

Jānis Kramens

ENERGOAPGĀDES DROŠĪBAS TEHNOLOĢIJAS: STIRLINGA DZINĒJS

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Jānis Kramens

Doktora studiju programmas "Vides inženierija" doktorants

ENERGOAPGĀDES DROŠĪBAS TEHNOLOĢIJAS: STIRLINGA DZINĒJS

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji:

Dr. sc. ing. EDGARS VĪGANTS

Dr. sc. ing. VLADIMIRS KIRSANOVS

Rīga 2024

Anotācija

Mūsdienu dzīve vairs nav iedomājama bez stabilas un nepārtrauktas siltuma un elektroenerģijas piegādes mājsaimniecībām, sabiedriskajām ēkām un industriālajiem objektiem. Sabiedrība ir pieradusi un pat liekas pašsaprotami, ka gan siltuma enerģija gan elektroenerģija ir pieejama un nav pamata uztraukumam, ka tā var tikt traucēta, ja nu gandrīz vienīgais satraukums ir par tās izmaksām.

Diemžēl energoapgādes drošība ir diezgan trausla un tā var tikt ietekmēta vairākos veidos, gan dabas katastrofas, gan cilvēku apzināta rīcība, gan tehnoloģiskās kļūmes iekārtās, neviena iekārta nav absolūti droša pret bojājumiem.

Krievijas 2022 gadā uzsāktā karadarbība Ukrainā parādīja, ka tieši energoapgādes drošība ir viens no vissvarīgākajiem jautājumiem, lai cilvēki varētu izdzīvot un tieši energoapgādes sektoru Krievija Ukrainā centās iznīcināt, tādējādi paralizējot valsts darbību, bet pateicoties milzīgām pūlēm Ukraina joprojām spēj nodrošināt svarīgāko objektu energoapgādi.

Miera apstākļos sabiedrība vairāk domā par ekonomiskajiem un vides aspektiem energoapgādes jomā, bet mazāk par sociālajiem, jo tie šķiet pašsaprotami. Karadarbības vai citu krīžu apstākļos prioritātes mainās, pirmajā vietā izvirzot enerģijas pieejamību, vides aspektus atvirzot zemākā prioritātē, bet jāsaprot, ka sākotnējo vides aspektu atvirzīšana zemākā prioritātē pastarpināti tomēr iekļauj arī ietekmi uz vidi faktoros, kā piemēru minot ūdens attīrīšanas sistēmu darbību, veselības aprūpes sektoru, ja tā tiek traucēta, ietekme uz vidi var būt nekontrolējama.

Kā vieno no būtiskākajām dilemmām, kuras tika apskatītas promocijas darba izstrādes gaitā, kurš no energoapgādes modeļiem ir stabilāks, centralizēta vai decentralizētā energoapgāde. Tika izmantotas vairākas metodes, lai pārlicinātos par energoapgādes modeļa stabilitāti.

Īpaša uzmanība tika pievērsta tehnoloģijām, kuras var vienlaicīgi ražot gan siltuma, gan elektroenerģiju, tādējādi piešķirot patērētājam lielāku autonomiju no centralizētās energoapgādes sistēmas.

Promocijas darbs balstās uz sešām publikācijām, kuras tika izstrādātas un publicētas darba izstrādes laikā.

Darbs sastāv no literatūras izpētes daļas, metodoloģijas, rezultātu un diskusiju sadaļas.

Literatūras apskata daļā tika izpētīti zinātniskās publikācijas, Latvijas un ES normatīvie akti par izpētes tēmu saistošajiem jautājumiem, kā arī iegūti dati no Centrālās statistikas pārvaldes, kuri darbā tika izmantoti aprēķinu veikšanai.

Metodoloģijas sadaļā promocijas darba tēma tika izvērtēta izmantojot piecas metodes, bibliogrāfiskās analīzes, daudz kritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze, energoapgādēs sistēmas darbības bilances, eksperimentālo izpēti un aprites cikla analīzes metodi.

Rezultāti no visām izmantotajām metodēm apkopoti rezultātu sadaļā kopā ar paskaidrojumiem un grafiskajiem attēlojumiem rezultātu izskaidrošanai.

Darbs noslēdzas ar diskusiju sadaļu, kurā tiek apliecināta hipotēzes pierādīšana un aprakstīti galvenie secinājumi par veikto izpēti.

Annotation

Modern life is no longer imaginable without a stable and continuous supply of heat and electricity to households, public buildings and industrial facilities. Society is used to, and even seems to take for granted, that both thermal energy and electricity are available and there is no reason to worry that it may be disrupted, if almost the only worry is about costs.

Unfortunately, the security of energy supply is quite fragile and it can be affected in several ways, be it natural disasters, intentional actions of people, or technological failures in equipment, no equipment is absolutely safe from damage.

Russia's hostilities in Ukraine in 2022 showed that the security of energy supply is one of the most important issues for people to survive, and it was the energy supply sector in Ukraine that Russia tried to destroy, thereby paralyzing the country's activities, but thanks to enormous efforts, Ukraine is still able to provide energy supply to the most important objects.

In times of peace, society thinks more about economic and environmental aspects in the field of energy supply, but less about social ones, because they seem self-evident, but in times of war or other crises, priorities change, putting energy availability first, environmental aspects being relegated to a lower priority, but it must be understood that the initial environmental relegating aspects to the lowest priority, however, also includes environmental factors, for example, the operation of water treatment systems, the health care sector, if it is disturbed, the impact on the environment can be uncontrollable.

As one of the most important dilemmas that were examined during the development of the thesis, which energy supply model is more stable, centralized or decentralized energy supply. Several methods were used to verify the stability of the power supply model.

Special attention was paid to technologies that can produce both heat and electricity at the same time, thus giving the consumer greater autonomy from the centralized energy supply system.

The thesis is based on six publications, which were developed and published during the execution of the thesis.

The work consists of a literature research part, methodology, results and discussion section.

In the part of the literature review, scientific publications, Latvian and EU regulatory acts on the binding issues of the research topic were studied, as well as obtained data from the Central Statistical Office, which were used in the work to perform calculations.

In the methodology section, the topic of the thesis was evaluated using five methods, bibliographic analysis, comparative analysis of multi-criteria decision-making, energy supply system performance balances, experimental research and cycle analysis method.

The results from all the methods used are summarized in the results section together with explanations and graphical representations to explain the results.

The paper concludes with a discussion section, where the proof of the hypothesis is confirmed and the main conclusions of the research are described.

Pateicības

Promocijas darbs tā izveides procesā piedzīvoja virkni izmaiņu, gan cilvēcisko faktoru dēļ, jāpiemin pateicība pirmajam darba vadītājam Asoc. Prof. M. Gedrovičam, kurš tika aizsaukts aizsaulē darba izstrādes sākuma posmā, gan ģeopolitiskajiem procesiem, kuri izmainīja cilvēku uzskatus par energoapgādes drošību.

Izsaku pateicību *dr.sc.ing.*, asociētam profesoram E. Vīgantam, pārņemot promocijas darba vadību, promocijas darbs ieguva jaunu virzību koģenerācijas iekārtu izpētes virzienā, visa darba izstrādes laikā tika saņemts gan profesionāls, gan cilvēcisks atbalsts.

Vienlaicīgi jāizsaka pateicība SIA Balteneko kolektīvam, kuras katlu mājā Ādažu pilsētā tika veikti eksperimenti, uzņēmuma kolektīvs bija pretimnākošs un sniedza tehnisko palīdzību, lai eksperimenti varētu sekmīgi norisināties. Pateicība apkures speciālistam D. Seržantam, kurš veica eksperimentālas iekārtas montāžu un saslēgšanu ar Ādažu pilsētas CSA sistēmu. Patstāvīgs atbalsts tika saņemts no *dr.sc.ing.*, asociētā profesora V. Kirsanova gan kā darba vadītājam, gan lieliskam organizatoram, palīdzot risināt virkni tehnisko un zinātnisko jautājumu.

Globālie notikumi nepagāja secen promocijas darba izstrādei, Krievijas uzsāktā karadarbība Ukrainā lika pievērst lielāku uzmanību energoapgādes drošības jautājumiem. Veiktā priekšizpēte un veikto eksperimentu rezultāti tika apskatīti no energoapgādes drošības perspektīvas. Globālie ģeopolitiskie notikumi pievienoja darbam papildus aktualitāti un praktisko nozīmi jo krīzes situāciju izpēte ieguva daudz reālāku skatījumu uz problēmām kuras var rasties cilvēku tīšu darbību vai dabas katastrofu rezultātā.

Jāizsaka liela pateicība visam Vides Aizsardzības un Siltuma Sistēmu institūta draudzīgajam un atsaucīgajam kolektīvam par atbalstu visā darba izstrādes laikā.

Īpaša pateicība *dr.habil.sc.ing.*, profesorei, institūta direktorei D. Blumbergas kundzei un *dr.habil.sc.ing.*, profesoram I. Vedeinbergam.

Pateicība visiem publikāciju un zinātnisko rakstu līdzautoriem.

SATURS

| | |
|---|-----|
| PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS | 8 |
| 1. LITERATŪRAS ANALĪZE | 13 |
| 2. METODOLOĢIJA | 29 |
| 2.1. Bibliogrāfiskā analīze | 29 |
| 2.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze..... | 33 |
| 2.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance..... | 39 |
| 2.4. Eksperimentālā izpēte | 48 |
| 2.5. Aprites cikla analīze..... | 58 |
| 3. REZULTĀTI | 66 |
| 3.1. Bibliogrāfiskā analīze | 66 |
| 3.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze..... | 73 |
| 3.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance..... | 79 |
| 3.4. Eksperimentāla izpēte | 87 |
| 3.5. Aprites cikla analīze..... | 96 |
| 4. DISKUSIJA..... | 105 |
| 4.1. Bibliogrāfiskā analīze | 105 |
| 4.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze..... | 105 |
| 4.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance..... | 106 |
| 4.4. Eksperimentālā izpēte | 108 |
| 4.5. Aprites cikla analīze..... | 110 |
| SECINĀJUMI..... | 112 |
| IZMANTOTĀ LITERATŪRA | 114 |

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Karš Ukrainā un militārās darbības Izraēlā un Gazas sektorā ir pārveidojušas pasauli, liekot tai mainīties. Īpaša uzmanība pievērsta enerģētikas sektoram katrā Eiropas Savienības dalībvalstī atsevišķi un visā Eiropas Savienībā kopā. Šim jautājumam bija pievērsta īpaša uzmanība arī lielajā klimata saietā COP28, kas 2023. gadā notika Dubajā.

Viens no svarīgākajiem energoapgādes sektora attīstības mērķiem ir ne tikai izpildīt Eiropas zaļā kursa uzdevumus, bet arī vienlaicīgi vairāk pievērsties energoapgādes drošībai un neatkarībai.

Energoapgādes drošība specifiskos krīzes apstākļos atšķiras no situācijām miera apstākļos, un tai ir duāla dimensija:

- 1) tehnoloģiskā risinājuma dimensija (sākot ar mikroģenerāciju un beidzot ar lielām koģenerācijas stacijām vienlaicīgai vai atsevišķai siltuma un elektroenerģijas ražošanai);
- 2) enerģijas pieprasījuma dimensija (sākot no individuālas vienkārtas mājas, vienas daudzdzīvokļu ēkas, nelielas pašvaldības energosistēmas līdz energokopienām, lieliem uzņēmumiem un lielu pilsētu pašvaldību un valsts energosistēmām).

Ir jāsaprot, ka krīzes apstākļos mainās uzsvāri un dažādu aspektu aktualitāte. Arī energoapgādē mainās ekonomisko un klimata problēmu svarīgums.

Pētījuma mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir veikt zinātnisko izpēti par energoapgādes drošību dažādu potenciālo krīzes apstākļu gadījumos un definēt īpašus nosacījumus šīm situācijām.

Lai izpildītu nosprausto mērķi, veicami šādi uzdevumi:

- 1) veikt elektroenerģijas avotu tehnoloģisko risinājumu zinātnisko izpēti, izvērtējot to pielietojuma piemērotību energoapgādes nodrošināšanai patērētājam, krīzes situācijām;
- 2) krīžu kontekstā izvērtēt vēsturiski labi sevi pierādījušo tehnoloģisko risinājumu – Stirlinga dzinēju, jo tā izmantošanas aktualitāte aug tieši proporcionāli militāro draudu un citu krīžu pastiprināšanās iespējām, tāpēc svarīgi ir saprast Stirlinga dzinēja attīstības virzienus šodien;
- 3) noteikt Stirlinga dzinēja veiktspēju veicot eksperimentālo izpēti reāliem apstākļiem pielīdzināmos eksperimentos ūdenssildāmā katla kurtuvē;
- 4) salīdzināt un izvērtēt energoapgādes iekārtu darbību individuālā enerģijas lietotāja un pašvaldības sabiedrisko ēku energoapgādes iekārtās;

5) izvērtēt Stirlinga dzinēja ietekmi uz klimata pārmaiņām, veicot aprites cikla analīzi.

Izvirzītā hipotēze

Latvijas energoapgādes drošība militārā apdraudējuma un krīzes apstākļos ir atkarīga no tehnoloģisko risinājumu diversifikācijas un atšķirīgu pieeju inovatīvas izmantošanas.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Promocijas darba izstrādes laikā radīti vairāki zinātniskie jauninājumi, kas balstīti uz vēsturiski zināmu tehnoloģisko risinājumu inovatīvu integrāciju enerģētikas sektorā militāru draudu un citu krīzes situāciju apstākļos. Promocijas darbā veikta tehnoloģisko risinājumu zinātniskā izpēte un analīze inovatīvā skatījumā, kas atšķiras no tradicionālās energoapgādes attīstības analīzes.

Promocijas darbā piemērotas vairākas metodes:

- bibliogrāfiskā metode;
- eksperimentālā izpēte energo avotā, empīriskā modeļa izveidei;
- daudz kritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze;
- energoapgādes sistēmas darbības bilances modelēšana;
- ietekmes uz klimata pārmaiņām analīze un vērtēšana.

Ar šo metožu palīdzību aplūkota dažādu tehnoloģisko risinājumu loma un iespējamais lietojums nelielu enerģijas lietotāju energoapgādes sistēmās dažādos tautsaimniecības attīstības apstākļos:

1. analizēta gadsimtu veca tehnoloģiskā risinājuma atdzimšana (Stirlinga dzinēja izmantošanas izplatība Eiropā un pasaulē);
2. aplūkota dažādu nelielu energoavotu potenciālā integrācija mazās energoapgādes sistēmās, salīdzinot tehnoloģiskos, ekonomiskos, sociālekonomiskos, vides un ietekmes uz klimata pārmaiņām aspektus.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Pētījums par dažādu tehnoloģisko risinājumu izmantošanu ļauj saskatīt to lietderību energoavotos energoapgādes drošības paaugstināšanai. Pētījuma rezultāti vedina negaidīt krīzes situāciju, kad jau varētu būt nepieciešama energoapgādes sistēmas restrukturizācija. Secinājumi parāda, ka krīzes situācijā ekonomiskās un ietekmes uz klimata pārmaiņām problēmas varētu atvirzīties otrajā plānā.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs balstās uz sešām publikācijām, kas publicētas dažādos zinātniskajos žurnālos un pieejamas citēšanai vairākās zinātnisko darbu un publikāciju datubāzēs. Katrā no publikācijām uzmanība ir pievērsta energoapgādes tehnoloģisko risinājumu analīzei caur atšķirīgu zinātniskās izpētes skatījumu un vērtējumu prizmu.

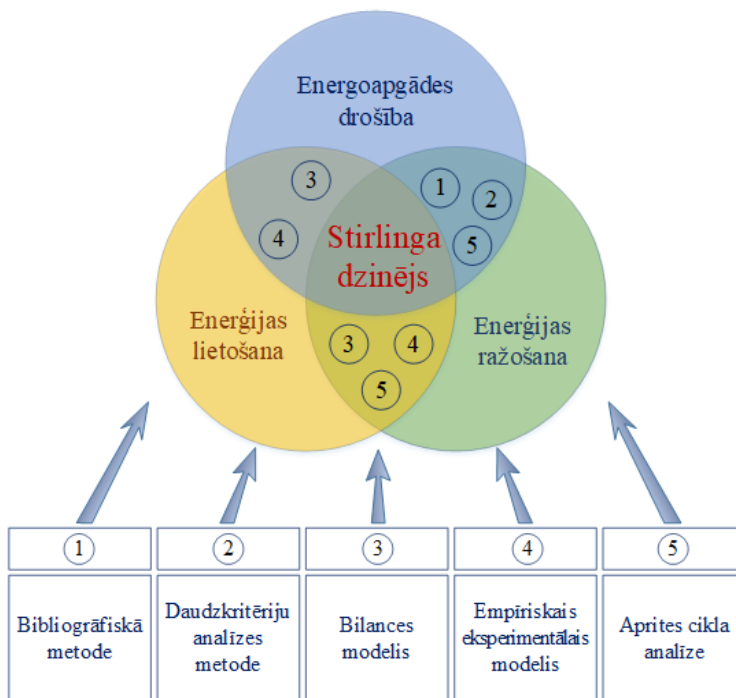
Promocijas darbā ir ievads un četras nodaļas:

- 1) literatūras analīze;
- 2) pētījuma metodoloģija;
- 3) rezultāti;
- 4) diskusijas.

Ievadā aplūkota tematikas aktualitāte, norādīts darba mērķis un uzdevumi mērķa sasniegšanai, izvirzīta hipotēze, raksturota promocijas darba zinātniskā novitāte un praktiskā nozīmība.

1. nodaļā sniegts ieskats pētījuma jomā, t. i., energoapgādes drošības tehnoloģisko risinājumu izpētē. 2. nodaļā analizētas pētījuma metodikas, kas izmantotas, lai izvērtētu nelielu enerģijas avotu tehnoloģiskos risinājumus. 3. un 4. nodaļā analizēti pētījumu rezultāti, kas iegūti, izmantojot darbā aplūkotās metodikas, un diskutēts par darbā sasniegto un izvirzīti secinājumi.

Promocijas darba struktūra redzama 1. attēlā. Pielietojot trīskāršās spirāles pieeju.



1. att. Promocijas darba struktūra.

Trīskāršās spirāles pieejas ilustrācija ietver visas darbā izmantotās metodes, kas rāda savstarpējās saites:

- starp energoapgādes drošību un enerģijas lietotāju;
- starp energoapgādes drošību un enerģijas ražotāju;
- starp enerģijas ražotāju un enerģijas lietotāju;
- starp visiem trijiem līmeņiem.

Visu trīs spirāles līmeņu pārklāšanās norāda uz Stirlinga dzinēja izmantošanas aktualitāti. Šajā izpētes posmā tiek izmantotas visas piecas uzskaitītās metodes.

1. attēlā redzamās metodes ir aplūkotas vairākās publikācijās:

- 1) bibliogrāfiskā metode (Kubule A., **Kramens J.**, Bimbere M., Pedišius N., Blumberga D. Trends for Stirling engines in households: a systematic literature review. *Energies* 2024:2024, 17(2), 383. doi: 10.3390/en17020383);

- 2) daudzkritēriju analīzes metode (**Kramens J.**, Valtere M., Krigers G., Kirsanovs V., Blumberga D. Ranking of Independent Small-Scale Electricity Generation Systems. *Clean Technologies* 2024:6(1), 140-151. doi: /10.3390/cleantechnol6010009);
- 3) bilances modelis (**Kramens J.**, Švedovs O., Sturmane A., Vīgants E., Kirsanovs V., Blumberga D. Exploring Energy Security and Independence for Small Energy Users: A Latvian Case Study on Unleashing Stirling Engine Potential. *Sustainability* 2024:16(3). doi: 10.3390/su16031224);
- 4) empīriskais eksperimentālais modelis (**Kramens J.**, Vīgants E., Liepiņš I., Vērnies L., Terjaņika V. Research of a Biomass Boiler with Stirling Engine Microgeneration Unit. *Environmental and Climate Technologies* 2021:25(1):587–599. doi: 10.2478/rtuect-2021-0043; **Kramens J.**, Vīgants E., Liepiņš I., Terjaņika V. Research of Biomass Micro-Cogeneration System Integration with a Solar PV Panels in Zero-Energy Family Building. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference* 2021:1:132–138. doi: 10.17770/etr2021vol1.6568);
- 5) aprites cikla analīze (**Kramens J.**, Feofilovs M., Vīgants E. Environmental Impact Analysis of Residential Energy Solutions in Latvian Single-Family House: A Life Cycle Perspective. *Smart Cities* 2023:6(6):3319–3336. doi: 10.3390/smartcities6060147).

Aprobācija

1. International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering CONECT, 12.–14. maijs, 2021, Rīga, Latvija.
2. International Conference of Young Scientists on Energy and natural Science Issues CYSENI, 24.–28. maijs, 2021, Kauņa, Lietuva.
3. 13th International Scientific Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, 17.–18. jūnijs, 2021, Rēzekne, Latvija.
4. 22nd International Scientific Conference on Engineering for Rural Development, 24.–26. maijs, 2023, Jelgava, Latvija.
5. 14th International Scientific Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, 15.–16. jūnijs, Rēzekne, Latvija.

1. LITERATŪRAS ANALĪZE

Enerģijas krīze Eiropas Savienībā (ES) ir akūta problēma, kas ir būtiska vairākos aspektos. Mūsdienās globālās nestabilitātes apstākļos, ko izraisa gan ekonomiski faktori, gan politiski konflikti, Eiropa ir atkarīga no importētiem enerģijas resursiem. Ekonomiskās sankcijas, pasaules politikas izmaiņas un enerģijas resursu cenas apdraud reģiona energodrošību. Jaunu tehnoloģiju ieviešana un pāreja uz videi draudzīgākiem enerģijas avotiem kļūva par steidzamu uzdevumu, lai nodrošinātu ES ilgtspējīgu un stabilu enerģijas piegādi, samazinātu atkarību no ārējām piegādēm un pārvarētu problēmas, kas saistītas ar klimata izmaiņām un ģeopolitisko nenoteiktību (*Eurostat, 2023*).

Šobrīd ES iepērk aptuveni 60 % enerģijas, tāpēc to tikai daļēji var uzskatīt par enerģētiski neatkarīgu. Pašreizējā enerģijas krīze norāda uz visu iepriekš noteikto ES uzdevumu aktualitāti, kuru izpildes ietekme saistāma ar inflāciju un iedzīvotāju nabadzības risku. Kamēr valstis mēģina dažādot enerģijas tirgu, tās padara sevi atkarīgas no daudzām trešajām valstīm, kurās tās sāk pirkt energoresursus. Savstarpējā valstu sadarbība enerģijas tirdzniecības sistēmā un pārvades starpsavienojumi var kļūt par risinājumu enerģijas trūkuma gadījumā, bet bažas rada iesaistīto valstu solidaritātes un vienotas pieejas trūkums, iestājoties reālai enerģijas krīzei (*Eurostat, 2023*), (*Damen, 2023*).

Mūsdienu ģeopolitiskā situācija, klimatiskie faktori un arvien pieaugošais elektrības patēriņš palielina enerģijas piegādes pārtraukumu risku. Lielās valstīs ar attīstītu elektroapgādes tīklu riskus sagādā pārsvarā meteoroloģiskie apstākļi, tomēr cilvēcisks faktors arī mēdz izraisīt lokālus apgādes pārtraukumus (*Marcotullio et al., 2023*), (*Chakrabarty, Sarkar and Basak, 2020*).

Laikapstākļi, piemēram, stipra vēju un viesuļvētru postījumi, zema temperatūra, ugunsgrēki utt. var radīt traucējumus elektrotīkla darbībā. Šādos apstākļos ir jāparedz īpašas darbības – stratēģisku un vitāli svarīgu objektu nodrošināšana ar ģeneratoriem, tehniskais un pārtikas atbalsts iedzīvotājiem. Svarīgi arī nodrošināt objektu apsardzi, jo līdz ar elektrības piegādes pārtraukumu pārstās strādāt arī signalizācijas un cita veida ēku elektroapsardzes tehnoloģijas. Liela nozīme kārtības un iedzīvotāju miera uzturēšanā ir ātrai iedzīvotāju informēšanai par traucējumiem. Kā drošības pasākumus ieteicams uzstādīt īpašas uzraudzības sistēmas, kas uzraudzītu sadales tīklus un enerģijas pārdali starp reģioniem, īpaši augstsprieguma stacijas (*Marcotullio et al., 2023*), (*Linlin Zhang et al., 2022*), (*C2ES, 2018*).

Izraisītās sekas, ko var radīt energoapgādes traucējumi ir atkarīgas no to ilguma un atbildīgo iestāžu reakcijas uz problēmu situācijām. Īslaicīgu kļūmju gadījumā drošības problēmas var rasties gan IT sfērā (piemēram, banku operācijas, finanšu sistēma), gan cilvēku pārvietošanās jomā. Tas īpaši attiecas uz elektriskajiem transportlīdzekļiem, kas ir pilnībā atkarīgi no elektroapgādes sistēmas darbības. Būtisks apdraudējums ir saskatāms siltuma enerģijas ražošanas uzņēmumiem,

kur nodrošina māsasaimniecību, sabiedrisko un ražošanas ēku siltuma apgādi, kā arī aukstumiekārtu darbībai (pārtikas rūpniecības un tirdzniecības sektors) u.c. Tomēr, jo ilgāk turpināsies elektrības padeves pārtraukums vai jo biežāk radīsies padeves traucējumi, jo plašākas būs sekas, pastiprinot spiedienu uz visām ekonomikas nozarēm un sabiedrību kopumā. Īpaša uzmanība pievēršama veselības nozarei, jo tā izmanto lielu skaitu aprīkojuma un iekārtu, kas darbojas ar elektrību (*Walkermorris, 2022*). Visilgāk turpināt savu darbu spēs tikai tie uzņēmumi un iestādes, kas jau iepriekš ir iegādājušies alternatīvas enerģijas avotus (piemēram, saules paneļus) un ģeneratorus.

Ilgstoša elektrības trūkuma gadījumā valstī valdība būs spiesta ieviest speciālus noteikumus un normas energoapgādes jomā. Tā kā galvenā enerģijas patērētāja ir rūpniecība, uzņēmumiem tiks lūgts samazināt patēriņu vai uz laiku pārtraukt darbu. Ja šis solis nepalīdzēs, nākamā būs tirdzniecības un pakalpojumu nozare. Paralēli notiks aktīva informatīvā kampaņa, lai rosinātu arī iedzīvotājus samazināt elektrības patēriņu. Papildus var sekot tīkla jaudas samazināšana. Kā norāda (*Chadwick, 2022*), tas pasliktinās iekārtu darbu, bet tās tomēr darbosies un palīdzēs izvairīties no panikas. Sliktākajā scenārijā var rasties nekontrolēti lokāli vai reģionāli energoapgādes atslēgumi (*Rosemain, Mukherjee and Pollina, 2022*).

Lai samazinātu šādu risku iespējamību un veicinātu saskaņotu darbību krīzes situācijās, Eiropas Komisija ir sagatavojusi īpašu plānu gāzes un enerģijas patēriņa samazināšanai ES valstīs (*European Commission, 2022f*).

Kā preventīvus pasākumus enerģētiskās drošības nodrošināšanai cilvēciskā faktora un mainīgā klimata kontekstā valsts var:

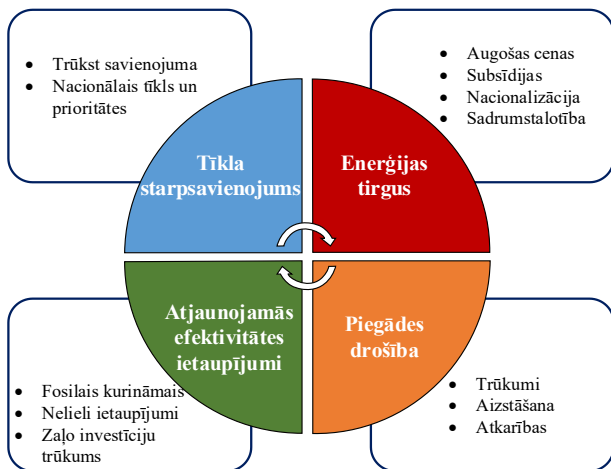
- nomainīt gaisvadu elektrolīnijas pret pazemes līnijām;
- integrēt viedās tehnoloģijas energoapgādes vadības sistēmās;
- ierīkot ar atjaunojamajiem enerģijas avotiem (vējš, saule, biomasas un to kombinācijas) darbināmus mikrotilkus;
- uzstādīt enerģijas akumulācijas un uzglabāšanas sistēmas;
- sadalīt kopējo patērētāju skaitu autonomijās un komūnās (*C2ES, 2018*).

Ģeopolitiskā situācija pasaulē tieši ietekmē valsts enerģētisko drošību. Ja valsts ir izveidojusi iekšējās atjaunojamās enerģijas ražošanu, ģeopolitiskā spriedze var samazināties, jo samazinās atkarība no ārvalstu importa (*Moreno-Camacho et al., 2019*). Tomēr pastāv pretējs viedoklis, ka pieprasījums pēc kritiskiem un retiem materiāliem atjaunojamo enerģijas avotu ražošanai, iespējams, radīs jaunus drošības riskus, piemēram, kiberuzbrukumus un turpmāku ģeopolitisko nestabilitāti palielinātās konkurences par šādu materiālu pieejamību (*Pavel et al., 2017*), (*Liao, 2023*).

Mēģinot novērst atkarību no viena elektroenerģijas pārdevēja, ES vērsās pie citām valstīm, piemēram, Turcijas, Ēģiptes un Izraēlas. Tiek plānota cauruļvadu izbūve, lai savienotu šo reģionu ar Eiropu (*Sydney Adams, 2022*), (*El Safty and Rabinovitch, 2022*). Tomēr šis scenārijs nav mazāk riskants kā sadarbība ar Krieviju – pastāvīgais Izraēlas un Palestīnas konflikts spēcīgi ietekmēja enerģētikas nozari. Līdz ar Izraēlas otras lielākās elektrostacijas slēgšanu valstij nācās pašai sākt pirkt enerģiju tirgū. Tā rezultātā sašķīdinātās gāzes cenas strauji kāpa par vairāk nekā 40 %. Tas piespieda citas valstis apturēt gāzes iegādi un pārtraukt savu gāzes krātuvju uzpildi. Kā norāda (*Dutton, 2023*), pašreizējais konflikts ietekmē enerģētikas nozari daudz vairāk nekā Krievijas naftas rūpniecībai noteiktās sankcijas, jo atšķirībā no naftas gāzes piegādes pārvirzīt ir daudz grūtāk un tas prasa lielākus finanšu un laika ieguldījumus.

