O'Shaughnessy E., Wiser R. H., Darghouth N. R., Barbose G. L., Gillingham K., Rai V. What factors affect the prices of low-priced U.S. solar PV systems? *Renewable Energy* 114 (2017) 1333–39.
- [13] Vellini M., Gambini M., Prattella V. Environmental impacts of PV technology throughout the life cycle: Importance of the end-of-life management for Si-panels and CdTe-panels. *Energy* 138 (2017) 1099–111.
- [14] Elibol E., Özmen O. T., Tutkun O. K. Outdoor performance analysis of different PV panel types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 651–61.
- [15] Meteorological database. Available online www.meteo.lv [20.12.2018].

- [16] Lerch W., Heinz A., Heimrath R. Direct use of solar energy as heat source for a heat pump in comparison to a conventional parallel solar air heat pump system. *Energy and Buildings* 100 (2015) 34–42.
- [17] Sayegh M. A., Jadwiszczak P., Axcell B. P., Niemierka E., Bryś K., Jouhara H. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy and Buildings* 166 (2018) 122–144.
- [18] Cabinet of Ministers of Latvia. Regulation No. 46 “On the National Energy and Climate Plan of Latvia for 2021–2030”. *Latvijas Vēstnesis*, 29, 11.02.2020.
- [19] Regulation of the Republic of Latvia Nr. 383. Regulations on the energy certification of building. *Latvijas Vēstnesis*, 2013: 138 (4844).
- [20] Schweiger G., Rantzer J., Ericsson K., Lauenburg P. The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems *Energy* 137 (2017) 661–669.
- [21] Kirkerud G. J., Bolkesjø T. F., Trømborg E. Power-to-heat as a flexibility measure for integration of renewable energy. *Energy* 128 (2017) 776–784.