Šodien pasaules ekonomika izskatās trausla un neaizsargāta. Vēl neatgūstoties no viena konflikta, tā izjūt otra konflikta spiedienu, kas ziemas priekšvakarā var tikai stimulēt jau tā augsto inflāciju (*Daoud, Altstein and Sakthivel, 2023*).

Enerģētiskā krīze var aprūtināt stratēģiskās enerģijas autonomijas sasniegšanu un kļūt par izaicinājumu sasniegt līguma 2012/C 326/01 par ES darbību 194. panta mērķus, kuru galvenie punkti ir funkcionējošs enerģijas tirgus, piegādes uzticamība, energoefektivitāte un ietaupījumi apvienojumā ar atjaunojamās enerģijas attīstību (1.1. att.) (*European Union, 2012*). Tomēr šie mērķi tika formulēti laikā, kad galvenais uzdevums bija pārveidot energoapgādes sistēmu no, pārsvarā nacionāli regulēta energo sadales tīkla uz Eiropas kopējo enerģijas tirgu, neņemot vērā sarežģīto ģeopolitisko situāciju pasaulē (*Damen, 2023*).



1.1. att. 195. panta galvenie mērķi (*Damen, 2023*).

Lai palielinātu stratēģisko enerģētisko autonomiju, ES jāatrisina visas (1.1. att.) redzamās enerģētiskās krīzes problēmas. Enerģētiskā krīze, kas sākumā radās kā ekonomiska cenu krīze, pārauga piegādes drošības izaicinājumā.

Nacionālo enerģijas tirgu var uzskatīt par drošu, ja valsts kļūst neatkarīga no citu valstu piegādēm un pati rada enerģiju un, ja iespējams, savus iekšējos energoresursus (*Baus, 2017*). Tomēr šāds scenārijs uzliek noteiktas prasības, kas var mainīties atkarībā no daudziem faktoriem, ieskaitot reģionālās īpašības, ekonomisko situāciju, vidi un stratēģiskos mērķus. Turpmāk minētas dažas vispārīgas prasības un faktori, kas parasti tiek ņemti vērā, pieņemot lēmumu par pāreju uz vietējo elektrības ražošanu (*Ortega-Arriaga et al., 2021*).

- Dažādi avoti un resursi: autonoma enerģijas ražošana nevar notikt, izmantojot tikai viena veida resursus. Tas padara ražošanu atkarīgu no piegādātāja pat vienas valsts ietvaros. Avotu dažādošana ļauj ne tikai nodrošināt stabilu ražošanu, bet mazāk izraisa inflāciju noteiktā sektorā. Ražošana ir mazāk pakļauta klimatisko apstākļu riskiem (*Weinand, Scheller and McKenna, 2020*), (*De Rosa et al., 2022*), (*Baus, 2017*).
- Ekonomiskā lietderība un energoefektivitāte: autonomas enerģijas ražošanas spēja visu laiku un visos apstākļos (bioresursu trūkums, nepietiekams ūdens daudzums hidrostaciju palaišanai, nelabvēlīgi laikapstākļi vēja parku darbībai utt). Nepietiekami pārdomāta resursu tirgus gadījumā pastāv augstu elektrības cenu risks. Tas pats attiecas uz enerģijas ražotāju efektivitāti. Enerģijas ražošanas tehnoloģijām jābūt efektīvām resursu izmantošanas ziņā, lai samazinātu zaudējumus un nodrošinātu maksimālu atdevi no pieejamajiem avotiem. Pēc *OECD* teiktā, resursu trūkuma dēļ pieaugošās enerģijas cenas ir neizbēgamas gan privātiem patērētājiem, gan komerciālajiem patērētājiem. Energointensīvas nozares, piemēram, tērauda, alumīnija, cementa, papīra ražošanas un ķīmiskā rūpniecība, jau ir saskārušās ar strauju ražošanas izmaksu pieaugumu (*OECD, 2022*), (*Business Europe, 2022*).
- Enerģijas uzglabāšana autonomā enerģijas ražošanā: atjaunojamie enerģijas avoti lielāko daļu enerģijas rada noteiktā diennakts laikā. Attiecīgi elektrības ražošana neatbilst maksimālā pieprasījuma stundai. Saules un vēja enerģijas ražošanai ir sezonāls periodiskums, un tie nevar nodrošināt enerģijas avotu pēc pieprasījuma 24 stundas d/n 7 dienas nedēļā. Saules enerģija un vējš ir neparedzami, pastāv ražošanas slodzes neprognozējamība un nepatstāvība. Ir jāizmanto efektīvas tehnoloģijas (piemēram, baterijas), kas palīdzētu līdzsvarot svārstības ne tikai enerģijas patēriņā, bet arī atjaunojamās enerģijas ražošanā (*Katsarava and Gaschler, 2023*), (*Regen Power, 2022*).
- Nepietiekama tehnoloģiju izstrāde un augstas uzstādīšanas izmaksas: enerģijas infrastruktūras stāvoklis, ieskaitot pārvades un sadales tīklus, var ietekmēt lēmumu par vietējo elektrības ražošanu. Pāreja no centralizētas energoapgādes uz decentralizēto ir saistīta ar jaunu tehnoloģiju ieviešanu vairākos reģionos, kas rada papildu finansiālo slodzi. Šīs tehnoloģijas iekļauj akumulācijas iekārtas kontrollerus, jaudas sadales un pārveides iekārtas (invertorus elektrības pārveidošanai maiņstrāvas ierīcēm), drošības aprīkojumu, skaitītājus

un mēriekārtas. Paralēli jāskatās uz reģionam piemērotām PV iekārtām vai cita veida AER tehnoloģijām, kuru pieejamība var krasi atšķirties atkarībā no valsts attīstības līmeņa (*Ortega-Arriaga et al., 2021*).

- Augstas uzstādīšanas un apkopes izmaksas: jaunu enerģijas sistēmu uzstādīšanai nepieciešami ievērojami finanšu ieguldījumi. Tādu alternatīvu enerģijas avotu kā vēja ģeneratoru un saules paneļu uzstādīšanai nepieciešami salīdzinoši nelieli ieguldījumi, tomēr kreditori un investori var skeptiski vērtēt projektus noteiktos reģionos (*Regen Power, 2022*), (*International Renewable Energy Agency, 2023*).
- Degvielas, kurināmā izmaksas un piegādes drošība: enerģijas resursu pieejamībai un izmaksām ir liela nozīme enerģijas tehnoloģiju izvēlē. Eiropas Komisija publicēja pirmo ziņojumu par *REPowerEU* plānu, kurā tika atzīmēts, ka 2022. gadā ES importēja vairāk nekā 40 % dabasgāzes, 27 % naftas un 46 % ogļu. Tika norādīts uz vajadzību samazināt iepirkto apjomu. Tajā pašā laikā Starptautiskā enerģētikas aģentūra (*IEA*) ir publicējusi plānu, kā samazināt ES atkarību no dabasgāzes, kā arī plānu samazināt naftas izmantošanu (*European Commission, 2022b*), (*International Energy Agency, 2022*), (*Energy Agency, 2022*). 2022. gada maijā Eiropas Komisija publicēja otro *REPowerEU* plāna versiju, aicinot ātrāk un vēl vairāk samazināt atkarību no fosilajiem resursiem (*European Commission, 2022a*).
- Ģeogrāfiskie apstākļi: ģeogrāfiskie faktori, piemēram, klimats, reljefs un piekļuve dabas resursiem, var ietekmēt elektrības ražošanas tehnoloģiju izvēli. Ražotājam šie faktori jāņem vērā. Tomēr, izvēloties optimālo tehnoloģiju un tās izvietojumu (vēja un saules parku gadījumā), nedrīkst aizmirst par vides aspektu. Piemēram, ja koksni izmanto kā enerģijas resursu, uzņēmumam būtu jānodrošina jaunu koku stādīšana.
- Enerģētiskā neatkarība: kritiskās situācijās, kad enerģētiskā neatkarība ir īpaši svarīga, var būt nepieciešama vietēja enerģijas ražošana. 2022. gada laikā ES valstu valdības ir noslēgušas jaunus līgumus par cauruļvadu gāzi un SDG ar virkni trešo valstu. Mērķis ir jauns vai palielināts imports no tādām valstīm kā Alžīrija, Austrālija, Nigērija, Norvēģija, Katara un Amerikas Savienotās Valstis. ES arī ir nostiprinājusi savas attiecības energoresursu jomā ar, piemēram, Alžīriju (*Euractiv, 2022*), Azerbaidžānu (*European Commission, 2022c*), Ēģipti un Izraēlu (parakstot memorandu 2022. gadā (*European Commission, 2022d*)) un ASV (ieskaitot ES un ASV darba grupu enerģijas drošībai (*European Commission, 2022e*)). Šīs darbības ievērojami samazina atkarību no viena lielā piegādātāja, tomēr palielināta paļaušanās uz vairākām citām trešajām valstīm tomēr nozīmē arī turpmākus piedāvājuma riskus, kas var rasties ekonomiskas vai politiskas spriedzes rezultātā.

Energoapgādes drošība pasaulē tiek definēta kā nepārtraukta vitāli svarīgu energosistēmu pieejamība (*IEA, 2023*). Būtiski energosistēmas drošības aspekti ir energoresursu pieejamība, infrastruktūras un pārvades un izmantošanas iespējas, administratīvie noteikumi, kuri nosaka procesus un procedūras (*Cherp and Jewell, 2014*), kas aptver piecas aspektu kategorijas: politiskos,

sociālos, ekonomiskos, tehniskos un vides aspektus (Jakstas, 2020). Vienkāršojot energoapgādes drošības struktūru un apvienojot dažādus aspektus, var definēt četrus galvenos enerģijas pieejamības pīlārus: ģeoloģiskais, ģeopolitiskais, ekonomiskais un vides (Cherp and Jewell, 2014), (Kruyt et al., 2009), (SAI, Furubayashi and Nakata, 2017), (APEREC, 2007). Pīlāri ir savstarpēji saistīti ar ārējo un iekšējo faktoru grupām, kā parādīts 1.2. attēlā. Mijiedarbība starp šiem faktoriem ir process, kas jāuzrauga, lai saglabātu stabilu pīlāru darbību. Šo procesu sauc par ilgtspējīgu attīstību (Lees, 2012), (Gautam, Kumar and Lokhandwala, 2019), (Minelli, 2017), (Luty et al., 2023).



1.2. att. Saikne starp energoapgādes drošību un ilgtspējīgu attīstību.

ES ar līdzīgiem izaicinājumiem nesaskaras pirmoreiz (Umbach, 2010), (Kielin-Maziarz, 2013), (Jonsson et al., 2015), tāpēc pašreizējās problēmas ir atrisināmas, balstoties uz jau gūto pieredzi (Fabra, 2023), (Liu, Xie and Wang, 2023). Viens no iespējamajiem risinājumiem ir koncentrēšanās uz ilgtspējīgu attīstību, lai veicinātu enerģētiskās drošības uzlabošanu un padarītu energoapgādes sistēmu noturīgāku un elastīgāku krīzes situācijām (Mišik, 2022).

Ir divu veidu pieejas siltuma un elektroenerģijas vai tikai elektroenerģijas ražošanai: centralizēta (Martínez, Ebenhack and Wagner, 2019), (Kabalci, Boyar and Kabalci, 2021) un decentralizēta jeb autonoma (Asif, 2022), (Sioshansi, 2014). Centralizētām elektroenerģijas ražošanas un siltumapgādes sistēmām ir vairākas priekšrocības:

- nodrošina energoapgādes nepārtrauktību un tehniskos līdzekļus elektroenerģijas pieejamībai un (ideālā gadījumā) ir rentabla (Ahlqvist, Holmberg and Tangerås, 2022);
- viena vai dažas lielas centrālās ražotnes izmaksā daudz lētāk nekā tūkstošiem atsevišķu iekārtu (Nielsen and Sørensen, 2016);

- atsevišķus siltuma enerģijas resursus var ekonomiski izmantot tikai centralizētajā siltumapgādē (piemēram, siltumenerģijas pārpalikums no rūpnieciskās ražošanas, elektroenerģijas ražošanas, atkritumu sadedzināšanas siltumu, ģeotermālo enerģiju) (*Nielsen and Sørensen, 2016*);
- centralizētā siltumapgāde ir vienīgais veids, kā apgādāt (esošos/vēsturiskos) pilsētu centrus (piemēram, Vecrīgu Latvijā) ar lielu daļu AER (renovācija, sasniedzot nulles enerģijas māju līmeni šeit nav iespējama) (*Nielsen and Sørensen, 2016*).

Galvenie centralizēto sistēmu trūkumi ir:

- lauku elektrifikācija (integrētā energosistēmā lauku elektrifikācija ir izaicinājums) (*Jeremi, 2009*);
- dažas ēkas ir pārkarsušas vai nenodrošina siltumu dažādu apstākļu dēļ (piemēram, nav veikts energoaudits) (*Khelifa Kerfah et al., 2020*);
- elektrotīklos un siltumtīklos pastāv dažādi ierobežojumi, kas neļauj pieslēgties jauniem lietotājiem (Balode, Dolge and Blumberga, 2021), (*Denholm et al., 2021*).

Galvenās decentralizēto sistēmu priekšrocības ir:

- maksimāla elastība kā neatkarīgai sistēmai;
- augsts ilgtspējības līmenis (*Mauri, Vallati and Ocloń, 2019*);
- lēmumu par attīstību un investīcijām pieņemšanas vienkāršība;
- minimāli enerģijas zudumi enerģijas transportēšanā līdz patērētājam.

Galvenie decentralizēto sistēmu trūkumi ir:

- mērogošanas efekta ekonomiskās ietekmes trūkums (*McKenna, 2018*);
- relatīvi augstākas emisijas pret saražotās enerģijas daudzumu;
- mazākas iespējas saņemt investīcijas attīstībai.

Energoapgādes drošības paaugstināšanai ir dažādi tehnoloģiskie risinājumi, kas ir piemērojami gan centralizētās, gan decentralizētās sistēmās. Atkarībā no uzstādāmās jaudas mēroga var atšķirties lietojumprogrammas, resursu klāsts un sarežģītības pakāpe. Ir trīs klasiskas tehnoloģijas, kas atbilst ilgtspējības jēdzienam gan elektroenerģijas, gan siltuma ražošanas gadījumā: biomasas sadedzināšanas iekārtas (*Habash, 2020*), (*Kiehadrouinezhad, Merabet and Hosseinzadeh-Bandafha, 2023*), saules enerģijas sistēmas (*Kalogirou, 2012*), (*Gareiou, Drimili and Zervas, 2021*) un siltumsūkņi (*Neave, 2002*), (*Carroll, Chesser and Lyons, 2020*).

Ir pieejamas vairākas metodes, kā biomasu pārvērst izmantojamā enerģijas veidā. Galvenās no tām ir:

- tiešā sadedzināšana – vēsturiski visizplatītākā kurināmā sadedzināšanas metode, lai iegūtu siltumu, ko izmanto dažādos veidos atkarībā no izvēlētās tehnoloģijas (piemēram, ar tvaiku darbināma turbīna) (*Levine, 2003*), (*Mandø, 2013*), (*Lam et al., 2019*);
- pirolīze – organisko vielu termiskā sadalīšanās bez skābekļa (tā ir salīdzinoši lēna ķīmiska reakcija, kas notiek zemā temperatūrā, lai biomasu pārvērstu par noderīgāku kurināmo, piemēram, ar ogļūdeņražiem bagātu gāzu maisījumu un ar oglekli bagātu cieto atlikumu) (*Saidur et al., 2011*), (*Basu, 2010b*);
- gazifikācija – biomasas termokīmiska pārvēršana gāzveida kurināmajā, izmantojot daļēju biomasu oksidēšanu augstā temperatūrā (*Basu, 2010a*), (*George, Arun and Muraleedharan, 2016*).

Šķeldu visvairāk izmanto kā kurināmo katlu mājās, kas nodrošina centralizēto siltumu (*Nunes et al., 2019*). Tas ir racionāls risinājums, kā rezultātā tiek pareizi izmantoti bioloģiski noārdāmie atkritumi, jo šķelda parasti veidojas kā mežizstrādes atliekas. Ņemot vērā katlu māju jaudu, daudzos gadījumos ir jāuzstāda papildu risinājumi sistēmas kopējās energoefektivitātes uzlabošanai, piemēram, dūmgāzu kondensatori, kas ļauj atgūt lieko siltumu (*Vigants et al., 2015*), (*Le Zhang et al., 2022*), (*Bălănescu and Homutescu, 2019*).

Mājsaimniecības līmenī patērētāja spēja pāriet uz autonomu elektroenerģijas patēriņu lielā mērā ir atkarīga no vairākiem faktoriem. Galvenais faktors ir saimniecības energoefektivitāte. Jo lielāks patēriņš, jo grūtāk saimniecībai kļūst autonomai. Savukārt privātais patēriņš var būt atkarīgs no valsts, kurā atrodas saimniecība, un pieejamajām tehnoloģijām efektīvākai elektroenerģijas izmantošanai. Jāpiebilst, ka patēriņš ne vienmēr ir atkarīgs no valsts attīstības līmeņa. Saskaņā ar *IEA* ziņojumu jaunattīstības valstis var uzrādīt izaugsmi, kas ir līdzīga attīstītajām valstīm. Tomēr katrai valstij ir savas iespējas saimniecībās ieviest jaunas tehnoloģijas (kas darbojas no atjaunojamiem avotiem) (*International Energy Agency, 2023*). Mājsaimniecības enerģētiskās autonomijas nodrošināšanai var uzstādīt saules paneļus, vēja ģeneratorus vai ģeotermālās enerģijas ģeneratorus. Papildus ir jāuzstāda enerģijas glabāšanas iekārtas. Mūsdienās pasaulē pieprasījums pēc enerģijas glabāšanas tehnoloģijām (īpaši litija baterijām) tikai pieaug, tas nozīmē arī cenu kāpumu. Viens no variantiem ir mājsaimniecībās izmantot vecās elektrotransporta baterijas, Tomēr to darbības laiks un efektivitāte vēl ir jāpēta un jāanalizē (*Speidel and Bräunl, 2016*).

Būtisks faktors ir pašu mājsaimniecību vēlme investēt energotehnoloģijās un kļūt autonomām. Šajā kontekstā galvenā loma ir valsts motivācijai, it īpaši ja šī motivācija ir saistīta ar finansiālo ieguvumu. Piemēram, valstis var piešķirt atlaides (vai samazināt rēķinus) mājsaimniecībām par noteiktu enerģijas daudzuma ietaupījumu (*McKenna, 2018*).

Efektīvākai mājsaimniecību pārejai uz autonomiju ir svarīgi pārskatīt vietējos normatīvos aktus (*Suciu et al., 2019*), lai stimulētu patērētājus ieguldīt tehnoloģijās. Neredzot ieguvumus sev, mājsaimniecības netieksies pēc pārmaiņām. Lai uzlabotu savas mājas energoefektivitāti, ir ļoti

svarīgi saņemt atbilstošus, noderīgus norādījumus no atbildīgajām struktūrām un iestādēm (McKenna, 2018), (Plutshack et al., 2019).

Energoapatīvībai nepieciešamas tehnoloģijas, kuru pieejamība atsevišķos reģionos var būt problemātiska. Arī iedzīvotāju vēlmei maksāt (*Willingness to Pay*) ir iela loma – atkarībā no valsts var atšķirties iedzīvotāju labklājības līmenis. Attīstītākajās valstīs cilvēki var atļauties pāriet uz enerģētisku autonomiju, bet citās valstīs vai pat dažos reģionos, kas ir nabadzīgāki par citiem, situācija var būt diametrāli pretēja. Šajā gadījumā risinājums var būt valsts palīdzība, bet pārlietu striktas normatīvo aktu prasības var palielināt enerģētisko nabadzību (Irie and Kawahara, 2022).

Ņemot vērā, ka funkcionāla autonoma energoapgādes tīkla jeb viedā tīkla izveidei un izbūvei ir nepieciešamas dziļas zināšanas, prasme izmantot modernās tehnoloģijas un finansiāls nodrošinājums, tehnoloģiju izmantošana atsevišķām mājsaimniecībām (vai pat reģioniem) var kļūt par izaicinājumu. Mūsdienās lielai daļai Eiropas mājsaimniecību energosistēmu ir viedtīkla īpašības (Kott and Kott, 2019).

Pāreja uz enerģētisko autonomiju var būt ekonomiski izdevīga arī pašai valstij. Apskatot valsts ieguvumus, tiek pieņemts, ka, pārlietot slodzi uz mājsaimniecībām, valstij ir iespējami ieguvumi un ietaupījumi, taču ir jāņem vērā sociāli ekonomiskās atšķirības. Stratēģijas, par pāreju uz autonomāku energoapgādes sistēmu izstrādi, savukārt var ietekmēt enerģijas neto ekonomiskās izmaksas un kopējo enerģijas daudzumu, ko patērē katra mājsaimniecība (Ngoma et al., 2018), (Milojević et al., 2021). Tomēr ekonomiskās krīzes apstākļos, kā arī līdzšinējās vides aizsardzības un energotaupības politikas ietvaros ievērojams skaits mājsaimniecību ir spiestas dzīvot ienākumu samazināšanās un elektroenerģijas cenu pieauguma apstākļos. Šajā sakarā sagaidāms enerģētiski nabadzīgo mājsaimniecību skaita pieaugums (Dorothee and Sondes, 2019).

Zinot, ka autonomija var izrādīties pārāk dārga un grūti sasniedzama, alternatīva var būt kopienu izveide. Piemēram, Vācijā aptuveni 46 % no valstī saražotās atjaunojamās enerģijas pieder tieši kopienām (Wirth, 2017). Šādu energosistēmu raksturo daudz lielāks mazu spēkstaciju un īpašnieku/operatoru skaits. Sistēma ir vairāk integrēta gan vertikāli no piedāvājuma līdz pieprasījumam, gan horizontāli starp dažādiem energoapgādes un resursu veidiem, piemēram, elektroenerģiju, siltumu un gāzi (McKenna, 2018).

Energokopienų sistēmām ir raksturīga iesaistīšanās enerģētikas vērtību ķēdē. Ieguvumi būtu jāgūst visām projektā iesaistītajām pusēm. Energokopienų veidošana ne vienmēr ir ekonomiski izdevīga, bet ekonomiskos īstermiņa ieguvumus ne vienmēr vajadzētu uzskatīt par primārajiem un koncentrēties uz ilgtermiņa ieguvumiem. Energokopienų var stimulēt vietējo ekonomiku, taču neto ietekmi ir ļoti grūti izmērīt, un tā ir ļoti atkarīga no vietējiem apstākļiem. Turklāt ir arī negatīvas sekas, piemēram, darbavietu pārvietošana citās nozarēs, kas var būt uzskatāma par sociāli negatīvu ietekmi (McKenna, 2018).

Pārejot uz autonomu vai kopienu sistēmu, jāizsver attiecīgu energoresursu integrācija un sadale. Ir nepieciešama pasākumu kombinācija – tīkla paplašināšana vai stiprināšana, lielāka elastība, uzglabāšana, sektoru savienošana, viedas kontroles sistēmas u. c. Neskatoties uz izvēlēto sistēmas veidu, tai joprojām jābūt savienotai ar kopējo sadales tīklu. Ļoti liela dalībnieku skaita dēļ paredzams, ka šī tīkla pārvaldībai būs nepieciešams vairāk informācijas un komunikācijas tehnoloģiju nekā centralizētās sistēmas gadījumā. Tas savukārt padarīs sistēmas pārvaldību un kontroli sarežģītāku (*Funcke and Bauknecht, 2016*).

Ja kopienas palielina vietējās energopatstāvības pakāpi, tās samazina pieprasījumus no sadales un augstsprieguma elektrotīkla. Tādējādi energokopienų izveide samazina nepieciešamos ieguldījumus kopējā sadales tīkla izmaksās, kas segtas no visu galapatērētāju (ar dažiem izņēmumiem) maksājumiem par iegādātās elektroenerģijas vienību. Ja kāda kopiena vēl tikai plāno kļūt patstāvīga, tā var mēģināt saņemt subsīdijas no valsts atjaunojamo energoresursu izmantošanai un energoefektivitātes uzlabošanai. Tomēr, ja šādu kopienu ir daudz, subsīdijas varēs saņemt tikai dažas no tām vai to izmērs būs samazināts. Papildus kopējo tīkla maksu un subsīdiju izmaksas daļīs visi patērētāji (ar izņēmumiem). Viena projekta marginālais efekts uz vienu atsevišķu patērētāju ir nepārprotami mazs, bet tūkstošiem autonomo pašvaldību varētu radīt ievērojamas papildu izmaksas patērētājiem. Neraugoties uz skaidriem mikroekonomiskajiem ieguvumiem, ko patērētāji gūst no elektroautonomijas, tīrā makroekonomiskā ietekme varētu būt negatīva (*McKenna, 2018*).

Latvijas apstākļos risinājums varētu būt mazo energokopienų izveide, kā arī īpaši nozīmīgu ēku (piemēram, slimnīcu) pāreja uz enerģētisko autonomiju. Salīdzinot ar citām valstīm, Latvijai nav tik liels saules enerģijas potenciāls, lai varētu nodrošināt nepārtrauktu elektrības padevi visu gadu (*Global Solar Atlas, 2023*). Pētījumus par saules paneļiem un to potenciālu Latvijā analizēja (*Gravelsins et al., 2023*). Autors secināja, ka saules fotoelektriskos paneļus ar baterijām bez atbalsta politikas varētu uzstādīt 10 % no visām mājāsaimniecībām Latvijā, ja elektroenerģijas cena paliktu nemainīga. Taču veiksmīgs risinājums varētu būt saules paneļu apvienošana ar citiem enerģijas avotiem. Koģenerācija un koksnes kurināmais ir parādījuši, ka mikrokoģenerācijas stacijas sniedz arī priekšrocības enerģijas izmaksu un oglekļa dioksīda emisiju samazināšanas ziņā (*Merkel, McKenna and Fichtner, 2015*), (*Angrisani et al., 2015*), (*Rosato, Sibilio and Ciampi, 2013*)(*Ievina et al., 2019*).

Zaļā kursa iniciatīva paredz līdz 2030. gadam samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas par 55 % (*European Commission, 2020*). Privātā sektora ieguldījums siltumnīcefekta gāzu emisijās, kas saistītas ar apkuri, jāsamazina par aptuveni 35 % no pašreizējā līmeņa. ES vidējais siltumenerģijas patēriņš ir 540 MJ/m², bet, lai izpildītu noteiktos standartus, patēriņš ir jāsamazina līdz 342 MJ/m² (*UN Environment programme, 2022*). Latvijas gadījumā ikgadējais enerģijas patēriņš privātajā sektorā ir 720 MJ/m², tas nozīmē vēl lielāku samazinājumu (*Veljkovic, Pohoryles and Bournas, 2023*). Māju apkure un ūdens uzsilde ir pamatvajadzības daudzās valstīs, arī Latvijā.

Īpaša uzmanība jāpievērš energoefektivitātes un iekārtu radīto cietvielu un SEG emisiju jautājumam. Centralizētās energoapgādes sistēmu raksturo efektīvs siltumenerģijas ražošanas process, koksnes biomasas izmantošana privātmājās kopumā ir neefektīva un ar augstu emisiju līmeni. Kā norāda (*Cabinet of Ministers, 2020a*), galvenie PM_{2,5} emisiju avoti 2016. gadā ir mājsaimniecības un pakalpojumu sektors (58,8 %), kas plaši izmanto biomasas sadedzināšanas iekārtas, enerģijas ražošanas sektors (13,2 %) ar plaši izplatītu biomasas izmantošanu apkures katlos centralizētās siltumapgādes un koģenerācijas stacijās, kurināmā sadedzināšana rūpniecībā (12,5 %) un transports (4,7 %).

Mājsaimniecību situācija ir vēl sliktāka, jo uzstādītā jauda ir vēl zemāka, salīdzinot rūpniecības sektoru ar mikroģenerācijas elektroenerģijas ražošanu pašpatēriņam. Patērētāju interesēs Elektroenerģijas tirgus likumā tika ieviesta neto elektroenerģijas norēķinu sistēma mikrorazotājiem, kura stājās spēkā 2014. gada 1. janvārī, attiecinot to uz visām mājsaimniecībām, kas pašas ražo elektroenerģiju no AER. 2019. gada vidū mikroģenerācijas sistēmu izmantoja 384 mājsaimniecības, to kopējā uzstādītā jauda bija 2,12 MW. Kopš 2012. gada Ekonomikas ministrija ir izsniegusi aptuveni 600 atļauju jaunu elektroenerģijas ražošanas iekārtu nodošanai ekspluatācijā, no kurām lielākā daļa ir mikroģenerācijas iekārtas ar jaudu no 0,0035 MW līdz 0,01 MW. Šis apjoms ir ļoti neliels, un 2019. gadā tika reģistrēti 550 mikroģeneratoru pieslēgumi (līdz 11,1 kWh) ar kopējo uzstādīto elektrisko jaudu 3,23 MW, kas ir neliela daļa (aptuveni 0,1 %) no kopējās uzstādītās elektriskās jaudas Latvijā (*Cabinet of Ministers, 2020b*).

Lai sasniegtu ES zaļā kursa mērķus, nepietiks tikai ar bezemisiju tehnoloģiju ieviešanu un rūpniecības sektora pārveidi, svarīgi ir attīstīt visas tautsaimniecības jomas, tostarp atjaunojamās enerģijas biomasas efektīvu izmantošanu ES individuālās apkures un elektroenerģijas ražošanas sektoros.

Latvijā kopumā ir 817 900 mājsaimniecību, no kurām 31,5 % atrodas laukos un 68,5 % pilsētās. 82,5 % lauku iedzīvotāju ir nodrošināta decentralizēta siltumapgāde mazapdzīvotās lauku teritorijās, un lielākā daļa no centralizētās siltumapgādes saražotās siltumenerģijas tiek izmantota pilsētās (74,3 % no pilsētu mājsaimniecību skaita). Individuālā apkure nodrošināta 356 600 mājsaimniecību, tostarp 212 429 mājsaimniecībām laukos, kas liecina, ka šīs lauku mājsaimniecības, visticamāk, ir privātmājas (kopējais privātmāju skaits ir 211 118) (Centrālā statistikas pārvalde, 2023).

Privātmāju apkures iekārtu stāvoklis bieži vērtējams kā ļoti slikts, lielāko daļu veido ar malku darbināmas un vismaz 25 gadus vecas apkures iekārtas (katli, krāsnis). Tikai neliela daļa ir augstas efektivitātes iekārtas (piemēram, katli malkas gazifikācijai). Lielākā daļa iekārtu ir novecojušas, un to efektivitāte ir zem 60 %, par ko liecina arī valsts primārais siltumenerģijas patēriņš, no kura centralizētā apkure veido 26 %, bet individuālā apkure – 74 %, lai gan 56,4 % mājsaimniecību ir pieslēgtas centrālajai apkurei.

Kā norāda (Pakere, Lauka and Blumberga, 2019), šobrīd notiek diskusijas par to, kā samazināt fosilo enerģijas avotu patēriņu, nezaudējot siltuma pārnesei efektivitāti un neriskējot palielināt cenas. Ir ļoti svarīgi noteikt alternatīvas tradicionālajiem risinājumiem, lai novērtētu vietējās atjaunojamās enerģijas attīstības perspektīvas. Ņemot vērā, ka starptautiskās politikas ietekmē mainās atjaunojamo energoresursu potenciāls, ļoti noderīga ir precīzāka informācija par ierobežojumiem konkrētu AER piemērošanā vietējā līmenī (Kacare et al., 2021).

Lai samazinātu kurināmā izmaksas, mazinātu atkarību no piegādātājiem un palielinātu saražotās enerģijas stabilitāti un videi draudzīgumu, gan centralizētajā, gan decentralizētajā energoapgādē pakāpeniski notiek pāreja uz alternatīviem enerģijas avotiem. Populārākās dalītās un decentralizētās enerģijas ražošanā izmantotās tehnoloģijas ir saules paneļi elektroenerģijas ražošanai, saules kolektori un biomasas katli karstā ūdens un apkures nodrošināšanai (Auñón-Hidalgo, Sidrach-de-Cardona and Auñón-Rodríguez, 2021).

Saskaņā ar (Centrālā statistikas pārvalde, 2023) Latvijā jau šobrīd atjaunojamās enerģijas daļa kopējā enerģijas galapatēriņā ir 42 %, taču, lai turpinātu pārvarēt ģeogrāfiskos un vides ierobežojumus, ir ļoti svarīgi veicināt efektīvu AER izmantošanu, piemēram, palielinot sadedzināšanas efektivitāti biomasas katlos, vai augstas efektivitātes saules paneļu uzstādīšanu.

Lai samazinātu enerģijas patēriņu ēkās, tiek izmantotas dažādas tehnoloģijas, atjaunojamie energoresursi un to kombinācijas (piemēram, saules fotoelementu sistēmas, vēja enerģija, biomasas mikrokoģenerācija), kā arī energoefektivitātes pasākumi. Taču saules tehnoloģiju izmantošanu vienmēr ierobežo laikapstākļi (Auñón-Hidalgo, Sidrach-de-Cardona and Auñón-Rodríguez, 2021), (Wei and Skye, 2021). Kā savā pētījumā norāda (Kuhn et al., 2021), (Pirmohamadi et al., 2021), (Rozenale, Lauka and Blumberga, 2018) (Pakere and Blumberga, 2019), integrētu saules fotoelementu moduļu izveidei ir liels potenciāls energosistēmu pārveidošanā, un to lietojums tiek plaši pētīts centralizētajai siltumapgādei Latvijā kontekstā.

Saules enerģijas sistēmas ir balstītas uz Saules starojuma pārvēršanu jaudā (Ashok Kumar L., Indragandhi V. and Uma Maheswari Y., 2020). Saules kolektorus izmanto siltuma ražošanai un fotoelektriskos (PV) paneļus elektroenerģijas ražošanai (Khanafar and Vafai, 2013), (Ong, Jiang and Lai, 2018), (Alam Emon, Ahmad and Hasanuzzaman, 2022).

Mājsaimniecībās un komerciālajā sektorā arvien vairāk izmanto saules enerģiju (Amani and Soroush, 2021), (Thadani and Go, 2021). Energoapgādes drošības gadījumā būtiska nozīme ir pārejai no enerģijas patērētāja uz enerģijas ražotāju un patērētāju (tā saukto *prosumer*) un tās ietekmei uz veidu, kā indivīdi izmanto enerģiju (Wittenberg and Matthies, 2016).

Enerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas izmanto, lai uzlabotu saules enerģijas sistēmu efektivitāti. Siltumenerģijas uzkrāšanas (*Thermal energy storage, TES*) sistēmas var uzglabāt siltumu vai aukstumu, lai vēlāk to izmantotu dažādos apstākļos, piemēram, atšķirīgos temperatūras režīmos (Cabeza et al., 2015). Elektroenerģijas uzglabāšanai (*Electrical energy storage, EES*) ir trīs

galvenās lomas: samazināt elektroenerģijas piegādes izmaksas, akumulēt enerģiju, kad ir zems enerģijas patēriņš, uzlabot drošību negaidītu tehnisko problēmu vai katastrofu laikā, kā arī uzturēt un uzlabot elektroenerģijas kvalitāti (frekvenci un spriegumu) (*Giddey, Badwal and Ju, 2019*).

Saules enerģijas ražošanai ir novērojams mērogojuma efekts, palielinoties tā apjomam, samazinās īpatnējās izmaksas. Salīdzinot ar maza mēroga saules enerģijas sistēmām, kas domātas mājsaimniecībām vai pašvaldību ēkām, saules siltuma izmaksas var samazināt vismaz par trešdaļu. Interesantākie projekti fosilā kurināmā aizstāšanai un CO₂ emisiju samazināšanai ir saules enerģijas sistēmas ar sezonālu TES kombinācijā ar biomasas katliem (*Fisch, Guigas and Dalenbäck, 1998*), (*Pauschinger, 2016*).

Maza mēroga saules enerģijas stacijas tiek uzstādītas nepietiekamā apjomā, un to attīstība ir lēna. To traucē vairāki šķēršļi. Būtiskākais no tiem – mazapdzīvotās vietās bez energoapgādes infrastruktūras šādu tehnoloģiju ieviešanu apgrūtina būtiski tehniskie šķēršļi. Lai mazapdzīvotos rajonus pieslēgtu kopējam energoapgādes tīklam, tam ir augstas izmaksas un kapitāla pieejamības ierobežojumi (*Best and Trück, 2020*). Tāpēc saules enerģiju parasti izmanto, lai segtu daļu no patēriņa atsevišķās energosistēmās, un bieži apvieno ar citiem tehnoloģiskajiem risinājumiem.

Siltumsūkņi (*Heat Pump, HP*) ir iekārta, kas ļauj paaugstināt ieejošā siltuma nesēja temperatūru, izmantojot salīdzinoši zema potenciāla enerģiju (*Mota-Babiloni and Navarro-Esbrí, 2023*) (citiem vārdiem, *HP* izmanto elektroenerģiju, lai radītu zemas temperatūras siltumu (*Taccari et al., 2015*)). Atkarībā no siltuma avota un izmantotā siltummaiņa ir izplatīti trīs galvenie *HP* veidi:

- gaiss-gaiss – galvenokārt balstās uz palielinātas virsmas cauruļu tipa siltummaiņiem, lai iegūtu siltumu no apkārtējās vides vai no recirkulējošās gaisa plūsmas (*Urchueguia, 2016*) (var iegūt siltumu pat negatīvas āra gaisa temperatūras apstākļos (*Shinobu and Matsuki, 1990*));
- šķidrums (saukts arī par zemes *HP*) – izplatīts tur, kur ir iespējama kontūra izveide, ierokot to zemē, saņemot siltuma enerģiju no zemākie zemes slāņiem (*Dincer and Rosen, 2015*);
- ģeotermālā siltuma – izmantojot pazemes ūdeņus kā siltuma ieguves avotu, (izmanto zemes ģeotermālos slāņus kā siltuma avotu (ziemā) vai siltuma uztvērēju (vasarā)) (*Rybach, 2012*).

HP var izmantot gan telpu apkurei, gan dzesēšanai. *HP* ūdens sildītājs darbojas dzesēšanas iekārtas lokā, uztverot siltuma enerģiju no apkārtējās un nogādā to uz siltummaini-iztvaikotāju TES, tādējādi paaugstinot ūdens temperatūru (*Hepbasli and Kalinci, 2009*).

Liela mēroga *HP* var atgūt un uzlabot siltuma pārpalikumu, izmantojot atjaunojamo elektroenerģiju, radot būtisku tehnoloģisku sviru termisko procesu dekarbonizācijai. Diemžēl trūkst informācijas un pieredzes par liela mēroga *HP* jēgpilnu lietojumu praksē, jo nav izpratnes un pieredzes gan galapatērētājiem, gan uzstādītājiem, gan inženieriem. Šīs zināšanu nepilnības un

zemais tirgus pārredzamības līmenis pastiprina tendenci izmantot tradicionālās fosilā kurināmā apkures tehnoloģijas (*Schlosser et al., 2020*).

Mazas jaudas *HP* galvenais šķērslis ir ilgs atmaksāšanās laiks (*Abid et al., 2021*), (*Sadeghi, Ijaz and Singh, 2022*), (*Kijo-Kleczkowska, Bruś and Więciorkowski, 2023*). Neskatoties uz salīdzinoši augsto efektivitāti, potenciālie lietotāji parasti izvēlas lētākus risinājumus. Svarīgi ir arī izvēlēties atbilstošu resursu atkarībā no iespējamās *HP* atrašanās vietas.

Tomēr ir daudz dažādu enerģijas ražošanas tehnoloģiju kombināciju. Piemēram, ir saules enerģijas hibrīdsistēma, kas vienlaikus var iegūt saules enerģiju gan siltumenerģijas, gan elektroenerģijas veidā (*Yin, Zashir and Pao, 2021*). Šādas sistēmas var kombinēt arī ar šķidrumsiltumsūkņiem (*Dincer and Rosen, 2015*).

Saules starojums paaugstina *PV* moduļu temperatūru, tā rezultātā samazinās to elektriskā efektivitāte. Pareizi cirkulējot šķidrumam ar zemu iekļūšanas temperatūru, siltums tiek iegūts no *PV* moduļiem, saglabājot elektrisko efektivitāti apmierinošā līmenī. Iegūto siltumenerģiju var izmantot vairākos veidos, palielinot sistēmas kopējo enerģijas iznādi. Hibrīdas *PV* un siltuma sistēmas var lietot galvenokārt ēkās, lai ražotu elektroenerģiju un siltumu, un tās ir piemērotas *PV* lietojumiem ar augstu saules starojuma un apkārtējās vides temperatūras vērtību (*Bahlawan et al., 2020*).

Latvijā centralizētās energoapgādes sistēmas pārveidei par autonomu sistēmu ir virkne priekšrocību. Šobrīd galvenie patēriņa veidi ir siltums, aukstums, ventilācija un karstais ūdens. Taču pašreizējos apstākļos, arvien straujāk attīstoties elektrotehnoloģijām, nepieciešamība pēc stabilas elektroapgādes tikai pieaugs. Valstī ir energoapgādes pārtraukumi, un, lai gan to skaits ar katru gadu kļūst mazāks, cilvēki arvien vairāk domā par savu enerģijas avotu (*Sadales Tīkls, 2023*). Tomēr motivācija atdalīties (t. i., kļūt autonomam) katram var būt atšķirīga. Tie varētu būt, piemēram, ekonomiskie ieguvumi, rūpes par vidi un vēlme dot savu ieguldījumu cīņā pret klimata pārmaiņām, solidaritātes un vienotības sajūta kopienā vai vēlme samazināt savu atkarību no enerģijas piegādātājiem. Motivācija var būt pat vēlme kļūt noturīgākam un neatkarīgākam no ārējiem apstākļiem, pat ja tas prasa papildu finanšu ieguldījumus. Visu to ļauj sasniegt siltumapgādes un energoapgādes sistēmas uzstādīšana. Koģenerācijas sistēma var nodrošināt gan siltumu, gan elektrību.

Biomasu var izmantot kā kurināmo koģenerācijas tehnoloģijās, kas papildus vienlaicīgai siltuma un elektroenerģijas ražošanai var būtiski paaugstināt procesa efektivitāti (no 30–35 % līdz 80 %) (*Zhu et al., 2021*). Enerģijas tehnoloģijas var klasificēt pēc elektroenerģijas jaudas: mikrostacijas (no dažiem kW_{el} līdz $50 kW_{el}$), vidējas spēkstacijas (no $50 kW_{el}$ līdz $1000 kW_{el}$) un liela mēroga stacijas ($> 1000 kW_{el}$) (*Badea, Vlad and Stolan, 2010*). Mikrostacijas maksimālā siltuma jauda ir $300 kW$ (*Brandoni et al., 2014*). Literatūra piedāvā dažādas decentralizētas koģenerācijas tehnoloģijas, tostarp kurināmā šūnas, organisko Rankina ciklu (augsta vai zema temperatūra), Stirlinga dzinējus (*Chmielewski et al., 2016*), (*Brandoni et al., 2014*). *Incili et al.*

(*Incili et al.*, 2022) izceļ Stirlinga dzinēja priekšrocības privātajiem lietotājiem lauku apvidos, kur trūkst elektrības infrastruktūras. Kā priekšrocības jāmin neatkarība no strāvas padeves pārtraukumiem un paaugstināta energoapgādes drošība. *Alanne un Saari (Alanne and Saari, 2004)* norāda, ka Stirlinga dzinējus veiksmīgi izmanto dzīvojamās ēkās, pateicoties piemērotai elektroenerģijas un siltuma attiecībai. Tas var būt īpaši svarīgs kritērijs lauku apvidos, kuros ir auksts klimats.

Vēl efektīvākai darbībai un paaugstinātai energoefektivitātei Stirlinga dzinēju var apvienot ar degvielas šūnas elementu (Fuel Cell) sistēmu (*Teixeira, 2020*), (*Budak and Devrim, 2019*). Līdzīga Stirlinga dzinēja un elementu kombinācija, ko izmanto autonomās energoapgādes risinājumos, tika aplūkota, izmantojot MCDA (*Multi Criteria Decision Analysis*) metodi, kā arī politiskajā, ekonomiskajā, sociālajā, tehnoloģiskajā, likumdošanas un vides aspektā. Pēc iegūtajiem rezultātiem šī sistēma ir videi visdraudzīgākā un tehnoloģiski labāka par alternatīvām. Tomēr sistēmai ir arī savi trūkumi – salīdzinoši augsta cena un ilgs palaišanas laiks. Tomēr, neskatoties uz to, Stirlinga dzinējs ir viens no vispiemērotākajiem risinājumiem mājsaimniecībām. Citā pētījumā (*Streimikiene and Baležentis, 2013*) Stirlinga dzinējs uzrādīja daudz labākus rezultātus, un tajā atzīts, ka pētījuma laikā tas bija visrentablākais un efektīvākais, salīdzinot ar tirgū piedāvātajām alternatīvām. Stirlinga dzinēja un degvielas šūnas kombinācija izrādījās veiksmīgāka, nekā sākotnēji gaidīts (*Khan and Gohari Darabkhani, 2022*). Paši elementi ir tehnoloģija dažādu degvielu ķīmiskās enerģijas pārvēršanai elektroenerģijā ar lielāku efektivitāti nekā tradicionālo enerģijas avotu gadījumā (*Abdelkareem et al., 2021*). Elementiem ir būtiskas priekšrocības – tie ir maza izmēra, darbojas klusi, tie ir plaši lietojami, un, kas nav mazāk svarīgi, tiem ir zema ietekme uz vidi. Savukārt Stirlinga dzinējs ārējo siltumenerģiju pārvērš mehāniskajā enerģijā, tam ir zems izmešu daudzums, nepieciešama minimāla apkope, klusa darbība (praktiski bez vibrācijas), augsta efektivitāte un iespēja darboties ar dažādām degvielām. Degvielas elementu apvienošana ar Stirlinga dzinēju ļauj iegūt abu tehnoloģiju priekšrocības.

Stirlinga dzinējus plaši izmanto kopā ar saules enerģiju, pateicoties PV augstajai jaudas un svāra attiecībai un augstajai termiskajai efektivitātei, jo saules koncentrators ļauj panākt augstu temperatūru dzinēja darbībai. *SDSE (Solar Dish Stirling Engine*, Stirlinga dzinējs apvienojumā ar saules enerģijas uztvērēju) modeļu efektivitāte saskaras ar daudzām problēmām, piemēram, augstas reģeneratora efektivitātes sasniegšana, augstas saules starojuma absorbcijas sasniegšana uztvērējā un zemas temperatūras sasniegšana atgrūšanas pusē (*Al-Nimr, Khashan and Al-Oqla, 2023*).

PV sistēmas lietošanas izmaksas ir zemas, tomēr hibrīda PV-Stirlinga dzinēja-katlu sistēmai ir viszemākas izlīdzinātās elektroenerģijas izmaksas un atmaksāšanās periods. Izmantojot mikroģenerācijas sistēmas apkurē, ar vadības elektronikas palīdzību iespējams izveidot vienotu iekārtu, kuras pamatā ir PV un Stirlinga dzinējs. Tas ir ieteicams kā risinājums individuālām

apkures sistēmām, īpaši vietās, kuras nav pieslēgtas centralizētajai energoapgādes sistēmai (*Incili et al., 2022*).

2. METODOLOĢIJA

Šajā nodaļā ir aplūkota veikto pētījumu un eksperimentu metodoloģija. Šī metodoloģija nodrošināja iegūto datu ticamību. Sadaļā ir sīki aprakstītas darbības, kas veiktas, lai sasniegtu uzstādītos mērķus.

2.1. Bibliogrāfiskā analīze

Turpinot paplašināties informācijas pieejamībai un brīvpieejas zināšanu krātuvēm un palielinoties to krājumu apjomam, ir nepieciešamas efektīvākas un sistemātiskākas literatūras pārskatīšanas metodes. Šajā pētījumā izmantota strukturētās literatūras apskata (*Structured Literature Review*, SLR) metode. SLR ļauj identificēt nozīmīgas pētniecības tendences un jaunākos sasniegumus attiecīgajā jomā (*Secundo et al.*, 2020). Vispirms nodrošinot sistemātisku metodi pieejamo avotu novērtēšanai, SLR pēc tam pāriet pie daudzsološāko rakstu satura analīzes, tādējādi iekļaujot gan bibliometriskās analīzes, gan literatūras apskata elementus.

SLR metode iepriekš tika izmantota, lai analizētu dažādus energosistēmu aspektus, t. i., ēku energoefektivitāti (*Jung and Jazizadeh*, 2019), (*Loonen et al.*, 2013), atjaunojamus enerģijas avotus (*Dorrell and Lee*, 2020), (*Pires et al.*, 2021), viedās sistēmas (*Kojonsaari and Palm*, 2023). Ir publicēta literatūras analīze par Stirlinga dzinēju dažādiem lietojumiem, t. i., (*Zhu et al.*, 2021) apskatīja ar biomasu darbināmu Stirlinga dzinēju lietojumu, saules enerģijas Stirlinga sistēmas ir apkopotas (*Malik et al.*, 2022) darbā. Dažos no šiem pārskatiem ir izmantota strukturēta pētījuma metodoloģija (sk. (*Malik et al.*, 2022)), taču tie nav uzskatījuši ilgtspējības un energoapgādes drošības aspektus par galvenajiem apskatāmajiem jautājumiem. Tāpat iepriekš netika identificēts neviens strukturēts literatūras pārskats par Stirlinga dzinēju lietojumiem, kuros izmanto biomasu.

Izmantojot SLR, pirmkārt, ir jāizstrādā literatūras apskata protokols (*Massaro, Dumay and Guthrie*, 2016), un viens no sākotnējiem soļiem ir pētījuma jautājumu formulēšana (*Research Questions, RQ*) (*Dolge and Blumberga*, 2022). Saskaņā ar SLR metodoloģijas aprakstiem (*Secundo et al.*, 2020), (*Massaro, Dumay and Guthrie*, 2016) RQ var atvasināt trīs galvenajos virzienos: (1) novērtējums par pētījuma jomas vispārējo attīstību; (2) specifiskākas attīstības tendences, jo īpaši attiecībā uz pētījuma jomu; (3) pētniecības aktualitāte noteiktajā jomā. Strukturētam literatūras apskatam, kurā galvenā uzmanība pievērsta Stirlinga dzinēju pielietošanai darbībai ar biomasu, tā palielinot atjaunojamās enerģijas daļu, energoapgādes drošību un ilgtspējību, ir izstrādāti šādi RQ:

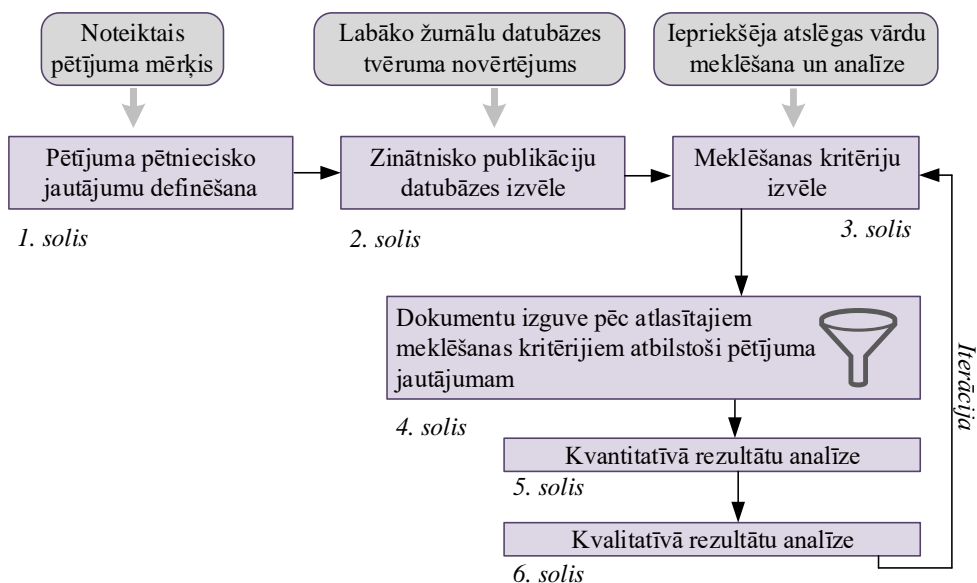
RQ1: Kā Stirlinga dzinēju pētniecība attīstījusies agrāk un tagad?

RQ2: Kas ir uzmanības centrā, un kādas ir jaunākās tendences maza mēroga (dzīvojamo) atjaunojamo energoresursu pētniecībā, kuru pamatā ir Stirlinga dzinēji, īpašu uzmanību pievēršot biomasai?

RQ3: Kāda ir Stirlinga dzinēja ietekme energoapgādes, energoapgādes drošības un vides pētniecības jomā?

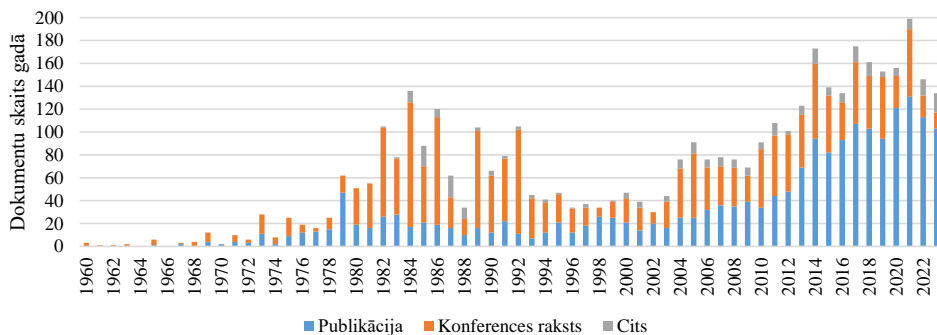
Izstrādātajā pētījuma protokolā (skat. 2.1. att.) ir aprakstīts *SLR* process, un tajā iekļautas metodes, kas izmantotas informācijas avotu (datubāzes) izvēlei, analizējamo pētījumu atlasei, apkopošanai un izpētei (*Secundo et al.*, 2020), (*Petticrew and Roberts*, 2008). Atbilstoši *Massaro et al.* (*Massaro, Dumay and Guthrie*, 2016) “ir svarīgi saprast, ka visi pētījumi ir pētniecības virziens, nevis stingra notikumu virkne”, tādējādi ir iesaistīta to nepārtrauktība un iterācija, kas ir attēlota arī sekojošajā pētījuma protokolā. Atkārtojamībai literatūras analīzē ir vairākas priekšrocības. Galvenās ir spēja padziļināti izpētīt tēmas fonu un ņemot vērā straujās izmaiņas pētniecības jomā (*Baker*, 2004), (*Nolting et al.*, 2019). Saskaņā ar minēto, tika izstrādāts secīgs un strukturēts literatūras analīzes process, ietverot noteiktu cirkularitātes un iterācijas pakāpi.

Iepriekšējie pētījumi liecina, ka inženierzinātņu pētījumos *Scopus* datubāzes tvērums ir plašāks nekā *Web of Science* (*Secundo et al.*, 2020), (*Nolting et al.*, 2019). Saskaņā ar datubāzu novērtēšanas pieeju, ko izmantoja *Nolting et al.* (*Nolting et al.*, 2019), šajā solī tika salīdzināts divu populārāko zinātnisko publikāciju indeksu *Scopus* un *Web of Science* tvērums. No *Scimago* žurnālu reitingiem tika noteikti 2022. gada (jaunākie pieejamie dati) 100 labākie žurnāli par tematu “Enerģētika” un priekšmeta kategoriju “Enerģētikas inženierija un energotehnoloģijas” (*Scimagojr*, 2023). Pēc tam tika noteikts, kuri no šiem žurnāliem ir pieejami katrā no divām datubāzēm. Rezultātā *Scopus* tvērums šajā kontekstā ir noteikts 100 %, jo visi 100 populārākie žurnāli tika indeksēti *Scopus*. *Web of Science* datubāzē bija pārstāvēti tikai 84 no 100 labākajiem žurnāliem, tādējādi var pieņemt, ka tvērums ir 84 %. Žurnāli, ko aptvēra *Scopus*, bet ne *Web of Science*, ietvēra dažus žurnālus, kas publicēti galvenokārt ķīniešu valodā, un dažus žurnālus Apvienotajā Karalistē, ASV, Nīderlandē un Šveicē. Atlasē nebija neviena žurnāla, kas bija iekļauts *Web Of Science* datubāzē un nebija pieejams *Scopus*. Šie pētījuma protokola otrā soļa rezultāti apstiprina iepriekšējos secinājumus, un konkrētajā šī raksta pētījuma tēmā *Scopus* datubāzes tvērums ir plašāks attiecībā uz *Scimago* populārākajiem žurnāliem. Līdz ar to dokumentu ieguvei izvēlēta *Scopus* datubāze. Dokumentu ieguve tika veikta 2023. gada oktobrī un novembrī.



2.1. att. Izmantotā pētījuma metodoloģija.

Trešais solis ir meklēšanas kritēriju atlase, lai filtrētu visu literatūras datubāzi. *Noltings et al.* (2018) integrēja trīs meklēšanas paņēmienus: meklēšanu pēc atslēgvārda, meklēšanu virzienā atpakaļ (*backward*) un meklēšanu virzienā uz priekšu (*forward*). Tika izmantota šāda pieeja – pirmkārt, sākotnējai atslēgvārdu ģenerēšanai tiek analizēta attiecīgās izpētes jomas literatūra, pēc tam tiek izmantota meklēšana virzienā atpakaļ un uz priekšu, lai uzlabotu meklēšanas kritērijus. Vispārīgākais atslēgvārds “Stirlinga dzinējs” tika izmantots sākotnējai meklēšanai (ņemot vērā raksta nosaukumu, kopsavilkumu, atslēgvārdus), kas, ietverot izdevumus laikā no 1960. līdz 2023. gadam, *Scopus* sniedza 4213 rezultātus (sk. 2.2. att.). Gandrīz 88 % avotu bija angļu valodā, savukārt pārējie – ķīniešu, japāņu, vācu u. c. valodās.



2.2. att. Atslēgvārda “*Stirling engine*” meklēšanas rezultāti *Scopus* datubāzē.

Kopš 1977. gada publikāciju skaits ir ievērojami audzis, maksimumu sasniedzot 1984. gadā. Laika posmā no 1984. līdz 1993. gadam ir vērojama ļoti mainīga, bet kopumā lejupejoša tendence, kas liecina, ka Stirlinga dzinēju izpētes nozīme šajā periodā ir samazinājusies, bet pēc 2004. gada interese atkal parādījās. Stirlinga dzinējs ar maksimālo skaitu – 199 rakstiem – 2021. gadā. Kopumā laika gaitā ir bijušas ievērojamas ar Stirlinga dzinēju saistīto publikāciju skaita svārstības. Vērtējot publikācijas pēc to veida, kā redzams 2.2. attēlā, pieaugošo zinātnisko interesi ap 20. gadsimta asoņdesmitajiem gadiem galvenokārt noteica konferenču raksti, savukārt pēdējās divās desmitgadēs ir vērojams būtisks žurnālu rakstu skaita pieaugums. Sākotnēji iegūti 4213 dokumenti, kas satur frāzi “Stirlinga dzinējs”, ņemot vērā visus dokumentu veidus. Tomēr tika nolemts vēl vairāk ierobežot meklēšanu, aplūkojot tikai rakstus, konferenču rakstus un recenzijas, neiekļaujot konferenču rakstu recenzijas un grāmatas, jo tie nav oriģināli pētnieciskie raksti, un pirmie ir paredzēti konferenču tēmu apkopošanai, un tiem nav autoru.

Sākotnējās meklēšanas rezultāti nodrošina populārākos atslēgvārdus, kuri atspoguļoti rezultātos. Izslēdzot līdzīgus apzīmējumus, kas faktiski atkārtoti viens otru, desmit populārākie ar Stirlinga dzinēju saistītie atslēgvārdi ir:

siltuma pārnese (*Heat Transfer*), siltuma dzinēji (*Heat Engines*), saules enerģija (*Solar Energy*), reģeneratori (*Regenerators*), termodinamika (*Thermodynamics*), gaisa dzinēji (*Air Engines*), virzuļi (*Pistons*), brīvo virzuļu Stirlinga dzinējs (*Free Piston Stirling Engine*), enerģijas pārveidošana (*Energy Conversion*), optimizācija (*Optimization*). Salīdzinājumam – jaunākajā publikāciju vilnī (kopš 2002. gada) saules enerģija (*Solar Energy*) ir vēl augstāk 10 atslēgvārdu sarakstā, savukārt, piemēram, atjaunojamie energoresursi (*Renewable Energy Resources*) (vai avoti, enerģijas), biomasas un ilgtspējīga attīstība (*Sustainable Development*) ir minēti attiecīgi 101, 84 un 28 reizes.

Ņemot vērā iepriekš izvirzīto pētījuma mērķi un jautājumus (skat. 1. soli), paplašinātā meklēšana tika veikta, izmantojot vairākas paplašinātās meklēšanas virknes (skat. 2.1. tab.),

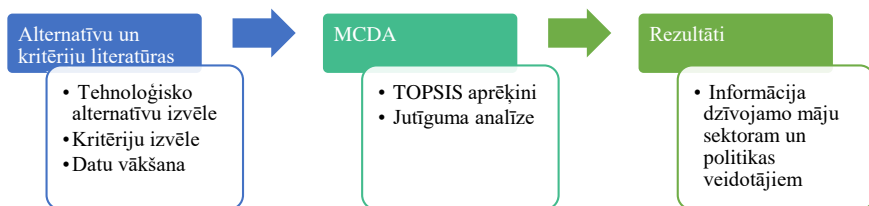
vienlaikus cenšoties neizmantot pārāk šaurus atslēgvārdus. Prezentēto pētījumu virkņu izstrāde katram secīgajam pētījuma jautājumam netika veikta lineāri, bet tā vietā lietota iepriekš minētā cirkularitātes un iterācijas pieeja (parādīta 2.1. att. ar atgriezeniskās saites/iterācijas cilpu). *RQ1* bija jāizpēta ar iegūtās izlases statistikas kvantitatīvo analīzi. *RQ2* un *RQ3*, pirmkārt, tika novērtēta izlases statistika, pēc tam tika pārbaudīti un analizēti iegūto dokumentu nosaukumi un kopsavilkumi, kam sekoja satura analīze. Šajos posmos tika iesaistīti četri recenzenti. Iekļaušanas novirze tika ierobežota, pārbaudot un analizējot visu iegūto ierakstu kopsavilkumus. Lielākā daļa ierakstu tika iegūti un analizēti arī kā pilni dokumenti (*RQ2* (n=29) un *RQ3* (n=8)).

2.1. tabula

| Meklēšanas kritēriji katram no definētajiem pētījuma jautājumiem | | |
|--|---|---|
| Pētījuma jautājums (<i>RQ</i>) | Meklēšanas kritēriji | Apraksts |
| | Meklēšanas virkne | |
| <i>RQ1</i> | TITLE-ABS-KEY ("stirling engine") AND PUBYEAR > 1959 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) | Visi pieejamie laikrindu dati, tikai raksti, konferences referāts, apskats. Laikrinda līdz 2023. gadam |
| <i>RQ2</i> | (TITLE-ABS-KEY ("stirling engine") AND TITLE-ABS-KEY ("residential" OR "household" OR "Micro Combined Heat and Power" OR "Micro Cogeneration" OR "Micro-CHP" OR "Micro-cogeneration" OR "Micro-combined Heat and Power" OR "Microcogeneration" OR "Microgeneration") AND TITLE-ABS-KEY ("biomass")) AND PUBYEAR > 1959 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) | Ierobežojumi, kas piemēroti <i>RQ1</i> , kā arī atslēgvārdi, lai atlasītu publikācijas par māsasaimniecības mēroga tehnoloģijām un ar biomasu darbināmām tehnoloģijām |
| <i>RQ3</i> | (TITLE-ABS-KEY ("stirling engine") AND TITLE-ABS-KEY ("energy secur*" OR "energy independ*")) AND PUBYEAR > 1959 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) | <i>RQ1</i> piemērotie ierobežojumi un atslēgvārdi, lai atlasītu publikācijas par energoapgādes drošību un enerģētisko neatkarību |

2.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze

Šajā pētījumā tika izmantotas divas metodes: literatūras apskats un daudzkritēriju analīze (*Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA*). Literatūras apskats balstīts uz zinātnisko literatūru. *MCDA* izvēlēta, pamatojoties uz pārskatīto dokumentu (*Khan and Gohari Darabkhani, 2022*). Lai sasniegtu vēlamu rezultātu, veiktas šādas sešas darbības, kas parādītas 2.3. attēlā.



2.3. att. Metodoloģijas soļi.

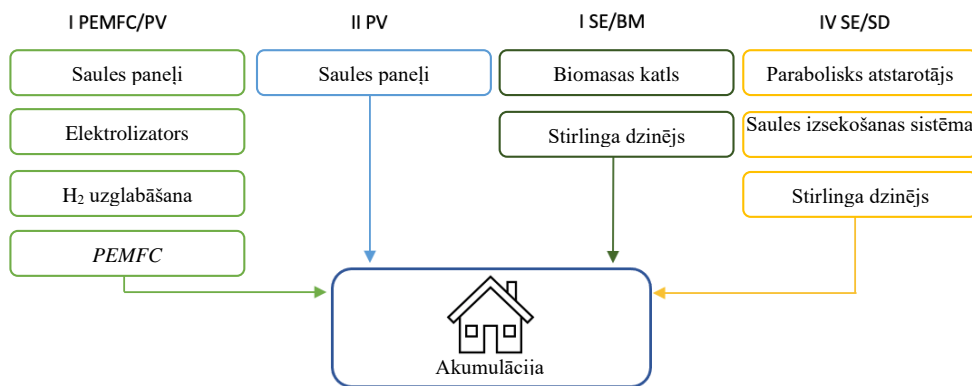
Literatūras apskats

Sākotnēji tika pieņemti lēmumi par to, kuras atjaunojamās elektroenerģijas ražošanas sistēmas varētu salīdzināt. Tika atlasītas četras sistēmas: protonu apmaiņas membrānas degvielas šūna ar fotoelektriskiem paneļiem (*PEMFC/PV*), fotoelementu paneļi (*PV*), Stirlinga dzinējs ar biomasu (*SE/BM*) un saules šķīvju Stirlinga dzinējs (*SE/SD*). Kā minēts iepriekš, galvenais mērķis bija salīdzināt degvielas šūnu un Stirlinga dzinēju tehnoloģijas. Šo tehnoloģiju sistēmas, nevis tikai pašas tehnoloģijas izvēlētas, lai varētu analizēt konkrētus datus, nevis datu intervālus. *MCDA* iekļāva arī *PV* sistēmu, jo tas ir mājsaimniecībās visplašāk izmantotais atjaunojamās enerģijas veids (*Khezri, Mahmoudi and Aki, 2022*). Tas darbojas kā bāzes scenārijs, lai labāk novērtētu citas sistēmas.

Ir vairāki kurināmā elementu veidi: protonu apmaiņas membrānas kurināmā elementi (*PEMFC*), sārmu elektrolīzes elementi, fosforskābes kurināmā elementi, kausēta karbonāta kurināmā elementi un cietā oksīda kurināmā elementi (*Abdelkareem et al., 2021*). *PEMFC* tika izvēlēti, jo tie ir piemēroti neliela apjoma elektroenerģijas ražošanai, tiem ir salīdzinoši augsta efektivitāte, un tie var ražot elektroenerģiju, izmantojot atjaunojamo enerģiju. Šīs degvielas šūnas ir vismodernākās un komerciāli pieejamas (*Knosala et al., 2021*). *PEMFC* darbojas 60–160 °C temperatūrā, un to elektriskā efektivitāte ir aptuveni 50 %. Šīs šūnas darbojas ar tīru ūdeņradi (*Khan and Gohari Darabkhani, 2022*). Ūdeņraža izcelsme nosaka, vai sistēmā saražotā elektroenerģija ir atjaunojama. Ūdeņradi var iegūt no fosilā kurināmā vai elektrolīzes ceļā. Visizplatītākais ir dabasgāzes ūdeņradis, kas veido vairāk nekā 48 % no kopējā saražotā ūdeņraža. Tam seko naftas pārveide (30 %), ogļu gāzifikācija (18 %), un tikai 4 % ūdeņraža tiek iegūti ar citām tehnoloģijām (*Stropnik et al., 2022*). Ūdeņradi var iegūt elektrolīzes ceļā no atjaunojamiem resursiem, piemēram, saules, vēja vai ūdens. Šajā pētījumā aplūkotā sistēma izmanto saules enerģiju, jo tā ir vispiemērotākā mājsaimniecības līmenī.

Stirlinga dzinēji parasti darbojas ar fosilo kurināmo (*Teixeira, 2020*), tomēr šiem dzinējiem ir iespēja izmantot atjaunojamās enerģijas avotus ar augstu efektivitāti. Gadu gaitā ir izstrādāti simtiem Stirlinga dzinēju dizainu, izmantojot termodinamikas pamatprincipus. Tos var klasificēt pēc cilindru izvietojuma, darbības režīma un virzuļa sakābes (*Salih et al., 2022*). Stirlinga dzinējus visbiežāk klasificē pēc cilindru izkārtojuma: alfa, beta un gamma. *A. Abuelyamen* un *R. Ben-Mansour* (*Abuelyamen and Ben-Mansour, 2018*) salīdzināja visu trīs veidu energoefektivitāti

vienādos apstākļos un atklāja, ka alfa Stirlinga dzinējam ir viszemākā jauda (0,9 W) un viszemākā siltuma efektivitāte. (1,8 %). Tālāk seko Stirlinga beta dzinējs, kura izejas jauda un termiskā efektivitāte ir attiecīgi 8,7 W un 7,5 %. Vislielākā izejas jauda un termiskā efektivitāte bija gamma Stirlinga dzinējam – 9,22 W un 9,8 %. Šajā pētījumā aplūkotajām sistēmām netika definēts īpašs Stirlinga dzinēja tips. Pamatojoties uz pārskatīto pētījumu (Teixeira, 2020), MCDA tika izvēlētas divas Stirlinga dzinēju sistēmas: ar biomasu darbināma sistēma un saules šķīvju sistēma. Visas izvēlētas sistēmas ir parādītas 2.4. attēlā. PV sistēma ir attēlota ar zilu krāsu, degvielas šūnu sistēma – ar gaiši zaļu krāsu un Stirlinga dzinēju sistēmas – ar dzeltenu un tumši zaļu krāsu. Visas atjaunojamās enerģijas sistēmas var uzlabot ar papildu akumulatoriem.



2.4. att. Šajā pētījumā aplūkoto sistēmu shēmas.

Protonu apmaiņas membrānas kurināmā elementu sistēma ar fotoelementu paneļiem – zaļā krāsā, PV paneļu sistēma zilā krāsā, ar biomasu darbināmu Stirlinga dzinēju – tumši zaļā krāsā un saules enerģijas Stirlinga dzinēju – dzeltenā krāsā.

Pēc salīdzināmo alternatīvu izvēles nākamais solis bija kritēriju atlase. Kritēriji noteikti, pamatojoties uz to atbilstību pētījuma mērķim un pieejamajiem datiem. Lai novērtētu enerģijas ražošanas sistēmas vides, tehniskajā un ekonomiskajā aspektā, noteikti seši kritēriji. Atlasītie kritēriji redzami 2.2. tab. Ideālās vērtības ir apzīmētas ar "+", kas norāda maksimālo vērtību, vai "-", lai norādītu minimālo vērtību.

Daudzkritēriju lēmumu analīzes kritēriji

| Kritēriju kategorija | Kritēriji | Ideālā vērtība |
|----------------------|--|----------------|
| Ekonomiskais aspekts | <i>LCOE</i> – izlīdzinātās sistēmas enerģijas izmaksas (€/kWh) | – |
| Tehniskais aspekts | Efektivitāte – sistēmas elektriskā efektivitāte (%) | + |
| | Uzticamība – sistēmas pilnas slodzes darba laiks (st/gadā) | + |
| Vides aspekts | <i>GWP</i> – sistēmas globālās sasilšanas potenciāls (kg CO ₂ eq/kWh) | – |
| | Kalpošanas laiks – tehnoloģijas tehniskais kalpošanas laiks (gadi) | + |

Izlīdzinātās enerģijas izmaksas (*LCOE*) ir salīdzinošs rādītājs, ko izmanto, lai novērtētu politiskos lēmumus saistībā ar atjaunojamās elektroenerģijas ražošanu (*Aldersey-Williams and Rubert, 2019*). *LCOE* indikators sniedz aplēses par enerģijas vienības izmaksām visā sistēmas darbības laikā, ieskaitot kapitāla, darbības un finansēšanas izmaksas. Tas parasti sastāv no sākotnējām investīcijām, uzstādīšanas izmaksām, ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksām, ievades likmēm, diskonta likmēm, tehniskā kalpošanas laika un nolietojuma (*Teixeira, 2020*). Šajā pētījumā tas atspoguļo sistēmas ekonomisko aspektu un ietver vairākus ekonomiskos rādītājus vienā. *LCOE* ņemts no literatūras, kur tas ir aprēķināts, izmantojot 2.1. vienādojumu (*Budak and Devrim, 2019*).

$$LCOE = \frac{IC \cdot \frac{(1+p)^n \cdot p}{(1+p)^n - 1} + OM}{EO}, \quad (2.1)$$

kur *IC* – uzstādīšanas izmaksas, EUR;

OM – ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas, EUR;

EO – kopējais saražotais enerģijas daudzums gadā, kW/gads;

p – diskonta likme,

n – sistēmas kalpošanas laiks, gadi.

Tika izvēlēti divi tehniskie parametri – elektriskā efektivitāte un pilnas slodzes darba stundas. Sistēmas elektriskā efektivitāte norāda, kura sistēma ir efektīvāka, ražojot nepieciešamo elektroenerģiju. Darba laiks norāda uz sistēmas uzticamību – cik tā apmierinās pieprasījumu un vai būs nepieciešama rezerves jauda.

Salīdzinot atjaunojamās enerģijas sistēmas, ir būtiski iekļaut vides indikatorus, jo to dzīves cikla laikā ir atšķirīga ietekme uz vidi. No visiem dzīves cikla analizē (*Life Cycle Analysis, LCA*) analizētajiem parametriem globālās sasilšanas potenciāls (*GWP*) tika izvēlēts *MCDA*, jo tas ir viens no kritiskajiem rādītājiem un politikas virzītājspēkiem siltumnīcefekta gāzu neto emisiju samazināšanai ES (*Stropnik et al., 2022*). Otrais rādītājs, tehniskais kalpošanas laiks, atspoguļo, cik ilgs laiks nepieciešams, līdz tehnoloģija vairs nav noderīga. Ja tehnoloģijai ir īsāks kalpošanas laiks, jaunas tehnoloģijas būs jāražo biežāk un esošās kļūs par atkritumiem. Turklāt, ja tiek apsvērtas mājsaimniecības ērtības, īpašniekam būs jāpieliek lielākas pūles, lai uzturētu sistēmu.

Daudzkritēriju lēmumu analīze

MCDA ir metode dažādu alternatīvu salīdzināšanai, pamatojoties uz atbilstošiem kritērijiem. Ir vairākas *MCDA* metodes, kurām ir savi ierobežojumi un kuras sniedz dažādus rezultātus (*Zlaugotne et al., 2020*). Šim pētījumam izvēlēta metode bija pasūtījuma izvēles līdzības ar ideālo risinājumu paņēmieni (*Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution, TOPSIS*). Izmantojot šo metodi, galarezultāts ir alternatīvas tuvums ideālajam risinājumam. Tas nozīmē, ka jo tuvāk rezultāts ir "1", jo tuvāk šī alternatīva ir ideālajam risinājumam. Aprēķinu soļi tika ņemti no *Zlaugotne et al.* pētījuma (*Zlaugotne et al., 2020*). Tika pieņemts, ka visiem kritērijiem ir vienāda nozīme, tāpēc tika piemērots vienāds svars. Visiem aprēķiniem izmantota *MS Excel*.

TOPSIS metodei ir pieci aprēķina soļi (*Zlaugotne et al., 2020*). Sākotnēji lēmumu matrica ir jānormalizē. Tas tiek darīts saskaņā ar 2.2. vienādojumu:

$$R = \frac{X}{\sqrt{\sum X^2}}, \quad (2.2)$$

kur R ir normalizētā matricas vērtība un X ir kritērija vērtība.

$$V = w \cdot R, \quad (2.3)$$

kur V ir svērtā vērtība un w ir kritērija svars. Kā jau minēts, šajā pētījumā kritēriju svars ir vienāds, tāpat tas ir viens dalīts ar kritēriju skaitu, iegūstot svaru 0,20.

Nākamais solis ir ideālo un antiideālo vērtību noteikšana. Ja ideālā vērtība ir maksimālā vērtība, tad V^+ ir lielākā no svērtajām vērtībām un V^- ir mazākā vērtība. Ja kritērija nosacījumi ir apgriezti, ideālā vērtība ir minimālā vērtība, tad V^+ ir mazākā svērto vērtību vērtība un V^- ir lielākā vērtība.

Pēc tam aprēķināts tuvums ideālajai un antiideālajai vērtībai. To var izdarīt, izmantojot 2.4. un 2.5. vienādojumu.

$$d_a^+ = \sqrt{\sum (V^+ - V)^2}, \quad (2.4)$$

kur d_a^+ ir tuvums ideālajai vērtībai un V^+ ir ideālā vērtība.

$$d_a^- = \sqrt{\sum (V^- - V)^2}, \quad (2.5)$$

kur d_a^- ir tuvums antiideālajai vērtībai un V^- ir antiideālā vērtība.

Galarezultāts ir relatīvais tuvums ideālajam risinājumam. To aprēķina saskaņā ar 2.6. vienādojumu.

$$C_a = \frac{d_a^-}{d_a^+ - d_a^-}, \quad (2.6)$$

kur C_a ir relatīvais tuvums ideālajam risinājumam. Šo vērtību iegūst katrai alternatīvai, un to var izmantot, lai tās normalizētu.

Pēc *TOPSIS* aprēķiniem veikta papildu jutīguma analīze. Šo analīzi var veikt, lai pārbaudītu kritēriju ietekmi uz alternatīvām. Jutīguma analīzei ir trīs posmi. Aprēķinu soļi ņemti no E. Teirumnieka u. c. pētījuma (*Teirumnieka et al., 2023*).

Šajā metodē sākotnēji pieņemts, ka kritēriju svāri ir vienādi. Vienādus svarus aprēķina ar 2.7. vienādojumu.

$$w' = \frac{1}{n}, \quad (2.7)$$

kur w' ir kritēriju sākotnējais svārs un n ir kritēriju skaits.

Pēc tam viena kritērija svāru pielāgo atbilstoši vienības variācijas koeficientam. Šis mainīgais svārs ir tajā brīdī analizējamā kritērija svārs. Lai to aprēķinātu, izmantots 2.8. vienādojums.

$$w'_k = \beta_k \cdot w', \quad (2.8)$$

kur w'_k ir maināmā kritērija svārs un β_k ir vienota variācijas attiecība. Jutības analīze veikta, izmantojot piecus vienotus variācijas koeficientus (0,01; 0,5; 1,5; 2; 2,5).

Atlikušo kritēriju svārs ir vienāds, un to var aprēķināt saskaņā ar 2.9. vienādojumu.

$$w'_{km} = \frac{(1 - w'_k)}{(n - 1)}, \quad (2.9)$$

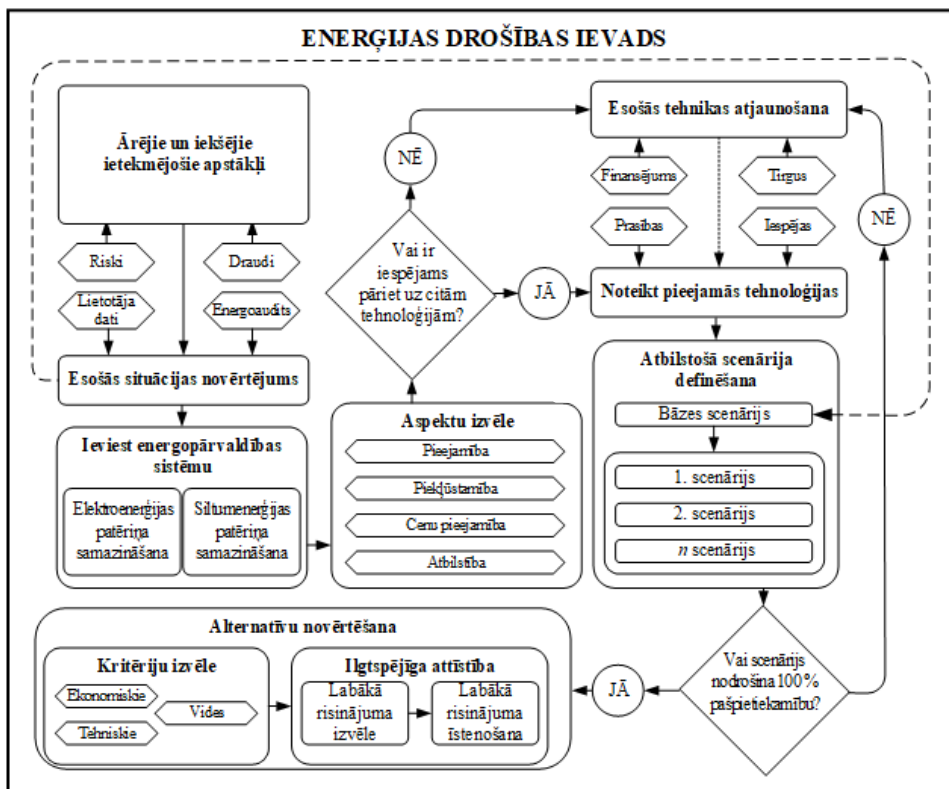
kur w'_{km} ir kritērija svārs, kas nav maināms.

Kad jutīguma analīzei nepieciešamie svāri ir aprēķināti, tos izmanto, lai aprēķinātu katra kritērija relatīvo tuvumu ideālajam risinājumam ar katru unitāro variācijas koeficientu. Šim nolūkam izmantoti *TOPSIS* aprēķina soļi.

2.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance

Energoapgādes drošības scenāriju izvērtējums

Kompleksā metodoloģija izstrādāta, lai novērtētu enerģētiskās drošības palielināšanas scenārijus. Metodoloģija ir universāla, un to var izmantot dažādu enerģijas lietotāju analīzei (sk. 2.5. att.). Pirmais solis ir novērtēt pašreizējo situāciju. Datu pieejamībai (lietotāju datiem vai energoauditam) ir liela nozīme, veidojot pareizo priekšstatu un tālāk izstrādājot atbilstošus attīstības scenārijus. Siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņa analīze sniedz atbildi par iespējamiem risinājumiem energodrošības paaugstināšanai. Pirms alternatīva scenārija izveides ar jebkuru pieejamo tehnoloģiju primāri ir jāizvērtē esošā siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņa samazināšanas iespējamība. Enerģijas patēriņa samazināšana ir svarīgs priekšnoteikums energoapgādes drošības palielināšanai. Kad ir noteikta nepieciešamā jauda, ir iespējams izvēlēties atbilstošāko elektroenerģiju ģenerējošo iekārtu atkarībā no darbības laika un citiem tehniskajiem parametriem. Ja pastāv piemērotākas tehnoloģijas, var izstrādāt vairāk scenāriju. Ja, izvērtējot esošo situāciju, tiks konstatēts, ka alternatīvais scenārijs nav nepieciešams vai pāreja uz jaunām tehnoloģijām nav iespējama, tad piedāvātais risinājums var saturēt ieteikumus esošās tehnoloģijas uzlabošanai.



2.5. att. Energoapgādes drošības novērtēšanas shēma.

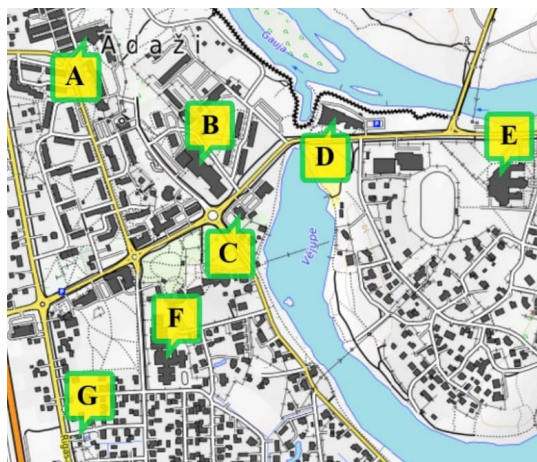
Visi definētie scenāriji salīdzināti savā starpā, kā arī ar bāzes scenāriju, kas raksturo pašreizējo situāciju. Lietotājs var izvēlēties kritērijus, pēc kuriem tiks salīdzināti analizētie scenāriji. Kritēriju skaitu un robežvērtības ir iespējams definēt individuāli katram lietotājam. Obligāts kritērijs ir iespēja ar izvēlēto scenāriju un tehnoloģisko risinājumu nodrošināt 100 % pašpietiekamību. Ja šis kritērijs ir izpildīts, var sekot turpmāka scenārija analīze, izmantojot citus kritērijus. Kritēriji var būt no dažādām dimensijām – tehnoloģiskie (izlaides jauda, enerģijas patēriņš u. c.), ekonomiskie (enerģijas ražošanas izmaksas, nepieciešamais investīciju apjoms, atmaksāšanās laiks utt.), vides (CO₂ emisijas, gaisu piesārņojošās emisijas, radītie atkritumi) utt.). Kritērijiem var būt vienāds svars, bet atšķirīga nozīme vai ietekme.

Gadījuma izpēte: vispārīgs esošās situācijas apraksts

Ādažu pilsēta ir Ādažu novada administratīvais centrs. Pētījumā ņemtas vērā tikai vietējās pašvaldības ēkas. Pilsētā vēsturiski dabasgāzi centralizētajai siltumapgādei izmanto tikai

mājsaimniecības. Mājsaimniecībās un pašvaldības ēkās karsto ūdeni sagatavo individuāli ar elektriskajiem un dabasgāzes (dažkārt – dīzeļa) boileriem.

Pētījumā iekļautās ēkas iezīmētas 2.6. attēlā. Savukārt 2.3. tabulā ir parādīti to galvenie parametri. Tabulā ir pieejama informācija par elektroenerģijas (E) patēriņu (ieskaitot īpatnējo E patēriņu gadā), siltumenerģijas (Q) patēriņu (ieskaitot īpatnējo gada Q patēriņu), renovācijas stāvokli un pieejamo jumta platību.



2.6. att. Pētījumā iekļauto Ādažu pašvaldības ēku atrašanās vieta.

2.3. tabula

Izvēlēto pašvaldības ēku tehniskie parametri

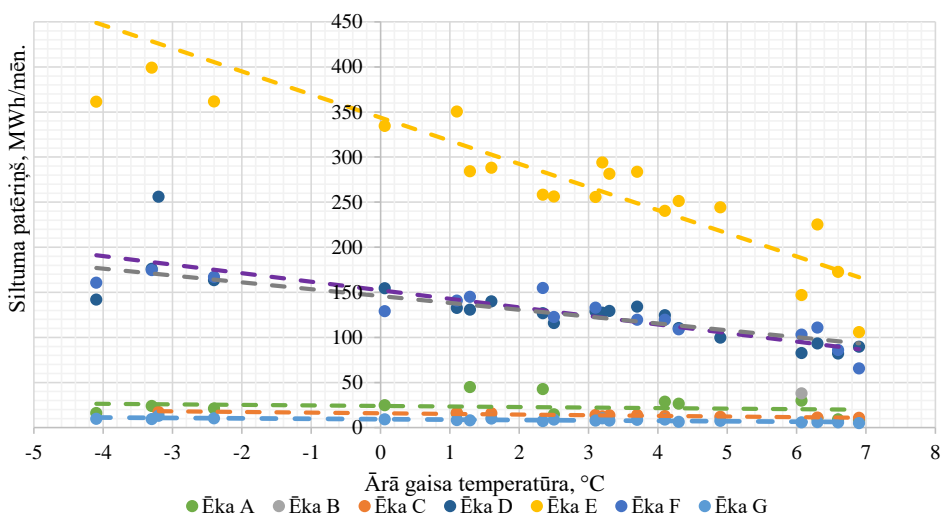
| Pašvaldības ēka | Apz. | Apkures zona, m ² | E (vidējais), MWh/mēn. | Q (vidējais), MWh/mēn. | Īp. gada E , kWh/m ² | Īp. gada Q , kWh/m ² | Renov. stāvoklis | Pieejamā jumta platība, m ² |
|---------------------|------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------|--|
| Biroju ēka | A | 333 | 3,8 | 15,6 * 1,1 ** | 131 | 328 | Daļēji renovēts | 423 |
| Pamatskola | B | 8724 | 17,0 | 54,1 * 1,5 ** | 23 | 51 | Jauns | 472 |
| Padomes ēka | C | 729 | 1,9 | 12,8 * 2,3 ** | 32 | 163 | Daļēji renovēts | 81 |
| Kultūras centrs | D | 6285 | 19,3 | 113,0 * 12,8 ** | 37 | 164 | Jauns | 910 |
| Vidusskola | E | 16 186 | 38,0 | 267,2 * 44,4 ** | 28 | 140 | Daļēji renovēts | 1761 |
| Bērnudārzs | F | 4138 | 8,6 | 109,6 * 21,6 ** | 25 | 238 | Renovēts | 480 |
| Policijas iecirknis | G | 194 | 1,1 | 7,8 * 1,4 ** | 66 | 323 | Daļēji renovēts | 57 |

* Apkures sezona, ** ārpus apkures sezonas

Ņemot vērā centralizētās siltumapgādes ierobežoto pieejamību pilsētā, pašvaldības ēkas vēsturiski nebija pieslēgtas siltumtīklam. Ir divi galvenie problēmu veidi: attālums un siltuma slodze. Izpētot esošo situāciju, tiek konstatēts, ka ēkām, kas atrodas salīdzinoši tuvu siltumtīkliem, ir salīdzinoši liela siltuma slodze, ko nevar nodrošināt ar esošajām caurulēm, jo iekšējais diametrs nav pietiekami liels. Savukārt ēkas, kas atrodas salīdzinoši tālu no siltumtīkla, nevar pieslēgt, jo jaunā cauruļvada izbūve ir dārgs scenārijs, ņemot vērā, ka teorētiskie aprēķinātie zudumi jaunajā cauruļvadā būtu pārāk lieli, kas rada ilgāku atmaksāšanās laiku.

Siltumenerģijas (Q) patēriņš

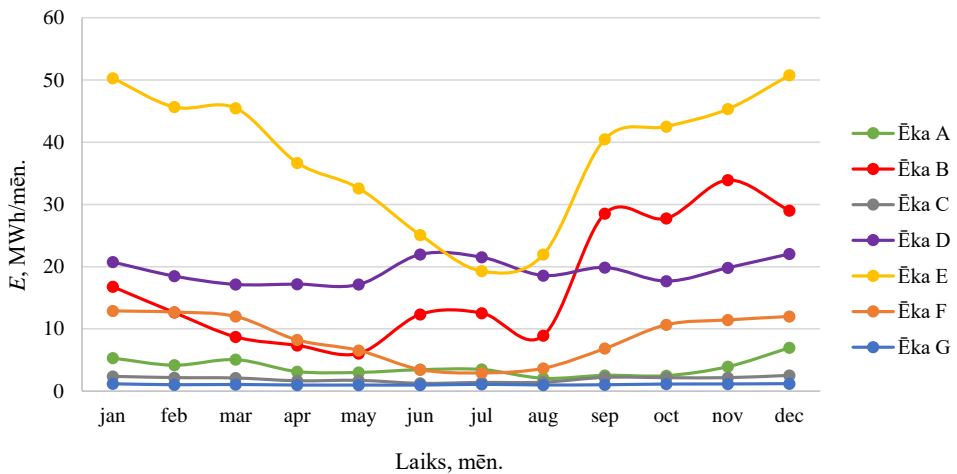
Izvēlēto ēku Q patēriņš galvenokārt ir atkarīgs no āra gaisa temperatūras (2.7. att.). Korelācija starp Q patēriņu un āra gaisa temperatūru iegūta, pamatojoties uz pieejamajiem vēsturiskajiem datiem. Kopumā salīdzinoši laba korelācija novērojama visām ēkām ar vidējo determinācijas koeficientu R^2 0,71. Tomēr gandrīz visām ēkām ir atsevišķi gadījumi, kad Q patēriņš ir lielāks par noteikto korelācijas līkni. Tipisks šādas izkliedes iemesls ir nepareizi noregulēta apkures sistēma, kas nenodrošina pareizu piegādātā Q daudzumu. Rezultātā ēka saņem lieko Q , paaugstina iekštelpu temperatūru un siltuma zudumus, kā arī nepareizi izmanto energoresursus.



2.7. att. Izvēlēto pašvaldības ēku siltumenerģijas patēriņa un āra gaisa temperatūras korelācija apkures sezonā.

Elektrības (E) patēriņš

Izvēlēto ēku E patēriņš ir ievērojami mazāks par siltumenerģijas pieprasījumu, taču tā nozīme ir vienlīdz svarīga kopējās energoapgādes kontekstā. Ēku E patēriņa profils būtiski atšķiras, galvenokārt dažādu ēku (skolas (izglītības), biroju ēkas (komerciālās) u. c.) vajadzības un īpatnības (skat. 2.8. att.). Dažās ēkās (E un F) ziemas mēnešos ir bijis ievērojams E patēriņa pieaugums. Savukārt D ēkā ir E patēriņa maksimums vasarā. Ir arī ēkas, kuru patēriņš atšķiras no pārējo ēku patēriņa tendences, piemēram, ēkā B ir E patēriņa maksimums no septembra līdz decembrim. C un G ēkām ir minimālas E patēriņa svārstības, kas ir labs priekšnoteikums pārejai uz efektīvu energosistēmu.



2.8. att. Izvēlēto pašvaldības ēku ikgadējais elektroenerģijas patēriņš.

Attīstības scenāriji

Balstoties uz Ādažu pilsētā esošās situācijas analīzi un literatūrā atrodamiem tehnoloģiskajiem piemēriem, tika izstrādāti dažādi scenāriji enerģētiskās drošības uzlabošanai Ādažu pilsētā. Kopā tika analizēti četri scenāriji ar dažādām izvēlētajām tehnoloģijām, kā arī scenārijs ar samazinātu Q un E slodzi. Katrs scenārijs paredz 100 % Q un E patēriņa pašpietiekamību pašvaldību ēkās.

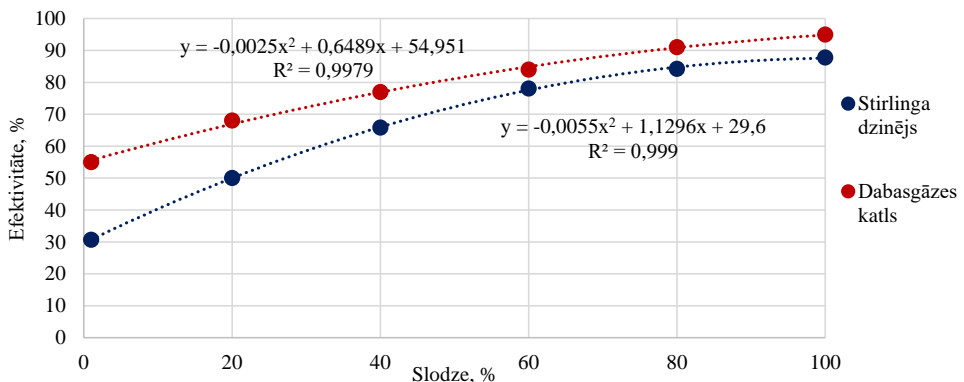
Pamata scenārijs (BS)

Pašreizējā situācija pētījuma ietvaros ir bāzes scenārijs, salīdzinot ar alternatīvu attīstības scenārijiem. Bāzes scenārijs ietver 100 % dabasgāzes izmantošanu visās ēkās Q ražošanai un E iepirkšanu no tīkla.

Biomasa + Stirlinga dzinējs (SE) (S1)

Pirmais alternatīvais scenārijs ir balstīts uz biomasas izmantošanu Q un E ražošanā. Biomasa Latvijā ir plaši pieejams enerģijas avots, jo vairāk nekā pusi valsts teritorijas klāj meži. Ir pieejamas daudzas tehnoloģijas, kuru pamatā ir biomasas izmantošana. Katls ar SE tika izvēlēts kā biomasas tehnoloģija, ņemot vērā izvēlēta gadījuma izpētes īpatnības, kad ir jāsarāžo gan Q , gan E , salīdzinoši nelielās jaudas.

Viens no galvenajiem SE kritērijiem ir attiecība starp saražotā Q un E daudzumu. Šī attiecība var ievērojami atšķirties atkarībā no konstruktīvā risinājuma, tā var svārstīties no 1,7 līdz 8,8 (Teixeira, 2020). Tāpat kā citām uz biomasu balstītām tehnoloģijām, SE efektivitāte ir atkarīga no slodzes. Maksimālā efektivitāte tiek sasniegta pie nominālās slodzes (100 %) un ir vienāda ar 87,7 %. Efektivitātes slodze ievērojami samazinās, sasniedzot 50,5 % pie $\frac{1}{4}$ no nominālās slodzes. Šāda tendence mēdz būt arī dabasgāzes katliem, taču efektivitāte sarūk mazāk (skat. 2.9. att.) (Teixeira, 2020), (Zhang et al., 2020). Šis aspekts parāda, ka, lai panāktu racionālu degvielas patēriņu, ir svarīgi nodrošināt, lai patērētājs veidotu pēc iespējas vienmērīgāku pieprasījumu bez lēcienveida izmaiņām brīžos, kad energotehnoloģijas ražošana ir zema. Aprēķinos ņemta vērā gan SE , gan dabasgāzes katla mainīgā efektivitāte atkarībā no slodzes. Izmantoti iegūtie regresijas vienādojumi, kas parādīti 2.9. attēlā. Iegūtie rezultāti ir daudz ticamāki, salīdzinot ar citos pētījumos sniegtajiem datiem.



2.9. att. Energotehnoloģiju efektivitātes atkarība no slodzes.

Saules PV + siltumsūkņi (HP) (S2)

Otrais scenārijs ir balstīts uz saules enerģijas izmantošanu enerģijas ražošanai. Saules PV tehnoloģijas izvēlētas E ražošanai un ēkas patēriņa segšanai. Ņemot vērā Latvijas klimata īpatnības un būtisko saules starojuma intensitātes atšķirību vasaras un ziemas mēnešos, arī saražotās E daudzums dažādos mēnešos būtiski atšķiras. Iespējamais saražotās E daudzums ievērojami pārsniedz ēku pašpatēriņu vairākos mēnešos. Tāpēc scenārijā kā papildu tehnoloģija katrai ēkai

izmantota *HP*, lai *E* pārpalikumu pārvērstu par *Q*. *PV* paneļu uzstādīšanai uz ēkas jumta ir svarīgi divi faktori: uz dienvidiem vērsts jumts un pieejamais jumta laukums. Pētījumā ir noteikts pieejamais jumta laukums (skat. 2.1. tab.), ņemot vērā jumta leņķi, kas tika izmantots turpmākajiem aprēķiniem. Tika noteikta iespējamā teritorija un robežas, kas var tik izmantotas ūdens *HP* izbūvei kā arī platība kas būtu nepieciešama, lai izbūvētu *HP* sistēmu atbilstoši ēkas lielumam un tehniskajam stāvoklim. Ņemot vērā ierobežojumus, ēkas tehnisko stāvokli un apkurināmo platību, gaisa *HP* tehnoloģija ir vispiemērotākā visos scenārijos.

Uzstādot maksimālo saules *PV* daudzumu, ņemot vērā ēku jumtu platību, dažos vasaras mēnešos rodas elektroenerģijas pārpalikums pat pēc noteikta elektroenerģijas daudzuma izlietošanas *HP* vajadzībām siltumenerģijas ražošanai. Tas jo īpaši attiecas uz ēkām, kurām vasaras mēnešos ir zems *Q* patēriņš. Līdz ar to veidojas saražotās *E* pārpalikums. Pētījuma ietvaros tiek uzskatīts, ka *E* pārpalikums tiek nodots kopējā tīklā un no pārdotās *E* tiek saņemti naudas ienākumi. Lai segtu atlikušo pieprasījumu pēc *Q* un *E*, izvēlēts piemērotas jaudas *SE*.

Saules kolektori + TES (S3)

Trešais scenārijs ir balstīts uz saules kolektoru izmantošanu ar *TES* siltuma pieprasījuma segšanai. Turklāt *Q* un *E* ražo *SE*. Nepieciešamā saules kolektoru platība aprēķināta tāda, lai segtu vidējo siltumenerģijas pieprasījumu vasarā. Nav pamatoti uzstādīt maksimālo kolektoru tilpumu, lai radītu ievērojamu *Q* pārpalikumu. Gadījumos, kad pēc nepieciešamā saules kolektoru montāžas jumta platība ir pieejama, tiek papildus aprēķināts iespējamaiss saules *PV* uzstādīšanas apjoms. Lai segtu atlikušo pieprasījumu pēc *Q* un *E*, izvēlēts piemērotas jaudas *SE*.

Pētījumā izmantotie parametri un vērtības

Scenāriju aprēķināšanai izvēlēti tehniski ekonomiskie mainīgie un atkarības. Mainīgie lielumi ir balstīti uz literatūras datiem, situāciju enerģijas tirgū un ekspertu pieņēmumiem. Mainīgās vērtības ir parādītas 2.4. tab.

2.4. tabula

Pētījumā iekļauto tehniski ekonomisko parametru pieņemtās vērtības

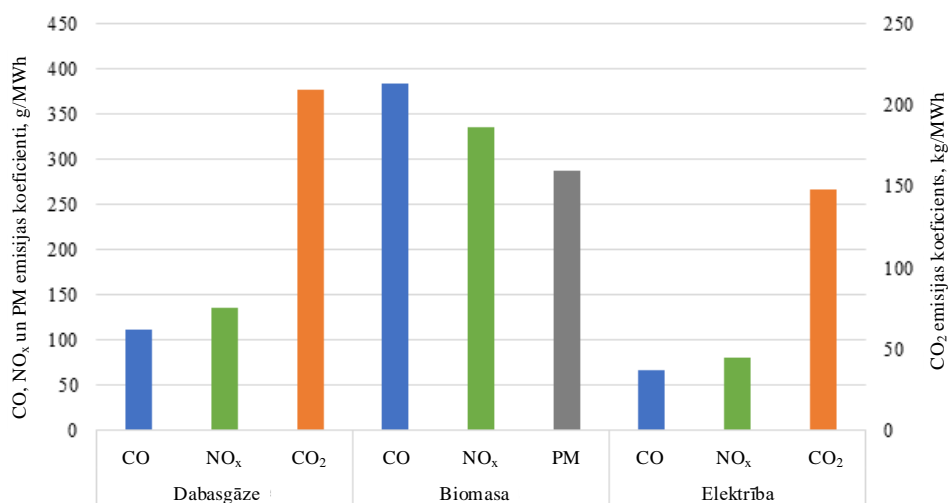
| Mainīgais | Vērtība | Mērvienība |
|--|-----------------------|--------------------|
| Stirlinga dzinēja īpatnējās izmaksas | 750 | EUR/kW |
| Saules <i>PV</i> īpatnējās izmaksas | $25\ 883 * x^{0.374}$ | EUR/kW |
| Siltumsūkņa īpatnējās izmaksas | 296 | EUR/kW |
| Saules kolektora īpatnējās izmaksas | 295 | EUR/m ² |
| Siltuma akumulācijas sistēmas īpatnējās izmaksas | 216 | EUR/m ³ |
| Saules <i>PV</i> efektivitāte | 21,1 | % |
| Saules <i>PV</i> zudumu koeficients | 95 | % |
| Saules kolektora efektivitāte | 77,5 | % |
| Saules kolektoru sistēmas zudumu koeficients | 90 | % |

2.4. tabulas turpinājums

| | | |
|---|------|---------|
| Dabagāzes īpašās izmaksas | 150 | EUR/MWh |
| Papildu izmaksas par enerģijas ražošanu no dabagāzes | 20,0 | % |
| Koksnes granulū īpatnējās izmaksas | 104 | EUR/MWh |
| Papildu izmaksas par enerģijas ražošanu no koksnes granulām | 40,0 | % |
| Elektrības tarifs | 350 | EUR/MWh |
| Īpatnējās elektroenerģijas izmaksas (pārdošana) | 280 | EUR/MWh |
| x – tehnoloģiju kapacitāte, kw | | |

Enerģijas ražošanas efektivitāte, izmantojot *SE* un dabagāzes katlu, ir mainīgo atkarība no energotehnoloģijas slodzes. Tā raksturota nodaļā “Siltumenerģijas (*Q*) patēriņš”. Ņemot vērā veikto priekšizpēti, autors papildus ieviesa divus faktoros, kas nosaka neparedzētās papildu izmaksas: dabagāzes tehnoloģijām tās veido 20 % un *SE* – 40 %.

Emisijas apjoms no biomasas un dabagāzes sadedzināšanas, kā arī elektroenerģijas ražošanas aprēķināts, pamatojoties uz emisijas koeficientiem. Emisijas faktori ir parādīti 2.10. attēlā, pamatojoties uz literatūras datiem (*Karanasiou et al.*, 2016), (*EPA*, 2018), (*Atabani et al.*, 2012).



2.10. att. Pētījumā iekļauto enerģijas avotu pieņemtie emisijas faktori.

Visi ieviestie mainīgie izmantoti, lai aprēķinātu četrus kritērijus: kopējās investīcijas, īpatnējās enerģijas izmaksas, atmaksāšanās periodu un emisiju apjomu. Kritēriji aprēķināti visiem aprakstītajiem scenārijiem katrai pašvaldības ēkai. Aprēķini saskaņā ar scenārijiem veikti diviem gadījumiem, kur faktiskā siltuma slodze ir vienāda ar 100 % no paredzamās slodzes un 80 % no paredzamās slodzes.

Izmantotie vienādojumi

Izmaksu rādītāju enerģijas ražošanas procesā sauc par īpatnējām enerģijas izmaksām. Bāzes scenārijam (BS) šis rādītājs aprēķināts, pamatojoties uz 2.2. tabulas datiem un izmantojot vienādojumu:

$$SEC_0 = \frac{TEC}{E+Q} = \frac{(E \cdot ET) + \left(\frac{Q}{\eta_G} \cdot SC_G\right)}{E+Q}, \quad (2.10)$$

kur SEC_0 – īpatnējās enerģijas izmaksas bāzes scenārijam (0. scenārijs), EUR/MWh;

TEC – kopējās enerģijas izmaksas, EUR;

E – elektroenerģijas patēriņš gadā, MWh;

Q – gada siltumenerģijas patēriņš, MWh;

ET – elektroenerģijas tarifs, EUR/MWh;

η_G – dabasgāzes katla lietderības koeficients, %;

SC_G – dabasgāzes īpatnējās izmaksas, EUR/MWh.

Alternatīviem scenārijiem (S1, S2, S3) šis rādītājs tika aprēķināts, izmantojot vienādojumu:

$$SEC = \frac{TEC}{E+Q} = \frac{(B_F \cdot SC_F - EP_{EX} \cdot SC_E)}{E+Q}, \quad (2.11)$$

kur SEC – alternatīvo scenāriju īpatnējās enerģijas izmaksas, EUR/MWh;

B_F – degvielas patēriņš enerģijas ekvivalencei, MWh;

SC_F – īpatnējās degvielas izmaksas, EUR/MWh;

EP_{EX} – saražotās elektroenerģijas pārpalikums, MWh;

SC_E – elektrības īpatnējās izmaksas (pārdošana), EUR/MWh.

Kopējās investīcijas ir investīciju apjoma rādītājs, kas nepieciešams, lai uzstādītu tehnoloģiju un nodrošinātu nepieciešamo jaudu (elektrisko vai siltuma). Atkarībā no sagaidāmo tehnoloģiju daudzuma rādītāju aprēķina, izmantojot vienādojumu:

$$TI = \sum(C \cdot SC_T), \quad (2.12)$$

kur TI – kopējās investīcijas, EUR;

C – nepieciešamā jauda, kW;

SC_T – tehnoloģiju īpašās izmaksas, EUR/kW.

Atmaksāšanās periods ir laika rādītājs, kas nepieciešams, lai projekts saglabātu peļņu. Pamatojoties uz vērtībām, kas aprēķinātas ar 2.10., 2.11. un 2.12. vienādojumu, rādītāju aprēķina, izmantojot vienādojumu:

$$PP = \frac{TI}{SEC_0 - SEC}, \quad (2.13)$$

kur PP – atmaksāšanās periods, gadi.

Saražoto emisiju apjomam aprēķināta ietekme uz vidi katrā scenārijā. Q ražošanas radīto emisiju gadījumā aprēķins veikts, izmantojot 2.14. vienādojumu, un E ražošanas gadījumā – ar 2.15. vienādojumu.

$$M_{EM} = B_F \cdot \frac{EF}{1000}, \quad (2.14)$$

kur M_{EM} – gada emisiju daudzums, g (CO_2 – kg);

EF – emisijas faktors, g/MWh.

$$M_{EM} = E \cdot \frac{EF}{1000}, \quad (2.15)$$

2.4. Eksperimentālā izpēte

1. eksperiments: Stirlinga dzinēja darbības izpēte

Šobrīd modernu maza mēroga un mikromēroga biomasas bāzes mikrokoģenerācijas (*micro Combined Heat and Power, mCHP*) iekārtu piedāvājums ir ierobežots un nav pieejams brīvajā tirgū – tikai laboratorijas koncepcijas vai prototipa līmenī. Pieejamo *mCHP* tehnoloģiju pētījumā secināts, ka komerciāli pieejamas ir tikai gāzveida vai šķidrā fosilā kurināmā iekārtas.

Viena no tehnoloģijām, ko darbina ar cieto biomasu, ir Stirlinga dzinēja *mCHP* sistēma. Stirlinga dzinēji ir ārējās degšanas dzinēji, kas kopā ar elektrisko ģeneratoru un katlu veido slēgtu mikrokoģenerācijas sistēmu.

Stirlinga dzinēju mikrokoģenerācijas iekārtām ir vairākas priekšrocības:

- plaša kurināmā izvēle;
- augsta termodinamiskā efektivitāte;
- zems trokšņa līmenis;
- salīdzinoši ilgs apkopes intervāls (*Padinger et al., 2019*).

Stirlinga dzinējiem ir augstāka degvielas un enerģijas ražošanas attiecība, tāpēc šāda veida aprīkojums ir vairāk piemērots lielākiem mājokļiem ar lielāku siltuma slodzi, lai vienlaikus apmierinātu siltuma un elektroenerģijas pieprasījumu.

Stirlinga dzinēja darbības principi

Pats Stirlinga dzinējs ir zināms kopš 1816. gada, taču *mCHP* tehnoloģija joprojām ir izstrādes stadijā. Atšķirībā no iekšdedzes dzinējiem tam ir raksturīga augsta efektivitāte, elastīgums kurināmā izvēlē, zems izmešu daudzums un laba veiktspēja daļējā slodzē.

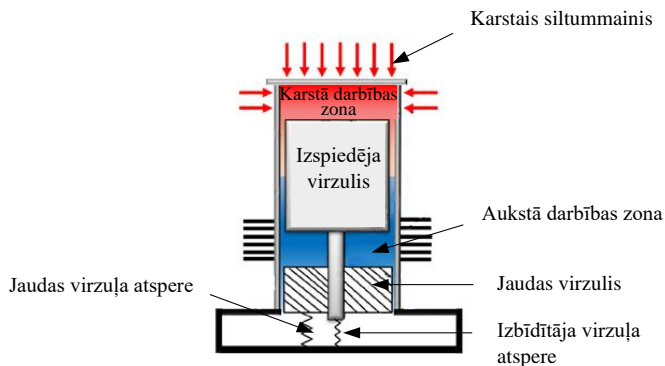
Siltumenerģijas piegāde no ārējiem avotiem ļauj izmantot plašu kurināmā klāstu, piemēram, tādus atjaunojamus enerģijas avotus kā saules enerģija vai biomasa. Stirlinga dzinējiem ir zemas apkopju izmaksas, tie ir klusāki un darbojas vienmērīgāk nekā iekšdedzes dzinēji (*Sheykhi et al.*, 2019).

Brīvā virzuļa Stirlinga dzinējs (*FPSE*) ir Stirlinga dzinēja variants, kurā darba un kompensējošais jaudas virzulis nav savstarpēji saistīti ar kloķa mehānismu. Elastīgās atsperes, kas piestiprinātas pie attiecīgā pārvietotāja un spēka virzuļa, cikliski uzglabā un atbrīvo mehānisko enerģiju, līdzīgi kā kinemātiskā Stirlinga dzinēja sparatā saglabājas kinētiskā enerģija. Jaudu nodrošina spiediena izmaiņas, kas rodas gāzveida darba vielas cikliskas sildīšanas un dzesēšanas rezultātā (*Abuelyamen and Ben-Mansour*, 2018). Stirlinga dzinēja shēma parādīta 2.11. attēlā.

Stirlinga dzinēja *mCHP* sistēma var būt galvenais enerģijas ražošanas avots mājāsaimniecībā kopā ar citām elektroenerģijas ģenerācijas ierīcēm, piemēram, saules paneļiem un saules baterijām. Ārējās siltumenerģijas piegādes iespēja ļauj pastāvīgi kontrolēt kurināmā enerģijas avotu.

Stirlinga dzinēji ir vienkāršas konstrukcijas, un, salīdzinot ar iekšdedzes dzinējiem, tiem nav nepieciešama cilindru eļļošana, aizdedzes sistēma un ieplūdes un izplūdes vārstu sistēma. Iepriekš minētās īpašības ir ļoti svarīgas, ja dzinēji tiek izmantoti apkures sistēmās, kurām nepārtraukti jādarbojas visu apkures sezonu vai pat dažos gadījumos nepārtraukti visu gadu. Zemais vibrācijas un trokšņa līmenis ļauj šīs ierīces novietot dzīvojamās mājās vai pat dzīvojamās telpās. Iepriekš minētie raksturlielumi liecina, ka Stirlinga dzinēja *mCHP* var izmantot mājāsaimniecībās, īpaši lauku apvidos, kur nav iespējams pieslēgties CSA un uz vietas ir pieejams cietais biomasas kurināmais (malka).

Viena cilindra brīvā virzuļa dzinējs, kas atbilst iepriekš minētajām apkopes un darbības vienkāršības prasībām ir vispiemērotākais Stirlinga dzinēju veids lietošanai mājāsaimniecībā (skat. 2.11. att.) (*Smirnov et al.*, 2021).



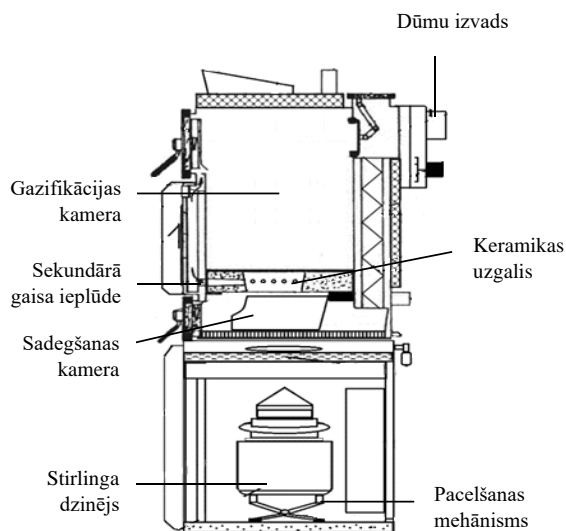
2.11. att. Brīvā virzuļa Stirlinga dzinēja shēma (Smirnov *et al.*, 2021).

Šādus dzinējus joprojām neražo rūpnieciskā mērogā, taču šo dzinēju konstrukcijas īpatnības ļauj tos integrēt ar elektroenerģijas ģeneratoru vienā korpusā. Viena korpusa dizains atvieglo integrāciju biomasas katlā, radot mājsaimniecības *mCHP* iekārtu.

Ekspimentālās daļas uzdevumi

Mājsaimniecību pašpatēriņa skalas Stirlinga dzinēja *mCHP* lietojuma novērtēšanai tika izstrādāta un uzstādīta eksperimentālā testa iekārta (skat. 2.12. att.). Tika izvirzīti šādi eksperimentālie uzdevumi:

- 1) novērtēt koģenerācijas režīma ietekmi uz biomasas katlu siltumiekārtas kopējo siltuma ražošanu;
- 2) noteikt apkures iekārtas kurināmā sadegšanas kvalitāti, mērot CO₂ un O₂ emisijas dūmgāzēs ekspluatācijas cikla sākumā, vidū un beigās;
- 3) noteikt Stirlinga dzinēja *mCHP* sistēmas produktivitātes izmaiņas atkarībā no malkas kvalitātes, mitruma līmeņa, katla krāsnī iekrautā kurināmā daudzuma un frakcijas;
- 4) noteikt gazifikācijas un sadegšanas kameras temperatūru pie sistēmas stabilas darbības koģenerācijas režīmā.



2.12. att. Eksperimentālās iekārtas ar pacelšanas mehānismu shematisks attēlojums.

2.5. tabula

Katla darba režīms un enerģijas ievade

| Eksp. Nr. | Katla režīms | Kurināmais | Ievadītā enerģija (kWh) |
|-----------|--------------|---|-------------------------|
| 1. | Apkure | Malka ar 20 % mitruma | 39,40 |
| 2. | Apkure | Malka ar 20 % mitruma | 55,16 |
| 3. | Apkure | Malka ar 20 % mitruma | 39,40 |
| 4. | CHP | Malka ar 20 % mitruma | 65,01 |
| 5. | CHP | Malka ar 25 % mitruma | 59,17 |
| 6. | CHP | Malka ar 16 % mitruma | 83,06 |
| 7. | CHP | Malka ar 17 % mitruma | 96,67 |
| 8. | CHP | Malka ar 12 % mitruma (50 %), zāģskaidas ar 8 % mitrumu (50 %) | 266,69 |
| 9. | CHP | Malka ar 10 % mitrumu | 118,07 |

Piezīme: Degvielas mitrums tika mērīts manuāli ar mitruma mērītāju eksperimentu laikā

Eksperimentā izveidota modeļa sistēma, kas satur tradicionālo malkas apkures katlu, kura nominālā siltuma jauda ir 31 kW (Maga s. r. o., 2021), ar augšējo gazifikācijas un sadegšanas kameru (2.13. att.) un *Microgen* brīvo Stirlinga dzinēju (*Microgen Engine Corporation*, 2018) ar integrētu elektroģeneratoru (2.14. att.). Sistēmas nominālā jauda – 1050 W.



2.13. att. Cietās biomasas gazifikācijas katls (Maga s. r. o., 2021).

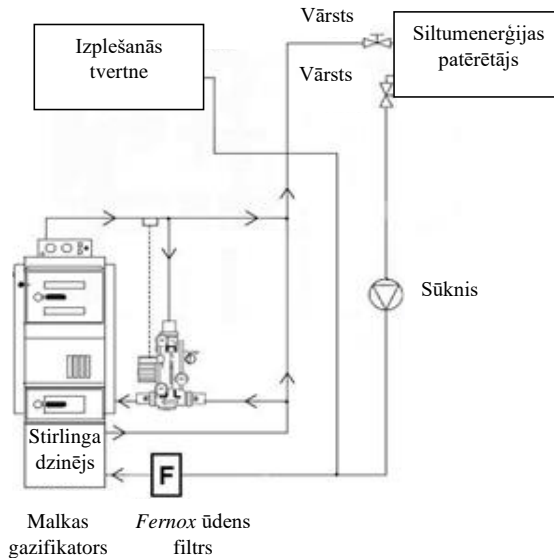


2.14. att. *Microgen* Stirlinga dzinējs ar integrētu elektrisko ģeneratoru (*Microgen Engine Corporation*, 2018).

Eksperimentu veikšanai agregātam izstrādāts dzinēja pacelšanas mehānisms (2.11. att.). Pacelšanas mehānisms nodrošina dzinēja galvas ievadīšanu sadegšanas kamerā, lai iekārta darbotos koģenerācijas režīmā arī nolaižot, ļaujot katlam darboties tikai siltuma ražošanas režīmā.

Lai veiktu eksperimentus, iekārtas tika uzstādītas pašvaldības CSA katlumājā. 2.15. attēlā redzamā CSA katlumāja izvēlēta, lai nodrošinātu pastāvīgu siltuma pieprasījumu. Šajā pētījumā

nav analizēta sistēmas darbība reālā Latvijas mājsaimniecībā un nav ņemta vērā mājsaimniecību patēriņa rādītāju ietekme uz sistēmas darbību.



2.15. att. Eksperimentālās *mCHP* iekārtas savienojuma ar siltumenerģijas patērētāju shēma.

Eksperimentiem izmantotais aprīkojums

Eksperimentiem izmantots šāds aprīkojums:

- dūmgāzu analizators *Testo 340*;
- datu iegūšanas programmatūra ar temperatūras sensoriem *Stirling Engine Data viewer*;
- infrasarkanā termokamera *InfrecAnalyzer LT*;
- siltuma skaitītājs *Sontex Supercal 739*;
- koksnes mitruma analizators *iCraft*.

2. eksperiments: Stirlinga dzinēja apvienošana ar saules paneli

Sistēmas komponenti

Izpētes sistēma sastāv no mikrokoģenerācijas iekārtas, kuras pamatā ir ārdedzes Stirlinga dzinējs, un cietās biomasas gazifikācijas katla, un saules fotosprieguma paneļiem (*PV*).

mCHP sistēma

Eksperimentiem izmantots cietās biomasas mikroģenerācijas iekārtas prototips. Prototipa izveidei izmantots "A" klases cietās biomasas apkures katls *Magasro 31 kW* (*Maga s. r. o.*, 2021). Šis katls izvēlēts, ņemot vērā jaunākās pieejamās tehnoloģijas sadzīves biomasas katlu jomā. Saskaņā ar Stirlinga dzinēja veiktspēju (*Microgen Engine Corporation*, 2018) katlam jāspēj uzsildīt dzinēja galvu vismaz līdz 550 °C, lai sasniegtu maksimālu Stirlinga dzinēja efektivitāti. Šo galvas temperatūru var nodrošināt, sadedzinot degkamerā koksnes gazifikācijas procesā iegūto gāzi (2.12. att.).

Saules PV sistēma

Pētījumam izveidota saules PV paneļu sistēma uz ēkas jumta 14° attiecībā pret horizontu ar novietojumu uz dienvidiem, uzstādītā paneļa kopējā jauda ir 1200 W (2.16. att.).



2.16. att. Eksperimentālā saules paneļu sistēma.

Stirlinga dzinēja *mCHP* iekārtu parametri ir parādīti 2.6. tabulā.

2.6. tabula

mCHP sistēmas apraksts

| <i>mCHP</i> sistēmas apraksts | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Dzinēja modelis | <i>Microgen 1.0 kW</i> |
| Dzinēja tips | ārējā degšana |
| Dzinēja ģeneratora elektriskā jauda | 1.0 kW |
| Dzesēšanas veids | šķidrums |
| Katla modelis | <i>Magasro 30</i> |
| Katla tips | cietās biomasas gazifikācija |
| Katla apkures jauda | 31 kW |

PV sistēmas apraksts

| PV sistēmas apraksts | |
|-------------------------|---|
| Paneļu daudzums | 4 |
| Paneļa elektriskā jauda | 300 W |
| Paneļa modelis | <i>Canadian Solar</i> |
| Invertors | Saules enerģijas pārveidotājs (<i>Bimble solar</i>) |

Mājsaimniecības slodzes un sistēmas apraksts

Sistēma darbojas nepārtraukti, ievērojot mājsaimniecībās tipiskus elektroenerģijas un siltumenerģijas patēriņa profilus. Iekārta spēj segt reālas termiskās un elektriskās slodzes atbilstoši esošajiem patēriņa profiliem. Sistēmas galveno darbības parametru dati apkopoti, sistēmai bez apstājas darbojoties 24 stundas (diennakti). Uzraudzītie mainīgie lielumi ietver meteoroloģiskos rādītājus (radiāciju, temperatūru, mitrumu utt.), elektroenerģijas ražošanu un patēriņu, ūdens temperatūru un plūsmas ātrumu visās ūdens ķēdēs un Stirlinga dzinēja sistēmas mainīgos. Lai novērtētu sistēmu, katras dienas galvenie rezultāti analizēti saskaņā ar aprakstīto metodiku.

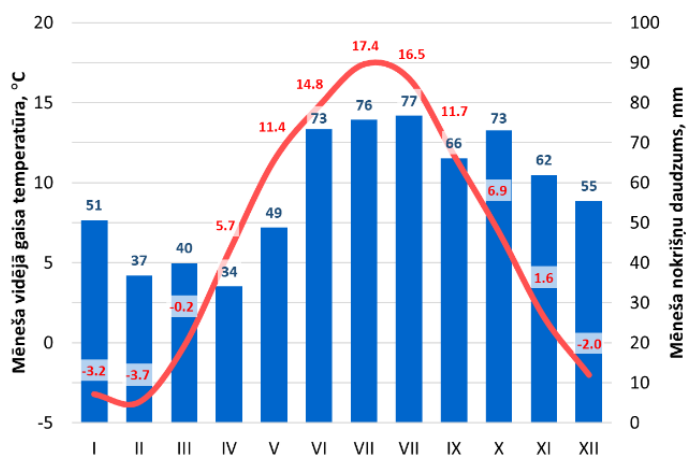
Mājsaimniecības termiskā slodze

Atbilstoši Latvijas būvnormatīviem dzīvojamo māju siltumenerģijas patēriņš pieļaujams līdz 90 kWh/m² gadā (Centrālās statistikas pārvalde, 2023). Pašreizējā situācija Baltijas valstīs siltumenerģijas patēriņa jomā ir ievērojami sliktāka. Latvijā un Lietuvā tas pārsniedz 200 kWh/m² gadā (Centrālās statistikas pārvalde, 2021). Lielākā daļa dzīvojamo ēku ir uzceltas pirms šobrīd spēkā esošo būvnormatīvu pieņemšanas, tāpēc, pamatojoties uz energoauditu datu pārskatiem (*Gokarakonda, Venjakob and Thomas, 2020*), var secināt, ka faktiski mājsaimniecību siltumenerģijas patēriņš pārsniedz pieļaujamo būvnormatīvu līmeni. Saskaņā ar šiem pārskatiem tas ir vidēji vismaz 150 kWh/m² gadā. Turpmākajiem aprēķiniem šie dati izmantoti kā mājsaimniecību kopējais siltuma patēriņš, kas ietver arī karstā ūdens sagatavošanai nepieciešamo enerģiju.

Pēc statistikas datiem, vidējais mājsaimniecības lielums Latvijas laukos, kur apkurei pārsvarā izmanto malku, ir 93,9 m² (*Microgen Engine Corporation, 2018*). Tiek ņemts vērā, ka šī vērtība ir mājsaimniecību vidējais lielums, un tajā iekļautas arī ēkas bez centralizētās siltumapgādes, kuru platība ir zem vidējā. Turpmākajiem aprēķiniem šajā pētījumā par minimālo apkures laukumu ir ņemti 200 m² atbilstoši katla ražotāja tehniskajā dokumentācijā norādītajam (*Microgen Engine Corporation, 2018*). Pēc iepriekš pieņemtajiem datiem par mājsaimniecības lielumu un vidējo siltumenerģijas patēriņu noteikts, ka mājsaimniecība, kuras apsildāmā platība ir 200 m², kalendārā gada laikā patērē 39 MWh siltumenerģijas.

Lai nodrošinātu nulles bilanci ar PV un *mCHP* tehnoloģiju palīdzību, tiek ņemtas vērā to sezonālās aktivitātes, jo koģenerācijas darbība ir tieši saistīta ar klimatiskajiem apstākļiem jeb apkures sezonu. 2.17. attēlā parādīts tipiskais siltumenerģijas pieprasījums kalendārā gada laikā.

Balstoties uz novērojumiem tiek pieņemts, ka apkures sezona Latvijā sākas, kad diennakts vidējā gaisa temperatūra trīs dienas pēc kārtas ir zemāka par +8 °C. Izvērtējot Latvijas Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas centra datus (LVĢMC, 2021), namu apsaimniekotāji un iedzīvotāji ierasti apkures sezonu Latvijā sāk septembra otrajā pusē un beidz aprīļa beigās. Vērā ņemams arī nokrišņu daudzums, kas palielina siltuma zudumus.



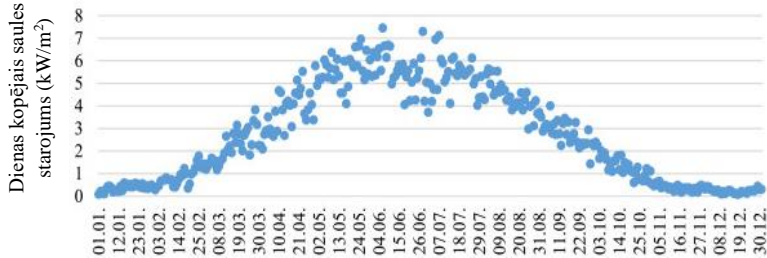
2.17. att. Vidējā temperatūra un nokrišņu daudzums mēnesī (LVĢMC, 2021).

Mājsaimniecības elektriskās slodzes

Mājsaimniecības atšķiras gan platības, gan gada elektroenerģijas patēriņa ziņā (Ministru kabinets, 1994). Pētījumā (Centrālās statistikas pārvalde, 2021) konstatēts, ka vidēji mājsaimniecība Latvijā mēnesī patērē 293 kWh elektroenerģijas. Tas atbilst Latvijas Statistikas biroja datiem (Centrālās statistikas pārvalde, 2021), lielākajai daļai 36,3 %, mājsaimniecību gada elektroenerģijas patēriņš ir virs 2000 kWh gadā. Tas nozīmē, ka Latvijas mājsaimniecību elektroenerģijas patēriņš mēnesī ir 293 kWh.

Saules PV paneļu produktivitāte

Saules PV panelu efektivitāte ir tieši saistīta ar saules starojuma daudzumu, kurš nonāk uz zemes. Saules starojuma intensitāte Latvijā redzama 2.18. attēlā.

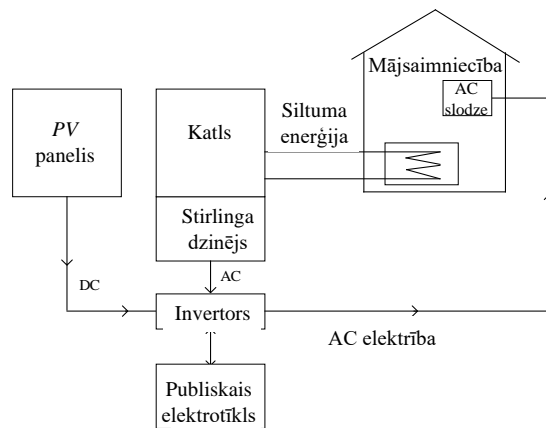


2.18. att. Saules starojums Latvijā (LVGMC, 2021).

No saules PV paneļiem iegūtais elektroenerģijas daudzums, kas aprēķināts no uzstādīto paneļu laukuma, ir atkarīgs gan no to efektivitātes, gan uzstādīšanas īpatnībām. Pētījumi (*Rozentale, Lauka and Blumberga, 2018*), (*Pakere and Blumberga, 2020*), (*Simola et al., 2018*) parāda, ka optimālos uzstādīšanas apstākļos 1 kW PV saules paneļu sistēma saražo aptuveni 800 kWh elektroenerģijas gadā.

Sistēmas savienojums

Pētījums veikts sistēmā, kas pieslēgta ārējam publiskajam elektrotīklam (2.19. attēls).



2.19. att. Sistēmas savienojuma shēma.

Sistēmu vada vadības bloks ar strāvas invertoru, kas regulē elektroenerģijas plūsmu, to nododot vai saņemot no tīkla.

Siltumenerģija tiek ražota tikai pašu patēriņam, un tā netiek nodota ārējiem tīkliem.

2.5. Aprites cikla analīze

Metodes definīcija

Šajā pētījumā izmantota *LCA* metodoloģija saskaņā ar vienoto standartu ISO 14040:2006 (ISO, 2006), lai salīdzinātu dažādu vieniģimenes dzīvojamo ēku energoapgādes scenāriju ietekmi uz vidi. Saskaņā ar ISO 14040 standartu ir četri galvenie *LCA* pētījuma posmi:

1. mērķu un darbības jomas definīcija;
2. dzīves cikla uzskaitē (*LCI*);
3. aprites cikla ietekmes novērtējums (*LCIA*);
4. aprites cikla interpretācija.

LCA metodoloģija tiek pastāvīgi atjaunināta, bet vienotais standarts *LCA* pētījumu veikšanai paliek nemainīgs un ir deklarēts ISO 14040. Šis standarts nodrošina vispārīgos *LCA* principus un ietvaru. Ietvars integrē vides apsvērumus visu produktu dzīves ciklu kvantitatīvā izteiksmē, sākot no izejvielu ieguves un pārstrādes, turpinot ar produkta izgatavošanu, izplatīšanu un izmantošanu un beidzot ar produkta pārstrādi vai iznīcināšanu.

Šajā darbā ietvertas četras galvenās fāzes, kas izklāstītas šajā pētījuma sadaļā “Aprites cikla analīze”. *LCA* fāze, kas veltīta mērķim un tvērumam, apraksta pētījuma objektu, funkcionālās vienības un sistēmas robežas. Novērtēšanā izmantotie dati ir aprakstīti dzīves cikla inventarizācijas sadaļā. Vērtēšanas kritēriju apraksti sniegti ietekmes novērtējumā. Iegūto rezultātu interpretācija sniegta rezultātu nodaļā, kam seko secinājumi.

Mērķa un darbības jomas definīcija

Nesen radušās vieniģimenes dzīvojamo māju decentralizētās energoapgādes iespējas un to popularitāte rosina nepieciešamību dažādos veidos novērtēt un salīdzināt esošos tehnoloģiskos risinājumus, tostarp to ekoloģiskos raksturlielumus. Pētījuma mērķis ir noskaidrot, kurš Latvijas gadījumā ir optimālais energoapgādes risinājums vietējā līmenī, ņemot vērā daudzus kritērijus un tehnoloģijas dzīves ciklu vides slodzes raksturošanai.

Par pētījuma objektu izvēlēta vieniģimenes dzīvojamā māja Latvijā. Mājas dzīvojamā platība ir 200 kvadrātmetri. Tā uzskatāma par tipisku māju, kuras siltuma gada patēriņš ir aptuveni 39 MWh_{th} un elektroenerģijas patēriņš 3516 kWh_{el}, pamatojoties uz (Kramens *et al.*, 2021). Laikapstākļus Latvijā raksturo gada vidējā gaisa temperatūra +5,9 °C, siltākais mēnesis ir jūlijs (vidējā temperatūra 17,0 °C, un aukstākais mēnesis ir februāris (vidējā temperatūra – 7,9 °C). Saulainās dienas, kad debesis ir skaidras, veido pusi no gada kopējām stundām – 1790 stundas gadā (LVGMC | *Climate of Latvia*, 2010).

Salīdzinošā LCA veikta vienģimenes dzģvojamai mģjai Latvijģ šģdiem scenģrijiem:

- 1. scenģrijs: siltumapgģde no katla un elektroenerģijas padeve no tģkla;
- 2. scenģrijs: siltumapgģde no katla un elektroenerģijas padeve no PV paneļiem;
- 3. scenģrijs: siltuma un elektroenerģijas piegģde no *mCHP*.

Attiecģgi 1. scenģrijs tiek uzskatģts par lģdzģinģjģs pieejas (“*business as usual*”) scenģriju, kurģ siltumu piegģdģ ar maza apģoma katlu ģkģ un elektroenerģiju piegģdģ no publiskģ tģkla, lai apmierinģtu mģjas enerģģjas pieprasģjumu. 2. un 3. scenģrijs ietver ģkģ uzstģdģtas alternģtģvas energoapgģdes tehnoloģģjas.

Šģ pģtģjuma mģrķģis ir noskaidrot, kuram no definģtajiem scenģrijiem ir vismazģkģ ietekme uz vģdi, kas saistģta ar izvģlģtajģm tehnoloģģjģm no to šģpuļa lģdz izmantoģšanai enerģģjas raģoģnģ, ieskaitot izejģvielu ieguvei, transportģģšanu, pģrģstrģdi, raģoģšanu un kurinģmģ patģriņu no salģdzģinģtajģm scenģrijiem. Aprģtes beģgu posms, kas attiecas uz tehnoloģģju iznģcinģģšanu, šģjģ pģtģjumģ nav iekļauts.

Funkcionģlģs vienģbas definģcija

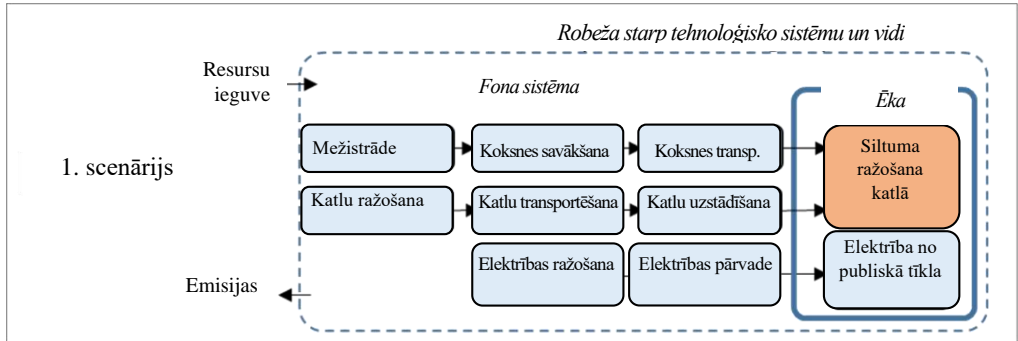
Funkcionģlģ vienģba (*Functional Unit, FU*) LCA ir produkta veiktģs funkcģjas kvantģtģtģvs apraksts un kalpo par atsauci visiem aprģķģiniem attiecģbģ uz produkta ietekmes novģrtģjumu visos dzģves ciklos. Šģjģ pģtģjumģ atsaucģ uz siltuma un elektroenerģģjas patģriņu ir iekļauta *FU* definģcijģ. Turklģt sezonalitģte ir bģtģisks faktors, kas ietekmģ enerģģjas patģriņu un lģdz ar to arģ pieprasģjumu pģc energoapgģdes. Tas noģzģmģ, ka tiek ņemts vģrģ enerģģjas patģriņģ vienas pilnas sezonas garumģ, un, lai apmierinģtu pieprasģjumu, noteiktajos energoapgģdes scenģrijos tiek izmantotas tehnoloģģjas ar atbilstoģu raģoģšanas jaudu. Tģdģjģdi *FU* šģjģ pģtģjumģ attiecas uz siltumenerģģju un elektroenerģģju, kas tiek piegģdģta vidģji vienai Latvijģs vienģimenes dzģvojamai ģkģai gadģ. *FU* ir 39 MWh_{th}, un enerģģjas piegģde ir 3516 kWh_{el}, kas atbilst vienģimenes dzģvojamģs mģjas, kuras platģba ir 200 kvadrģtmetri, pieprasģjumam Latvijģ.

Sistģmas robeģas

Sistģmas robeģas šģjģ pģtģjumģ ir noteiktas, iekļaujot priekģsplģna sistģmu (mģjsaimniecģbu) un fona sistģmu (infrastruktģru un procesus ārģpus mģjsaimniecģbas), ko izmanto enerģģjas piegģdei mģjģm. Enerģģjas patģriņģ ģkģ uzskatģts par priekģsplģna sistģmu. Fona sistģma ietver procesus, kas saistģti ar tehnoloģģju raģoģšanu, zemes izmantoģšanu, izejģvielģm (piemģram, koksni) un vispģrģjo infrastruktģru (rģpnģcas, ceļģ utt.). Elektroenerģģjas raģoģšana un transportģģšana publiskģjģ tģklģ ir iekļauta fona sistģmģ. Emģsģju un resursu ieguves ietekme uz vģdi tiek ņemta vģrģ uz robeģas starp tehnoloģģisko sistģmu un dabu visģm sistģmas robeģģs iekļautģjiem procesģm.

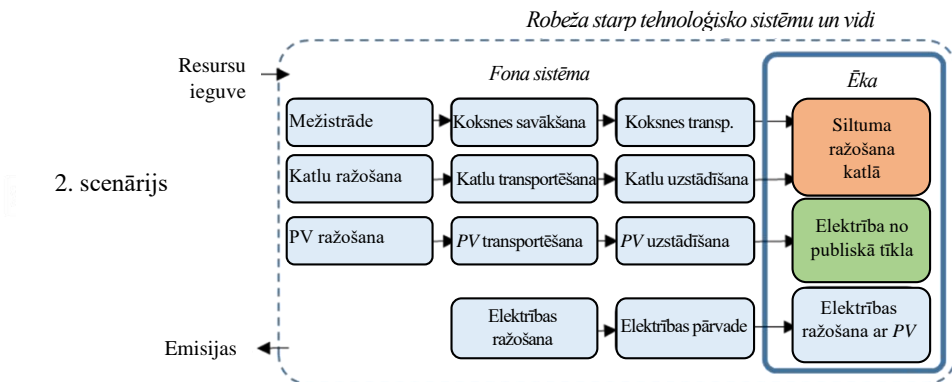
1. scenģrija sistģmas robeģas redzamas 2.20. attģlģ. Priekģsplģna sistģma ietver siltuma raģoģšanu 30 kW_{th} katlģ, un pģrģjie procesi notiek mģjas energoapgģdes fona sistģmģ. Koksnes ieguve,

mežizstrāde, transportēšana un elektroenerģijas piegāde no sabiedriskā tīkla ir tādā apjomā, kas ļauj segt mājas gada enerģijas pieprasījumu.



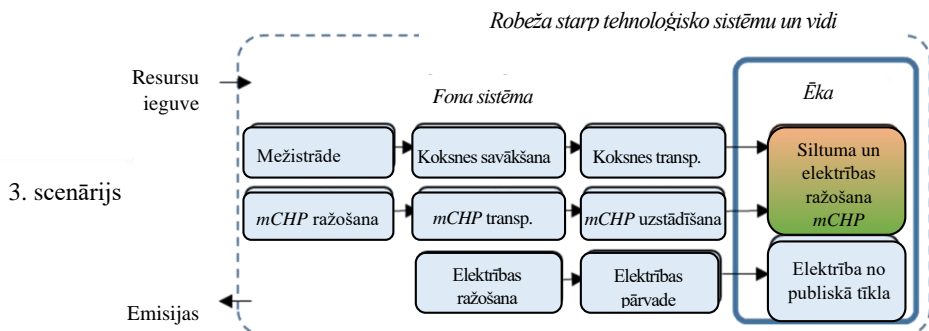
2.20. att. 1. scenārija sistēmas robežas.

2. scenārijā (2.21. att.) priekšplāna sistēmā ir iekļauts siltumapgādes katls, kas ir tāds pats kā 1. scenārijā. Papildus elektroenerģijas piegādei no publiskā tīkla ir iekļauta saules *PV* iekārta ēkā. Iekārtas izejas jauda ir 3 kW_{el}. Sezonnās, kad ar *PV* paneļu saražoto enerģiju nepietiek, lai apmierinātu ēkas elektroenerģijas pieprasījumu, elektroenerģijas pieprasījumu sedz publiskā tīkla elektroenerģija.



2.21. att. 2. scenārija sistēmas robežas.

3. scenārijā priekšplāna sistēmā (t. i., ēkā) ir iekļauts tas pats katls, kas citos scenārijos ar papildus uzstādītu 1 kW_{el} Stirlinga dzinēju katlā, tāpēc 3. scenārijā siltumu un elektroenerģiju kopīgi ražo ēkas *mCHP*. Tā kā ar 1 kW_{el} Stirlinga dzinēju saražotais enerģijas daudzums neļauj pilnībā apmierināt mājsaimniecības elektroenerģijas pieprasījumu, tiek apsvērta papildu elektroenerģija no publiskā tīkla. 3. scenārija sistēmas robežas ir parādītas 2.22. attēlā.



Šajās sistēmas robežās un definētās dzīves cikla ietekmes novērtējuma metodes ietvaros pētījumā aplūkota ietekme, kas saistīta ar visiem resursiem un emisijām, kuras uzskaitītas dzīves cikla *Ecoinvent* datu kopās. Ietekme, kas rodas remonta un tehnoloģiju maiņas laikā, pētījumā nav ņemta vērā. Tehnoloģiju transportēšana uz māju pirms uzstādīšanas aplūkota, balstoties uz *Ecoinvent* datubāzē pieejamajiem tirgus vidējiem datiem. Izvēlētajās sistēmas robežās nav iekļauti materiāli un procesi, kas saistīti ar enerģijas pārvadi mājā (caurules, elektrības vadi, radiatoru utt.), un procesi, kas nav iekļauti dzīves cikla inventarizācijas datos.

Dzīves cikla uzskaitē

Dzīves cikla uzskaitē ietver plūsmas no dabas un uz to, izejvielu un enerģijas patēriņu, emisijas gaisā, zemes piesārņojumu, ūdens piesārņojumu definētajiem vienības procesiem noteiktajās sistēmas robežās. Šāds process definētajiem scenārijiem izveidots ar datu kopu palīdzību no *Ecoinvent 3.8* datubāzes (*Ecoinvent, 2023*). *Ecoinvent* ir plaši pazīstama datubāze, kas izveidota pirms vairāk nekā 20 gadiem un tagad nodrošina labi dokumentētus procesu datus par tūkstošiem produktu. Iekšējā *LCA* eksperta veikta scenāriju salīdzināšana garantē visu *Ecoinvent* datubāzē esošo datu kvalitāti un uzticamību (*Pascual-González et al., 2016*).

Šajās datu kopās izmantotās kvantitatīvās vērtības ir balstītas uz aplēsēm, kas veiktas pētījumā (*Kramens et al., 2021*) vidējai viengimenes dzīvojamai ēkai Latvijā. *Ecoinvent* dati ir balstīti uz vispārīgajiem datiem, ko rada centralizētā energoapgādes sistēma valstī, kurā objekts atrodas. Tas nozīmē, ka radītais slogs videi tiek attiecināts proporcionāli konkrētiem procesiem pašā objektā. Dzīves cikla ietekmes novērtējuma modeļa izvēlētais ievades parametru vērtības tiek ņemtas vērā konkrētam gadījumam un pielāgotas valsts elektroenerģijas sadalījumam.

Atlasītās datu kopas attēlo priekšplāna sistēmu un datubāzē ir saistītas ar procesiem fona sistēmā. Definēto scenāriju ievades parametru vērtības ir parādītas 2.8. tabulā. Vērtības ir norādītas attiecībā uz definēto *FU*. Ievades datu kopa no *Ecoinvent* parādīta tā, kā norādīts datubāzē.

Definēto scenāriju ievadīto parametru vērtības

| Scenārijs | Process | Vienība | Vērtība | <i>Ecoinvent</i> datu kopa | Komentārs |
|--------------|--------------------------|-------------------|---------|---|---|
| 1. scenārijs | Siltums no katla | MWh _{th} | 39 | <i>Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production, mixed logs, at furnace 30kW APOS, U</i> | Datu kopa koriģēta, ņemot elektroenerģijas patēriņu, lai izvairītos no dubultās uzskaites |
| | Elektrība no tīkla | kWh _{el} | 3516 | <i>Electricity, medium voltage {LV} market for APOS, U</i> | Datu kopa atspoguļo elektroenerģijas patēriņa sadalījumu Latvijā |
| 2. scenārijs | Siltums no katla | MWh _{th} | 39 | <i>Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production, mixed logs, at furnace 30kW APOS, U</i> | Datu kopa koriģēta, ņemot elektroenerģijas patēriņu, lai izvairītos no dubultās uzskaites |
| | Elektrība no PV paneļiem | kWh _{el} | 2400 | <i>Electricity, low voltage {LV} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted APOS, U</i> | Datu kopa atspoguļo PV saražoto elektroenerģijas apjomu Latvijā attiecībā pret saražoto jaudu |
| | Elektrība no tīkla | kWh _{el} | 1116 | <i>Electricity, medium voltage {LV} market for APOS, U</i> | Datu kopa atspoguļo elektroenerģijas patēriņa sadalījumu Latvijā |
| 3. scenārijs | Siltums no katla | MWh _{th} | 39 | <i>Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production, mixed logs, at furnace 30kW APOS, U</i> | Datu kopa koriģēta, ņemot elektroenerģijas patēriņu, lai izvairītos no dubultās uzskaites |
| | Stirlinga dzinējs | piece | 0,0667 | <i>Stirling heat and power co-generation unit, 3kW electrical, 15 years lifetime</i> | Vērtība pielāgota atlasītajam <i>FU</i> , dalot ievadi ar tehnoloģijas kalpošanas laiku |
| | Elektrība no tīkla | kWh _{el} | 2500 | <i>Electricity, medium voltage {LV} market for APOS, U</i> | Datu kopa atspoguļo elektroenerģijas patēriņa sadalījumu Latvijā |

Noteiktajos scenārijos siltums tiek ražots, sadedzinot jaukta tipa malku apkures katlā, kura siltuma jauda ir 30 kW_{th}. Apkurei nepieciešamo malkas patēriņu nosaka, izmantojot datus no koksnes zemākā sadegšanas siltuma vērtībām, kuras atrodamas tabulās, un atbilstoši malkas veidam un mitruma pakāpei, zemākais sadegšanas siltums ir 9430 MJ/m³. Saskaņā ar *Ecoinvent* dokumentāciju izvēlēta datu kopa atspoguļo tirgū plašāk pieejamo un izmantojamo apkures katlu tehnoloģiju, ņemot vērā to darbību apkures sezonas laikā, ieskaitot katla sākotnējo ieslēgšanas un darbības apstādināšanas ciklu, daļējas slodzes darbības režīmu. Katla darba cikla izmaiņas rada iespaidu uz kopējo darba efektivitāti un izmantojamo kurināmā apjomu. Darba efektivitāte saistāma ar visas iesaistītās infrastruktūras darbības radītajām emisijām gaisā, kā arī darbības nodrošināšanai nepieciešamo elektroenerģiju un pelnu iznīcināšanu. Datu kopa ir koriģēta pētījuma vajadzībām, izņemot katla patērēto elektroenerģiju, lai izvairītos no elektroenerģijas patēriņa dubultās uzskaites citos inventarizācijas procesos.

Katla procesa siltumenerģijas datu kopa ietver arī ar krāsns ražošanu un pārstrādi pēc ekspluatācijas cikla beigām saistītās ietekmes, kas aplēstas attiecībā uz īpatnējo siltuma ražošanā saražoto enerģijas vienību daudzumu. Krāšņu ražošanas ietver materiālus karstā ūdens tvertnei, skursteņa dūmvadu caurulēm, kurtuvei nepieciešamajam betona pagrabam 4 m^2 un zemes pārveidošanas darbiem, bet neietver malkas uzglabāšanas vietas izbūvi un izmantošanu.

Datu kopa par elektroenerģiju no publiskā tīkla ņem vērā Latvijas vidējā sprieguma publisko tīklu un ietver ietekmi uz vidi, kas rodas elektroenerģijas ražošanas un pārvades augstsprieguma un vidēja sprieguma elektrotīklā pa gaisvada līnijām un kabeļiem, tostarp ietekmi, kas saistīta ar augstsprieguma un vidējā sprieguma komutācijas stacijas darbību, kas aprēķinātas attiecībā uz īpatnējo piegādāto enerģijas vienību daudzumu. Datu kopa neietver izolācijas eļļas noplūdi no kabeļiem un elektrotehniskajām iekārtām (transformatoriem, sadales iekārtām, automātiskajiem slēdžiem), nejaušas noplūdes un emisijām sadales iekārtas ražošanas un demontāžas laikā. Šīs *Ecoinvent* datu kopas elektroenerģijas kombinācija ir balstīta uz *IEA* Pasaules enerģētikas Starptautiskās enerģētikas aģentūras statistiku par 2018. gadu.

2. scenārija ievades parametru vērtības ietver tādu pašu sildīšanas parametru ievadi kā 1. scenārijā, tikai pievienojot elektroenerģijas piegādi no saules *PV*. Saules *PV* vērtības ir aprēķinātas 3 kW_{el} uzstādītam saules enerģijas panelim un ir vienādas ar 2400 kWh gadā saražotās elektroenerģijas. Pārējais mājas elektroenerģijas pieprasījums joprojām tiek nodrošināts no publiskā elektrotīkla. 3. scenārijā atlasītā saules *PV* datu kopa atspoguļo globālo vidējo ar tīklu pieslēgtas zemsprieguma elektroenerģijas ražošanu, izmantojot iebūvētu vairāku *Si* paneļu *PV* moduli ar inverteru, lai zemsprieguma līdzstrāvu pārveidotu maiņstrāvā, ņemot vērā ietekmi, kas rodas fona sistēmā (ietekme, kas saistīta ar infrastruktūru, emisijām). Izvēlētajā *Ecoinvent* datu kopā ir ņemta vērā ietekme uz vidi attiecībā uz konkrētu saules *PV* saražoto enerģijas vienību daudzumu.

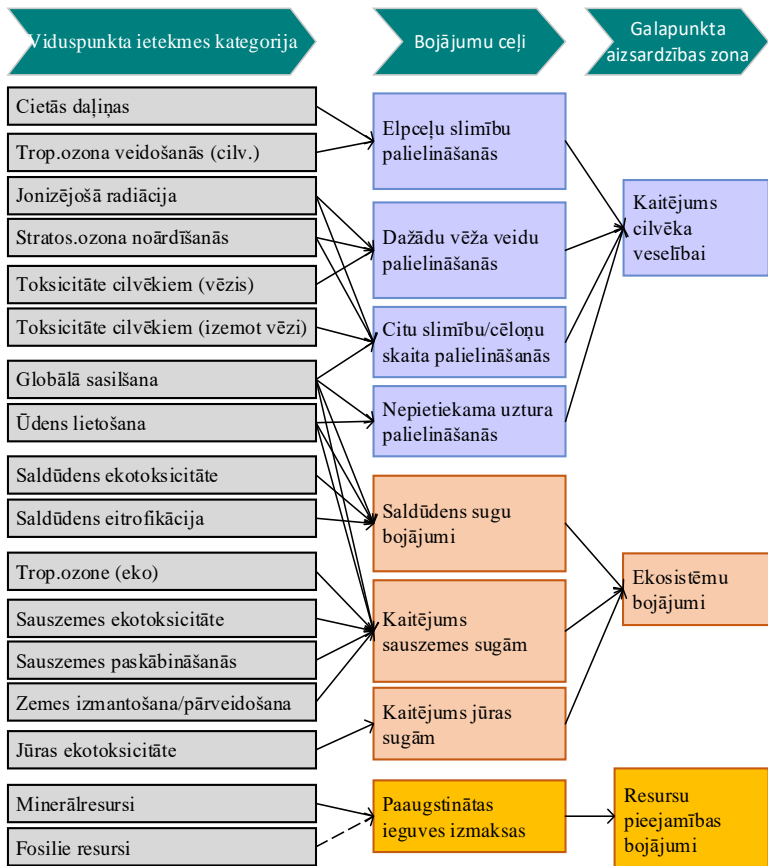
3. scenārija ievades parametru vērtības ietver to pašu apkures parametra ievadi kā 1. scenārijā, uzstādot katlā 1 kW_{el} Stirlinga dzinēju. Stirlinga dzinēju datu kopa ietver globālo vidējo scenāriju koksnes granulu sadedzināšanai ar jaudu no 1 kW_{el} līdz 3 kW_{el} un fona sistēmā notiekošajiem procesiem, kas saistāmi ar emisijām no svarīgāko ražošanā izmantoto materiālu ieguves, iekārtu ražošanai nepieciešamās enerģijas, plānošanas, izejvielu transportēšanas un uzglabāšanas.

Ecoinvent datu kopā ir ņemta vērā Stirlinga dzinēja noklusējuma efektivitāte, tomēr 3. scenārijā ievades parametru vērtības tiek pielāgotas Stirlinga dzinēja efektivitātes rezultātiem iepriekšējos gadījumu pētījumos (*Famiglietti et al.*, 2022). Tās ir $1014 \text{ kWh}_{\text{el}}$, ko Stirlinga dzinējs saražo kopā ar 30 kWh katlu. Turklāt Stirlinga dzinēja kalpošanas laiks ir 15 gadi, tāpēc ievadītā vērtība ir parametrs, kas tiek dalīts ar kalpošanas laiku, lai ņemtu vērā atsauci uz gada ražošanu šajā pētījumā definētajā *FU*. Pārējo elektroenerģijas pieprasījumu sedz elektroenerģija no publiskā tīkla.

Dzīves cikla ietekmes novērtējuma metode

Ietekmes uz vidi novērtējumam izvēlēta *ReCiPe 2016* metode, ko izveidoja *RIVM*, Radbouda Universitāte, Norvēģijas Zinātnes un tehnoloģiju universitāte un *PRé Sustainability*. Metode nodrošina ietvaru (2.16. att.), lai pārvērstu emisijas un resursu ieguves ietekmi uz vidi ietekmējošiem faktoriem, novērtējot dzīves cikla ietekmi viduspunktā (17 ietekmes kategorijas) un beigu līmenī, ļaujot novērtēt cilvēku veselību, ekosistēmas kvalitāti un resursu trūkumu kā trīs aizsardzības jomas: cilvēka veselību, ekosistēmu, resursus (*Huijbregts et al., 2017*).

Cilvēka veselībai nodarīto kaitējumu aprēķina invaliditātes koriģētā dzīves gada (*Disability-Adjusted Life Year, DALY*) vienībās. Runājot par ietekmi uz ekosistēmu, potenciāli izzudušās sugu daļas (*PDF*) vienību pieaugumu nosaka, kā aprakstīts (*Dekker et al., 2020*) un parādīts 2.23. attēlā, un tas ir iekļauts *ReCiPe 2016*. Iegūtie rādītāji normalizēti “Eko” punktu vienībās atbilstoši ietekmes faktoriem, kas attiecas uz rādītāju normalizācijas vērtībām pasaules vidējo svērumu kopā.



2.23. att Pārskats par *ReCiPe 2016* ietvertajām ietekmes kategorijām (*Huijbregts et al., 2017*).

Pašlaik pasaulē pieaugošās bažas par klimata pārmaiņām rada nepieciešamību samazināt SEG emisijas. Tomēr, koncentrējoties tikai uz SEG emisijām, var būt negaidītas sekas, piemēram, sloga pārnesana uz citām būtiskām vides problēmām. *ReCiPe 2016* koncepcija, kurā ņemtas vērā daudzas efektu kategorijas un to relatīvā nozīme, labi atbilst plašākam vides politikas plānošanā nepieciešamajam skatījumam. *ReCiPe 2016* izmantošana garantē, ka nevienai ietekmes kategorijai netiek piešķirta prioritāte uz citu rēķina, aptverot plašu vides seku klāstu, sākot no klimata pārmaiņām un resursu izsīkšanas līdz cilvēku veselībai un ekosistēmu kvalitātei. *ReCiPe 2016* palīdz veikt līdzsvarotāku un informētāku novērtējumu un izvairīties no vides slodžu pārvietošanas no vienas ietekmes kategorijas uz citu, kas var notikt, ja tiek novērtētas tikai dažas kategorijas, tādējādi veicinot ilgtspējīgu lēmumu pieņemšanu visās nozarēs un produktu dzīves ciklos.

Dzīves cikla ietekmes interpretācija

Dzīves cikla interpretācijas posms galvenokārt ir saistīts ar *LCIA* rezultātu aprakstu un iztirzāšanu, kuri aplūkoti 3.5. apakšnodaļā. Interpretācija ietver katra scenārija programmatūrā ģenerēto modeļu pārbaudi, izvēlēto tehnoloģiju ieguldījumu scenārija kopējā iedarbībā, iegūto viduspunkta kategoriju punktu analīzi, kopējo (bojājumu) punktu kategoriju un jutīguma analīzi.

Jutīguma analīze izmantota kā rīks, lai pārbaudītu modelēto scenāriju konsekvenci un izprastu izmaiņas, kas notiek ar izejas datiem, mainot ievades datus. Noteikto tehnoloģisko sistēmu ietvaros elektroenerģijas patēriņam ir jābūt atsaucīgam enerģijas pieprasījuma izmaiņām. Jutīguma analīzē pārbaudīti elektroenerģijas patēriņa izmaiņu rezultāti, mainot elektroenerģijas patēriņa ievades vērtības no publiskā tīkla par -50 %, -20 %, -10 % un +10 %, +20 %, +50 % attiecībā pret katra 2.8. tabulā minētā scenārija bāzes gadījuma ievadi un šīs izmaiņas pēc tam analizē SEG emisijas un parametru kategorijas kopā. Tādā veidā jutīguma analīze ļauj aplūkot ar klimata pārmaiņām saistīto indikatoru un kopējos vides rādītājus, lai salīdzinātu, vai definētajos scenārijos pastāv sloga pārnesana mainīgos elektroenerģijas patēriņa apstākļos.

3. REZULTĀTI

Šajā nodaļā aplūkoti iepriekšējās sadaļās aprakstītie veikto pētījumu rezultāti. Tā sniedz iespēju rūpīgi izpētīt savāktu informāciju, analizēt to un izdarīt secinājumus, kas ne tikai atklāj paveiktā darba būtību, bet arī izgaismo būtiskus aplūkojamo jautājumu aspektus.

3.1. Bibliogrāfiskā analīze

Šajā apakšnodaļā ir sniegta katram no trim pētījuma jautājumiem *RQ* iegūto publikāciju kopu kvantitatīvā analīze, nodrošināta satura kvalitatīvā analīze, īpašu uzmanību pievēršot *RQ2* un *RQ3*, ņemot vērā ilgtspējības un energoapgādes drošības aspektus.

Kvantitatīvā analīze

Kvantitatīvajai literatūras analīzei ir jānodrošina novērtēto rakstu kvalitāte, pilnīgums un atbilstība (Nolting *et al.*, 2019). Kvantitatīvo rezultātu kopsavilkums visiem trim pētījuma jautājumiem parādīts 3.1. tabulā. Īpašā *RQ1* meklēšanas virkne uzrādīja 3997 rakstus, kas izmantoti, lai izpētītu un pamatotu *RQ1*, kvantitatīvi analizējot šo rakstu statistikas datus.

Kopš Stirlinga dzinēja atklāšanas 1816. gadā līdz mūsdienām šī tehnoloģija ir ar lielāku vai mazāku intensitāti pētīta, lai atrastu vēl efektīvākus lietojuma veidus. Pastiprināta attīstība vērojama pēdējo 50 gadu laikā (Durcansky, Nosek and Jandacka, 2020). Lai saprastu literatūras par Stirlinga dzinēju attīstību, veikta atslēgvārdu analīze. 3.1. attēlā parādīta publikācijās lietoto aktuālo atslēgvārdu dinamika kopā ar atslēgvārdu “Stirlinga dzinējs”. Redzams, ka agrākajā periodā, par kuru ir pieejami izdevējdarbības ieraksti, “gaisa dzinējs” (tāpat kā karstā gaisa dzinējs) bija nozīmīgs atslēgvārds, kas kopā ar “Stirlinga dzinēju” pieminēts daudzkārt (97 % rakstu šī atslēgvārdu kombinācija konstatējama no 1969. līdz 1994. gadam).

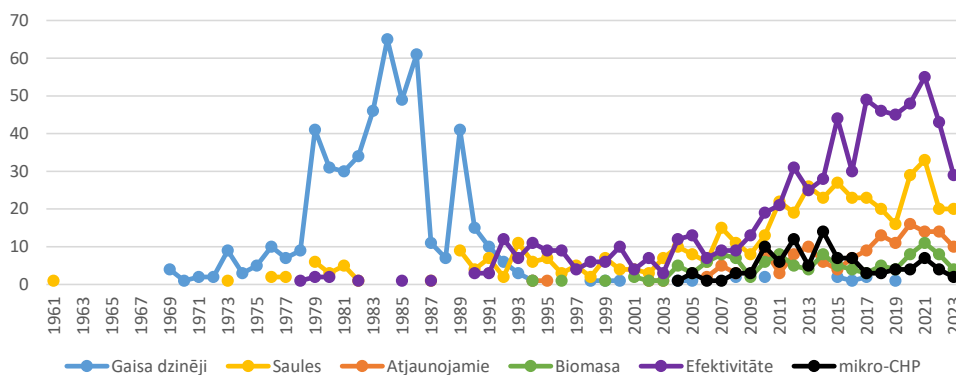
3.1. tabula

Meklēšanas kritēriji katram no definētajiem pētījuma jautājumiem

| <i>RQ</i> | Iegūti ieraksti | Iegūti pilni raksti | Laikrindu diapazons | Dokumenta veids atlasē |
|------------|-----------------|---------------------|---------------------|---|
| <i>RQ1</i> | 3997 | n/a | 1960–2023 | 1978 raksti, 1948 konferenču referāti, 71 apskats |
| <i>RQ2</i> | 41 | 29 | 2001–2022 | 24 raksti, 14 konferenču referāti |
| <i>RQ3</i> | 8 | 8 | 2009–2017 | 5 raksti, 2 konferenču referāti, 1 apskats |

Iegūtajos rakstos kā atslēgu vārdi, kas attiecas uz saules tehnoloģijām, izmantoti dažādi termini, t. i., saules šķīvju Stirlings, koncentrēta saules enerģija, saules koncentratori, saules enerģija, saules apkure, saules enerģijas ražošana, saules elektrostacijas. Lai izvairītos no dubultās uzskaites, tie visi analizēti kopā (sk. “Saules enerģija” 3.1. att.). Raksti, kas ietver ar saules tēmu saistītus

atslēgvārdus, tiek publicēti jau kopš 1961. gada, intensitātes pieaugums ir vērojams kopš divtūkstošo gadu sākuma. Līdzīgas pieauguma tendences vērojamas arī atslēgvārdiem, kas saistīti ar “atjaunojamie” (atjaunojamo energoresursu, atjaunojamo enerģijas avotu kombinētā analīze), “biomasu” un “mikrokoģenerāciju” (mikrokoģenerācijas kombinētā analīze, mikroCHP). Tomēr pēdējo desmit gadu laikā vislielākais kopējais pieaugums vērojams ar “efektivitāti” saistītu atslēgvārdu lietojumam (apvienojumā efektivitāte, enerģijas taupīšana, energoefektivitāte, enerģijas izmantošana, ekserģija, optimizācija). Ņemot vērā arī 3.1. attēlā noteikto publicēšanas tendenci (t. i., lielākā žurnālu rakstu proporcijā nekā konferenču rakstu krājumos jaunākajā pētījumu vilnī), var secināt, ka šobrīd tiek publicēti dziļāki un plašāki pētījumi par dažādiem Stirlinga dzinēju izmantošanas aspektiem. Tie ir ne tikai tehniskie un eksperimentālie darbi, bet arī arvien vairāk apsverot pārejas uz atjaunojamiem avotiem iespējas un efektīvāku energoresursu pārveidi.

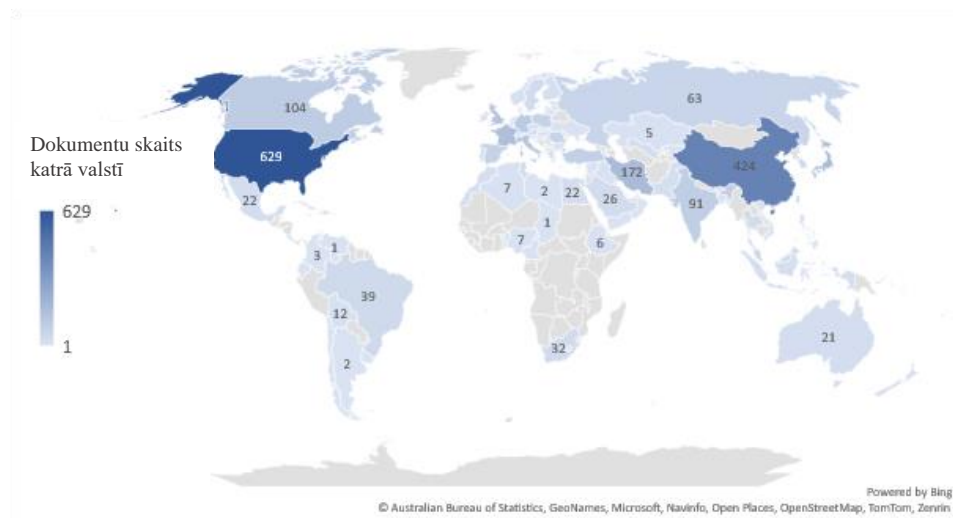


3.1. att. Aktuālo atslēgvārdu dinamika publikācijās, kurās minēts Stirlinga dzinējs.

Attiecībā uz analizēto publikāciju ģeogrāfisko pārklājumu 3.2. attēlā ir apkopotas valstis, kuras visbiežāk publicē ar Stirlinga dzinēju saistītos pētījumus. No 3997 novērtētajiem dokumentiem 1057 dokumentiem valsts nav skaidri norādīta. 629 publikācijas nāk no Amerikas Savienotajām Valstīm (ASV), tām seko Ķīna (424) un Japāna (178). Citas produktīvākās valstis ir Irāna (172), Francija (157), Apvienotā Karaliste (140), Itālija (134), Vācija (112), Kanāda (104), Indija (91) un Turcija (86) (3.2. att.). Jāpiebilst, ka Eiropas Savienības valstis kopumā ir publicējušas 838 dokumentus, kuros minēti Stirlinga dzinēji, tas ir pat augstāks rādītājs nekā ASV.

Ņemot vērā institucionālo piederību, izlasē bija pārstāvētas 160 dažādas institūcijas. Lielākā daļa publikāciju nāk no NASA Glenn pētniecības centra (124), kas atrodas Amerikas Savienotajās Valstīs, kam seko Ķīnas Zinātņu akadēmija (101), Kalgari Universitāte (81), Ķīnas Zinātņu akadēmijas Fizikas un ķīmijas tehniskais institūts (64), Ķīnas Universitāte, Ķīnas Zinātņu akadēmija (64), *Mechanical Technology, Inc.* (58), Gazi Universitāte (56), Nacionālā Cheng Kung

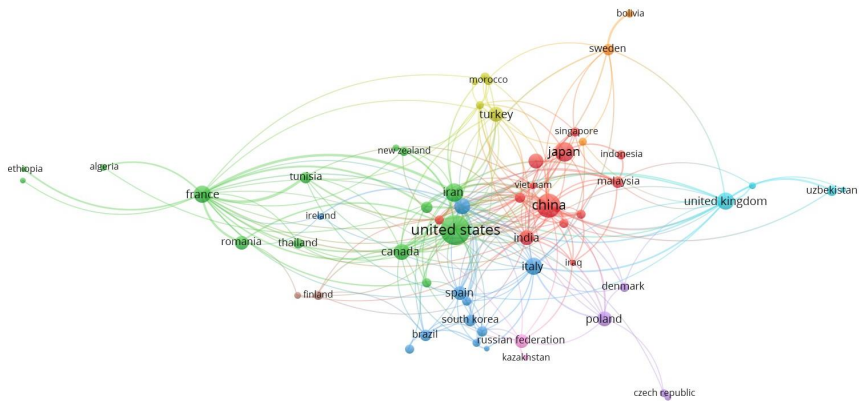
universitāte (48), Sunpower Inc. (42), Huažongas (Huazhong) Zinātnes un tehnoloģijas universitāte (38) (3.3. att.).



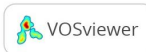
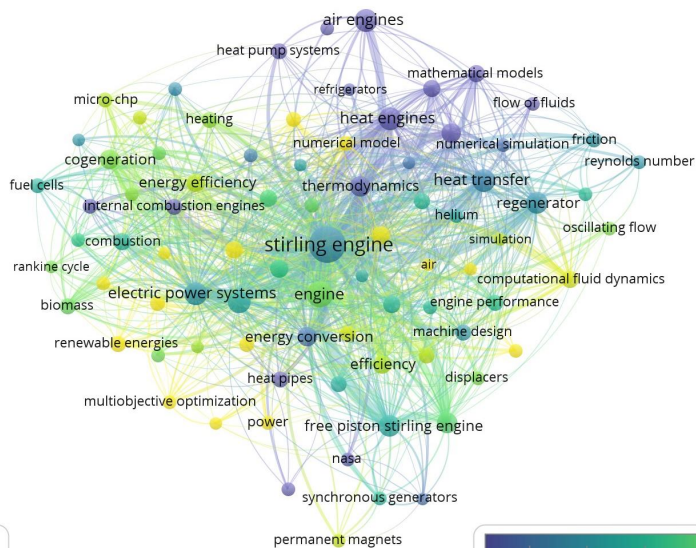
3.2. att. Publikāciju, kurās minēts Stirlinga dzinējs, ģeogrāfiskais sadalījums.

Starptautisko sadarbību starp autoriem šajā jomā var vizualizēt, izmantojot bibliometriskās datu analīzes programmas, piemēram, VOS viewer (*Jan van Eck and Waltman, 2022*). 3.3. attēlā ir parādītas saiknes starp valstīm, kurās attiecīgie pētījumi veikti, pamatojoties uz dokumentu skaitu un normalizāciju pēc sasaistes ar izpētes tēmu. Sadarbības līderos ir ASV, publicējot galvenokārt sadarbībā ar Ķīnu un Japānu, kas ir nākamās divas valstis, kurām ir visvairāk kopīgi publicēto rakstu.

VOS viewer vizualizācijas iespējas izmantotas arī, lai analizētu iegūtajos rakstos izmantoto atslēgvārdu dinamiku laikā. 3.4. attēlā parādīta visu atslēgvārdu (gan autora atslēgvārdu, gan indeksēto atslēgvārdu) līdzcītējumu pārklājuma vizualizācija. Krāsu skala ir balstīta uz vidējo dokumentu publicēšanas laiku, kas ietver konkrētu atslēgvārdu. Tādējādi var norādīt, kuri atslēgvārdi pēdējā laikā lietoti visbiežāk. Minimālais atslēgvārdu pieminēšanas skaits iestatīts 50, lai iegūtu reprezentējamu atslēgvārdu kopu, kā arī tika apvienoti dublicējošo tēmu raksti, nodrošinot aizstājējzinonīmus. Līdz ar to vismaz 50 publikācijās minēti 84 atslēgu vārdi, kas apvienoti trīs galvenajās kopās. Šie rezultāti sniedz vēl vienu veidu, kā vizualizēt iepriekš minētos secinājumus, ka “gaisa dzinēji”, kā arī “siltuma dzinēji”, “siltummaiņi” un citi termodinamiskie atslēgvārdi bija ļoti populāri pirms divtūkstošajiem gadiem. Energoefektivitāte, mikrokoģenerācija, biomasa, atjaunojamie energoresursi, atkritumsiltuma izmantošana, aprēķina šķidruma dinamika ir publikāciju atslēgvārdi pēdējo gadu laikā.



3.3. att. Visvairāk publicējošo valstu vizualizācija $RQ1$ modelī (mezglu svari, pamatojoties uz dokumentu numuru, normalizācija pēc asociācijas stipruma).



3.4. att. Visbiežāk sastopamo atslēgvārdu pārklājuma vizualizācija $RQ1$ modelī (izdošanas gada krāsu skala, mezglu svari, pamatojoties uz gadījumiem, rādītāji, pamatojoties uz vidējo publicēšanas gadu).

Lai atbildētu uz *RQ2*, veikta vēl viena dokumentu ieguves iterācija, pamatojoties uz speciālu meklēšanas kritēriju kopu (2.1. tab.). Mērķis bija izvēlēties konkrēto saderību ar Stirlinga dzinēju saistīto literatūru, kurā aplūkoti arī to lietojumi dzīvojamajās mājās kur izmanto biomasu kā kurināmo *RQ1*, izmantotā pētījuma virkne papildināta ar atslēgvārdiem “dzīvojamais”, “mājsaimniecība”, kas saistīja attiecīgi 164 un 42 rakstus, un kombinācijā, izmantojot loģisko VAI, sasaistījās 194 raksti. Lai panāktu vēl labāku mājsaimniecības mēroga tehnoloģiju pārklājumu, no *RQ1* atslēgvārdu statistikas tika iegūtas sešas populārākās ar mikrokoģenerāciju saistītu atslēgvārdu variācijas un pievienotas pētījuma virknei ar loģiskā VAI funkciju. Šis vaicājums sasaistīja 325 rakstus, taču kopa pēc tam tika samazināta, šai virknei pievienojot atslēgvārdu “biomasu”, izmantojot loģisko funkciju UN. Kopsavilkuma vaicājumā tika sasaistīta 41 zinātniskā publikācija, kuras sīkāk analizētas šajā nodaļā, un to saturs, kas analizēts nodaļā “Kvantitatīvā analīze – Stirlinga dzinēju biomasas koģenerācijas izmantošanas tendences”.

Tālāk ir apkopota to publikāciju statistika, kas atlasīta, lai atbildētu uz *RQ2*. Agrākās no iegūtajām publikācijām ir publicētas 2001. gadā, tomēr 95 % publikāciju par šo tēmu ir publicētas laikā no 2010. līdz 2023. gadam. Pieaugums vērojams 2014. un 2015. gadā (četras publikācijas gadā) un 2021. un 2022. gadā (piecas publikācijas gadā). 24 no publikācijām bija žurnālu raksti, 14 – konferenču referāti, atlasītajā komplektā recenziju nebija. Runājot par ģeogrāfisko pārklājumu, lielākais publikāciju skaits šajā izlasē bija no Rumānijas (7), Francijas (5), Itālijas (5). Ar Eiropas autoriem saistīti 36 dokumenti: Āzijai – 7, Dienvidamerikai – 4, Tuvajiem Austrumiem – 3 un Austrālijai – 2. Tas liecina par šīs tēmas nozīmi un aktualitāti, īpaši Eiropā. Rakstus pārsvarā publicē konkrētu valstu pētnieki vai pētnieku grupa, bet sadarbība ir vērojama starp Itāliju un Apvienoto Karalisti (*Pantaleo et al.*, 2015), (*Renzi and Brandoni*, 2014), un starp starptautiskiem Zviedrijas un Bolīvijas pētniekiem (*Cardozo et al.*, 2014), (*Cardozo and Malmquist*, 2019), Austrālijas, Irānas un Malaizijas pētniekiem (*Damirchi et al.*, 2015), (*Najafi et al.*, 2020).

Kā redzams no kvantitatīvās analīzes, pētniecības apakšvirziens attīstās tikai pēdējā laikā (pēdējos 20 gadus), uzrādot lēnu pieauguma tendenci. Iegūtās izlases ģeogrāfiskais sadalījums liecina, ka Eiropas zinātnieku aprindās šī tēma ir diezgan aktuāla. Iespējams, ka ES mērķtiecīgie centieni palielināt atjaunojamo energoresursu izmantošanu ir veicinājuši šo pētījumu attīstību. Eiropas Komisijas, *Interreg* un *Horizon 2020* projektu finansējums ir visbiežāk minētie finansējuma avoti šiem pētījumiem, kā arī Vides sadarbības komisijas (nodibināja Kanādas, Meksikas un ASV valdības (*CEC*, 2023), Inženierzinātņu un fizikālo zinātņu pētniecības padomes (Lielbritānija), Eiropas Rekonstrukcijas un attīstības bankas finansējums.

Papildus bažām par vides un klimata pārmaiņām pašreizējās un turpmākās energoapgādes drošības problēmas arī turpmāk veicinās Stirlingas dzinēju izpēti. Tāpēc *RQ3* ir veltīts Stirlinga dzinēja ietekmei energoapgādes, energoapgādes drošības un vides pētniecības jomā. Īpašā meklēšanas virkne atklāja astoņus dokumentus, kas publicēti laikā no 2009. līdz 2017. gadam.

No vienas puses, tas ir ļoti neliels dokumentu daudzums, taču tas norāda uz tēmas pēdējā laika aktualitāti. Iegūtie raksti ir no tādām valstīm kā Itālija, Apvienotā Karaliste, Bulgārija, Kanāda, Indija, Pakistāna, Rumānija un Turcija. Atšķirībā starp RQ1 un RQ2 dokumentiem atbilstmju skaits ir parāk mazs, lai izdarītu secinājumus par būtiskākajām tendencēm.

Kvantitatīvā analīze – Stirlinga dzinēju biomasas koģenerācijas izmantošanas tendences

Šajā apakšnodaļā apskatīti dažādi Stirlinga dzinēju aspekti ilgtspējības un energoapgādes drošības kontekstā. Analizētas perspektīvās pētījumu tendences Stirlinga dzinēju izmantošanā, ņemot vērā mikroģenerācijas (mājsaimniecības vai individuālo lietotāju) līmeni.

Pirmkārt, analizēti visu iegūto ierakstu kopsavilkumi (n=41), un pētījumi tika klasificēti kā eksperimentālie pētījumi (n=20), simulācija un modelēšana (n=12) un citi (n=9), kas ietilpa konceptuālajā analīzē un atsauksmēs. Atbilstoši apskatāmajam pētījuma objektam pētījumi klasificēti kā tādi, kas galvenokārt attiecas uz Stirlinga dzinēja koģenerācijas sistēmu, kas darbināma ar biomasu, (n=24) tehniskiem uzlabojumiem, pētījumiem, kuros analizēta vairāku atjaunojamo avotu integrācija vai plašākas energosistēmas (laukos, ciematos) (n=7)), kopsavilkuma raksti kā apskati (n=6) un citi (n=4), t. i., konceptuāli vai politikas izstrādes pētījumi.

Parasti galvenais virziens pētījumos, kas iegūti, pamatojoties uz RQ2 speciālo meklēšanas virkni, ir saistīts ar Stirlinga dzinēja un koģenerācijas integrēto sistēmu tehnisko uzlabojumu iespēju eksperimentālu izpēti (*Kramens et al.*, 2021), (*Lombardi et al.*, 2015), (*Garćia et al.*, 2022), (*Takeuchi, Suzuki and Abe*, 2021) vai eksperimentālo un simulācijas datu salīdzināšanu (*Ulloa et al.*, 2013), (*Voronca et al.*, 2022). Iegūto dokumentu grupēšana ļāva arī noteikt pētniecības apakšvirzienu Stirlinga dzinēja un verdošā slāņa sadedzināšanas iekārtas integrācijai (*Lombardi et al.*, 2015), (*Miccio*, 2013). Pētnieki ziņo par eksperimentālām iekārtām 40 kW_{th}/0,5 kW_e (*Marra et al.*, 2020), 0,5 kW_e (*Borisov, Khalatov and Paschenko*, 2022).

Vides ilgtspējības nodrošināšanai Stirlinga dzinēja galvenās priekšrocības ir augstā termiskā efektivitāte, zems trokšņa līmenis, zems piesārņojuma indekss (*Zhu et al.*, 2021). Kā atklāja Stirlinga dzinēja vēsturiskās attīstības tendence (sk. 2.1. apakšnodaļu), tehnoloģijas aktualitāte un popularitāte gadu gaitā ir svārstījusies, taču pēdējos gados un arī līdz ar plašākas publicēšanas iespējām pieaug pētījumu intensitāte. Viens no daudzsoļīgākajiem jaunajiem attīstības virzieniem, kas identificēts ar strukturētās literatūras analīzes pieejas izvēlēto rakstu saturā analīzi, ir pētījumi par biomasas kurināmo tehnoloģiju un Stirlinga dzinēju integrāciju. Stirlinga dzinēji ar biomasu ir izstrādāti un/vai pārbaudīti ar vairākiem enerģijas resursiem – granulām (*Cardozo et al.*, 2014), (*Borisov, Khalatov and Paschenko*, 2022), (*Voronca, Siroux and Darie*, 2022), (*Crema et al.*, 2011), koksnes pulveri (*Arashmia et al.*, 2015). Autori ziņo, ka Stirlinga dzinējiem nepieciešamā siltuma ražošanai var izmantot daudzveidīgu biomasu, piemēram, zāģu skaidas, malku, kviešu salmus, stiebrzāles, papeles (*Zhu et al.*, 2021), (*Damirchi et al.*, 2016).

Dažos pētījumos ir aplūkota īpaši reģionāla perspektīva, t. i., (*Katona and Laza, 2018*) izstrādā koksnes biomasas reģionāli pietiekamu sistēmu ciematam Ungārijā, savukārt (*Uzuneanu, Scarpete and Badea, 2010*) veica gadījuma izpēti mājsaimniecības līmenī attiecībā uz Rumānijas dienvidaustrumu apstākļiem. (*Huang et al., 2017*) izpētīja Stirlinga dzinēja un biomasas triģenerācijas sistēmas simulāciju un modelēšanu gadījuma izpētes ēkai Ziemeļīrijā.

Kā norādīts sākotnējās izpētes un atslēgu vārdu analīzes laikā, Stirlinga dzinēja izmantošana kombinācijā ar mikroCHP ir jauna tehnoloģija, kas ir īpaši interesanta decentralizētai ražošanai. Atjaunojamo energoresursu izmantošana mikrokoģenerācijas un Stirlinga dzinēju sistēmā kļūst arvien aktuālāka, tomēr joprojām pastāv praktiski izaicinājumi. Avota pārtraukums vienmēr ir būtisks faktors, izmantojot saules vai vēja enerģiju, savukārt biomasas tiek uzskatīta par stabilāku avotu (*Gravelsins et al., 2023*), (*Soares and Oliveira, 2017*). (*Cardozo and Malmquist, 2019*) salīdzināja Stirlinga dzinēja veiktspēju ar koksnes un cukurniedru granulām, un lai gan tā ir zemāks par koksnes granulām efektivitāti, koģenerācijas efektivitāte ar salmu granulām joprojām bija virs 83 %. Tomēr (*Ranieri, Prado and MacDonald, 2018*) atzīmēja komerciālo Stirlinga dzinēju samazināto efektivitāti salīdzinājumā ar ideālajiem cikliem. (*Chmielewski et al., 2016*) laboratorijas mērogā pētīja Stirlinga dzinēju mikrokoģenerāciju kā potenciālu tehnoloģiju mājsaimniecībām, kuras izmanto apkurei cieto kurināmo. Tomēr attiecībā uz iespējamo izmantošanu dzesēšanas, apkures un elektro enerģijas ražošanu maza mēroga biomasas sadedzināšanas iekārtās (*Maraver et al., 2013*) atzīmē, ka Stirlinga dzinēju izvēles galvenais trūkums ir to zemā pieejamība tirgū. Turklāt zemas temperatūras organiskais Renkina cikls pārspēj Stirlinga dzinējus investīciju izmaksu, darbības un apkopes problēmu ziņā (Stirlinga dzinējam nepieciešamās augstākas siltuma avota temperatūras un iespējamo biomasas pelnu problēmu dēļ) (*Maraver et al., 2013*).

Attiecībā uz ārpustīkla AER sistēmām nozīmīgs izaicinājums var būt ražošanas un pieprasījuma pārvaldība (*Dahiru et al., 2023*). Arī enerģijas pārpalikums ir būtisks izaicinājums (*Vaziri Rad et al., 2023*). Lai gan biomasā balstīta mikrokoģenerācija var nodrošināt ražošanas stabilitāti lielākā mērā un ražošanas pārtraukuma ziņā ir vairāk kontrolējama nekā citi atjaunojamie avoti (piemēram, PV un vēja enerģija), galvenās problēmas ir saistītas ar ievērojama siltuma pieprasījuma trūkumu vasarā, kas samazina sistēmas kopējo efektivitāti. Stirlinga dzinēja lietošanai (*Staffell et al., 2010*) atzīmē, ka augstās siltuma un jaudas attiecības un atkarības no siltuma pieprasījuma dēļ Stirlinga dzinēji vasarā var darboties tikai ar pārtraukumiem, savukārt (*Ortwein and Lenz, 2015*) uzsver, ka pastāvīgā jauda ir arī ierobežojums, jo tehnoloģijas ir mazāk elastīgas. Analizējot mikrokoģenerācijas ietekmi uz vietējo ilgtspējību kopumā, (*Brandoni et al., 2014*) uzsver plānošanas un pārvaldības nozīmi, lai panāktu CO₂ samazināšanu, palielinātu tīkla stabilitāti un palielinātu atjaunojamo enerģijas avotu īpatsvaru. (*Alanne and Jokisalo, 2014*) pēta sistēmu, kurā integrēts uzlādējams elektromobilis kā enerģijas patērētājs nakts laikā. Aktuāls jautājums tehnoloģiju izvēlē ir mēroga noteikšana. (*Chmielewski et al., 2016*) uzskata, ka mikrokoģenerācija ir vispiemērotākā izmantošanai privātos uzņēmumos, mazās rūpnīcās un mājsaimniecībās.

(Kramens et al., 2021) arī atzīmē, ka Stirlinga dzinēji ir piemērotāki lielākiem mājokļiem, tāpēc to lietojums un efektivitāte privātmāju līmenī vēl ir detalizēti jāizvērtē.

Vēl viena sagaidāma tendence ir integrētu PV un Stirlinga dzinēja hibrīda koģenerācijas sistēmu lietošana. (Auñón-Hidalgo, Sidrach-de-Cardona and Auñón-Rodríguez, 2021) ziņo par kombinētu PV, saules siltuma kolektoru un mikroCHP Stirlinga dzinēja sistēmu kā mēģinājumu izveidot uzticamu, autonomu, pašpietiekamu integrētu sistēmu mājsaimniecībām. (Incili et al., 2022) analizē PV un fosilās (lignīta ogles) kurināmās katlu sistēmas ar Stirlinga dzinēju empīriskos datus. Šajā gadījuma izpētē ekonomiskā analīze liecināja, ka PV un Stirlinga dzinēja kombinēta izmantošana ir daudz izdevīgāka nekā tikai Stirlinga dzinēja izmantošana, jo ieguldījumu izmaksas uz kWh bija par 40 % zemākas (Incili et al., 2022). (Balcombe, Rigby and Azapagic, 2015) veiktā simulāciju analīze liecina, ka Stirlinga dzinējs un koģenerācijas sistēma mājsaimniecības pašpietiekamību veicina vairāk nekā PV, jo uzreiz tiek patērēts vairāk saražotās enerģijas.

Attiecībā uz RQ3, lai gan apkopotais jautājumu loks kas atbilst jautājumam, ir mazs, lielākā daļa rakstu tieši norāda, ka Stirlinga dzinēja tehnoloģija palīdz nodrošināt energoapgādes drošību, dažādojot elektroenerģijas ražošanu (Rosato et al., 2017). (Aliabadi et al., 2009) norāda, ka enerģētiskās drošības un klimata pārmaiņu problēmas ir koģenerācijas procentu pieauguma pamatā. (Brandoni et al., 2014) uzsver mikrokoģenerācijas energosistēmu spēju palielināt energoapgādes drošību, sasniegt klimata mērķus un virzīties uz ilgtspējīgu attīstību. (Incili et al., 2022) piemin mikrokoģenerācijas priekšrocības, lai nodrošinātu lielāku energoapgādes drošību, piedāvājot fosilās (ogles) mikrokoģenerācijas Stirlinga dzinēju un PV sistēmu. (Elmer et al., 2015) apsver arī energoapgādes drošību, analizējot kurināmā elementu priekšrocības un salīdzinot tās ar tradicionālajām sistēmām, kas balstītas uz sadegšanu, piemēram, Stirlinga dzinēju. (Mazhar et al.) (Khan et al., 2022), kā arī (Khadse and Khadse, 2018) min energodrošību kā Stirlinga dzinēju priekšrocību, bet nesniedz dziļāku analīzi. Kopumā šajos pētījumos ir atzītas priekšrocības, ko koģenerācija kopumā un īpaši Stirlinga dzinēju izmantošana nodrošina enerģijas avotam un ražošanai, piemēram, enerģijas ražošanas diversifikācija un decentralizācija, taču vēl nav veikta padziļināta analīze par šo apakšvirzienu.

3.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze

Kvantitatīvie dati par katru kritēriju un alternatīvām ir uzskaitīti 3.2. tabulā. Pētījuma veikšanai tika izmantoti dati, kas attiecināmi uz ES lietojamām energoapgādes sistēmām reģionos un kuru jauda nepārsniedz 50 kW. Dažos gadījumos visi nepieciešamie dati nebija atrodamī, bet citu scenāriju datu pieejamība uzdevuma izpildi padarīja neiespējamu. Atbilstoši tika atlasīti vispiemērotākie dati. Tabulas vērtību avoti ir norādīti turpmākajās apakšnodalās.

3.2. tabula

Daudzkritēriju lēmumu analīzes lēmumu matrica

| Kritērijs | <i>PEMFC/PV</i> | <i>PV</i> | <i>SE/BM</i> | <i>SE/SD</i> |
|--------------------------------|-----------------|-----------|--------------|--------------|
| LCOE, €/kWh | 0,46 | 0,13 | 0,11 | 0,17 |
| Efektivitāte, % | 48 | 18 | 47 | 31 |
| Uzticamība, h/gadi | 1691 | 1314 | 7000 | 2400 |
| GWP, kg CO ₂ eq/kWh | 0,24 | 0,60 | 0,12 | 0,30 |
| Mūžs, gadi | 5 | 25 | 20 | 20 |

Izlīdzinātas enerģijas izmaksas

Ir veikti vairāki pētījumi par kurināmā elementu enerģijas izlīdzinātajām izmaksām. Vairākas no tām attiecas uz sistēmām, kas darbojas ar neatjaunojamiem enerģijas avotiem, piemēram, dabasgāzi un dīzeļdegvielu (*Marocco et al.*, 2022), (*Nižetić, Tolj and Papadopoulos*, 2015), (*Ghenai and Bettayeb*, 2017). Citi literatūrā atrodami pētījumi nav attiecināmi uz veikto izpēti, jo tie bija saistīti ar lielas jaudas sistēmām (*Di Micco et al.*, 2023), (*Okundamiya*, 2021), (*Praveenkumar et al.*, 2022) vai to izmantošanas mērķis ir atšķirīgs no pētāmā objekta izmantošanu, piemēram, telekomunikāciju stacijām (*Bartolucci et al.*, 2019) un siltumniecām (*Ceylan and Devrim*, 2021). *LCOE* no šiem pētījumiem bija robežās no 0,06 līdz 0,66 EUR/kWh. (*Ceylan and Devrim*, 2021) apkopoja dažādus pētījumus par *PEMFC* saules hibrīdsistēmām un konstatēja, ka izlīdzinātās enerģijas izmaksas var sasniegt 1,46 EUR/kWh. Kā ievades dati tika izvēlēts pētījums par *PV/PEMFC* sistēmu, kas spēj nodrošināt vidējo dienas patēriņu Turcijas mājsaimniecībā (8 kW) (*Budak and Devrim*, 2019). Pētījums neatbilst visām ieejas datu prasībām, jo tajā ir ņemti vērā laika apstākļi Turcijā, kas ietekmē *PV* enerģijas izlaidi un līdz ar to arī izmaksas. Rezultātā izlīdzinātās enerģijas izmaksas bija 0,54 USD/kWh jeb 0,46 EUR/kWh (2018. gada maiņas kurss) sistēmai, kurā izmanto metanola elektrolīzi.

PV gadījumā *LCOE* tika izvērtētas *PV* sistēmas, kuras uzstādītas uz dzīvojamo un komerciālo ēku jumtiem (*Badouard et al.*, 2020). Šo sistēmu uzstādītā jauda ir mazāka par 1 MW, kas ir lielāka par noteikto jaudas sliekšni. No 2008. līdz 2018. gadam izlīdzinātās *PV* paneļu enerģijas izmaksas samazinājās par gandrīz 80 %. Tas ir saistīts ar strauju kapitālizdevumu kritumu. 2018. gadā jumta *PV LCOE* ES-27 bija robežās no 70 EUR/MWh līdz 188 EUR/MWh (*Badouard et al.*, 2020). Ievadītā vērtība bija abu vērtību vidējā vērtība – 0,13 EUR/kWh.

Ir veikti arī vairāki pētījumi par Stirlinga dzinēju sistēmas izlīdzinātajām enerģijas izmaksām. Pētījumi aptver dažādas Stirlinga dzinēju sistēmas ar *LCOE* diapazonā no 0,01 EUR/kWh līdz 0,40 EUR/kWh. Enerģijas izlīdzinātās izmaksas bija 0,08 EUR/kWh ar metānu darbināmai gāzes turbīnai ar Stirlinga dzinēju (*Entezari, Manizadeh and Ahmadi*, 2018). Šajā gadījumā izmaksas tika samazinātas par 10 %, pievienojot sistēmai Stirlinga dzinēju. Marokas gadījumā izlīdzinātās enerģijas izmaksas saules šķīvja Stirlinga dzinējam var svārstīties no 0,10 EUR/kWh līdz

0,07 EUR/kWh (Larchet et al., 2017). *LCOE* ir atkarīga no ražošanas apjoma un lokalizācijas līmeņa. Sistēmai ar koncentrētu parabolisko šķīvju Stirlinga dzinēju un horizontālās ass vēja turbīnām izlīdzinātās enerģijas izmaksas bija no 0,12 EUR/kWh līdz 0,14 EUR/kWh (Shboul et al., 2021). K. Pawanonont et al. salīdzināja trīs tehnoloģijas: iekšdedzes dzinēju, organisko Renkina ciklu un Stirlinga dzinēju, ko varētu izmantot, lai ražotu elektroenerģiju no poligona gāzes (Pawanonont and Leephakpreeda, 2017). Rezultātā iegūtie *LCOE* bija attiecīgi 0,11 EUR/kWh, 0,28 EUR/kWh un 0,40 EUR/kWh. Stirlinga dzinēju sistēmu ievades dati tika balstīti uz pētījumu, kurā salīdzināta Stirlinga dzinēja veikspēja divu veidu atjaunojamiem enerģijas avotiem – saules enerģijai un biomasai (granulām) (Teixeira, 2020). Iegūtais *LCOE* 10 kW saules šķīvja Stirlinga sistēmai bija 0,17 EUR/kWh, bet 25 kW biomasas katlam ar Stirlinga dzinēju – 0,11 EUR/kWh.

Efektivitāte un uzticamība

Dažādu veidu kurināmā elementu elektriskā efektivitāte svārstās no 20 % līdz 70 %. Tomēr, aplūkojot to sistēmu efektivitāti, kurās tie darbojas, var redzēt, ka efektivitāte parasti ir diapazonā no 10 % līdz 60 % (Abdelkareem et al., 2021). *PEMFC* elektriskā efektivitāte ir no 50 % līdz 60 %, savukārt sistēmas, kurā tas darbojas, efektivitāte ir no 30 % līdz 50 %. Modelētai siltumnīcu sistēmai (Ceylan and Devrim, 2021). *PEMFC* elektriskā efektivitāte bija 48 %, kas atbilst iepriekš definētajām robežām, tāpēc tika izmantota analīzei.

LCA pētījumā par saules *PEMFC* sistēmu tika aprēķināts kurināmā elementu darbības laiks 1691 h/gadā (Zhang et al., 2022), kas tika izmantots kā ievades dati. Šai sistēmai atskaites punkts bija Ķīna, tāpēc ES valstīs šis skaitlis varētu būt atšķirīgs, jo tas ir atkarīgs no saules starojuma. Tāpat nav zināms, vai šis ir pilnas slodzes darba laiks.

PV paneļu efektivitāte pēdējos gados ir uzlabojusies. Vidējā efektivitāte 2006. gadā bija 13 % daudzkrīstāliskiem *PV* paneļiem un 15% monokrīstāliskiem *PV* paneļiem, savukārt 2018. gadā tā bija attiecīgi 17 % un 18 % (IRENA, 2019). Tiek prognozēts, ka šī augšupejošā tendence turpināsies līdz 2030. gadam. Kā ievades dati tika izmantota monokrīstālisko *PV* paneļu efektivitāte.

Jaudas koeficients izmantots, lai aprēķinātu *PV* paneļu pilnas slodzes darba stundas. Jaudas koeficients atspoguļo attiecību starp elektrostacijas faktisko un maksimālo iespējamo elektroenerģijas ražošanu. To iegūst, dalot pilnas slodzes darbības laiku ar stundu skaitu gadā. Vidējais jumta *PV* paneļu jaudas koeficients ES-27 ir 15 % (Badouard et al., 2020). Jaudas koeficients ir ļoti atkarīgs no valsts. Visaugstākie rādītāji ir Grieķijā un Portugālē – 17–20 %, bet Vācijā un Francijā – 12–16 %. Ziemeļvalstīs, piemēram, Polijā un Nīderlandē, jaudas koeficienti ir zem 12 %. Reizinot vidējo jaudas koeficientu ar stundu skaitu gadā, iegūst vidēji 1314 stundas gadā, strādājot ar pilnu jaudu.

Stirlinga dzinēju sistēmām efektivitāte un darba stundas ņemtas no iepriekš izmantotajām izlīdzinātajām enerģijas izmaksām (Teixeira, 2020). Stirlinga dzinējs, kas darbināms ar biomasu, radīja par 88 % vairāk enerģijas nekā saules enerģija. Tas saražoja 4,3 kW ar kopējo efektivitāti

46,7 %, savukārt saules sistēma ģenerēja 2,3 kW ar 31,3 % efektivitāti. Šī pētījuma rezultāti ilustrē enerģijas avota nozīmi, jo tam ir ievērojama ietekme uz Stirlinga dzinēja veiktspēju. Pēc autora izvēles pētījumam tika izvēlēts modelis, kurš iekļau saules sistēmas darbību 2400 stundas gadā, kas atbilst Portugāles reģiona saulaino dienu skaitam. Biomasas katla darbības laiks, balstoties uz literatūras izpēti, noteikts 7000 stundas gadā.

Globālās sasilšanas potenciāls un mūža ilgums

Salīdzinot dažādas kurināmā šūnas, *PEMFC* ir samērā augsts globālās sasilšanas potenciāls – *GWP PEMFC* (2 kW) ir 0,75 kg CO₂ eq/kWh, cietā oksīda kurināmā elementiem (125 kW) ir 0,52 kg CO₂ eq/kWh un kausētā karbonāta kurināmā elementiem (500 kW) ir 0,55 kg CO₂ eq/kWh (*Abdelkareem et al.*, 2021). Šajā gadījumā tas ir tāpēc, ka ūdeņradi ražo no fosilā kurināmā. Ūdeņraža ražošana būtiski ietekmē kurināmā elementu sistēmas ietekmi uz vidi (*Abdelkareem et al.*, 2021). *R. Stropnik et al.* veica 1 kW *PEMFC* sistēmas *LCA* pētījumu no ražošanas līdz utilizācijai (*cradle-to-gate*) (*Stropnik et al.*, 2022). Tika salīdzināti dažādi ūdeņraža ieguves veidi – ES-28, izmantojot hidroelektrostacijas, ES-28 izmantojot vēja elektrostacijas, izmantojot saules elektrostacijas un sintizējot no dabasgāzes. Tika apsvērta arī *PEMFC* pārveide statiskās un dinamiskās sistēmās (autotransporta izmantošana). Rezultāti parāda globālās sasilšanas potenciālu 0,71 kg CO₂ eq/kWh statiskai dabasgāzes sistēmai, 0,03 kg CO₂ eq/kWh statiskai hidrosistēmai, 0,04 kg CO₂ eq/kWh statiskai vēja sistēmai un 0,24 kg CO₂ eq/kWh statiskai saules sistēmai. Saules kurināmā elementu sistēmai tikai 4 % bija ražošanas un tehnoloģiju nomaiņas posmiem. Atlikušie 96 % bija paredzēti darbības fāzei, kurā ņemta vērā ūdeņraža ražošana. *PEMFC* tehnoloģijas kalpošanas laiks ir aptuveni pieci gadi (*Nagapurkar and Smith*, 2019).

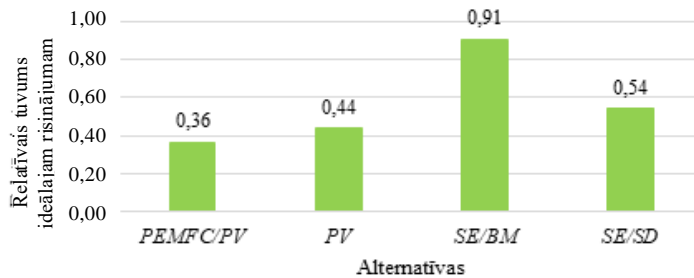
Pētījums par *PV* jumta paneļu ietekmes uz vidi novērtējumu Eiropā izmantots, lai noteiktu *PV* paneļu globālās sasilšanas potenciālu (*Martinopoulos*, 2020). Aplūkotas tipiskās 4 kW *PV* sistēmas dažādās Eiropas valstīs. Kopumā aptvertas 79 vietas 26 valstīs. *GWP* bija robežās no 0,02 kg CO₂ eq/kWh līdz 1,19 kg CO₂ eq/kWh. Vismazākā ietekme konstatēta tādās valstīs kā Islandē un Norvēģijā, savukārt lielākā ietekme bija Polijā un Grieķijā. Vidējais *GSP* attiecīgajās valstīs bija 0,60 kg CO₂ eq/kWh. Jumta saules *PV* sistēmu kalpošanas laiks ir 25 gadi (*Badouard et al.*, 2020).

Stirlinga dzinēju sistēmu ietekme uz vidi ir atkarīga arī no degvielas veida. Saules enerģijas sistēmai izvēlēts pētījums par tīklā pieslēgtu Stirlinga saules koncentratoru (33 kW), kas atrodas Palermo Universitātes pilsētiņā, Itālijā (*Backes et al.*, 2021). Iegūtais globālās sasilšanas potenciāls ir 30,15 kg CO₂ eq/MWh ar sistēmas robežām no šūpuļa līdz vārtiem. Galvenie emisiju faktori bija elektroniskie komponenti (16 %) un konstrukcijā izmantotais tērauds (37 %). Stirlinga dzinēju sistēmai, kas darbināma ar biomasu, izvēlēts *LCA* pētījums par četrām mikromēroga (100 kW) koģenerācijas stacijām, kuras darbina skujkoku meža atliekas (*Ahmadi, Kannangara and Bensebaa*, 2020). Šīs sistēmas jauda ir lielāka par šajā pētījumā noteikto ierobežojumu, taču netika atrasti piemēroti pētījumi par šāda veida sistēmām. Sistēma sastāv no tiešas biomasas

sadedzināšanas un Stirlinga dzinēja. Rezultātā iegūtais *GSP* bija 0,12 kg CO₂ eq/kWh. Siltuma un elektroenerģijas sadalei ir vislielākā ietekme uz kopējām dzīves cikla emisijām. Abās sistēmās tiek izmantots Stirlinga dzinējs, kura paredzamais kalpošanas laiks ir 20 gadi (*Teixeira*, 2020).

TOPSIS

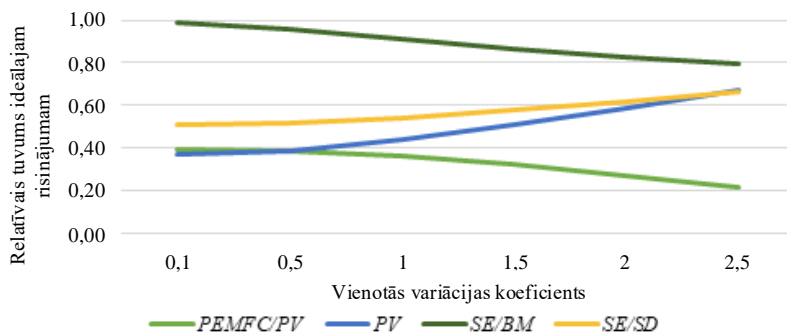
Pēc datu apkopošanas tika veikti *TOPSIS* aprēķini. Rezultāti grafiski parādīti 3.5. attēlā. Analīze atklāja, ka ar biomasu darbināmajam Stirlinga dzinējam ir visaugstākais relatīvais tuvums ideālajam risinājumam, kas padara to par vislabāko alternatīvu. Pārējās sistēmas uzrādīja ievērojami mazāk apmierinošus rezultātus. Kurināmā elementu saules sistēma uzrādīja sliktāko sniegumu. Secību starp labākajām un sliktākajām sistēmām var paredzēt, ja tiek pārbaudīti ievades dati. Kā redzams 3.2. tabulā, Stirlinga dzinēju sistēmai, kas darbināma ar biomasu, ir vislielākais ideālo vērtību skaits un nav anti-ideālo vērtību.



3.5. att. *TOPSIS* analīzes rezultāti.

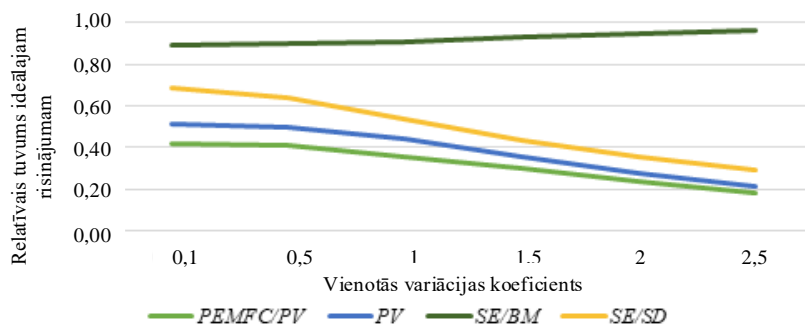
Jutīguma analīze

Jutīguma analīze liecina, ka ar biomasu darbināmā Stirlinga dzinēja rādītājs saglabājas samērā stabils pat tad, ja tiek mainīts kritēriju svars, izņemot kalpošanas laika kritēriju, kas uzrāda nelielu punktu skaita kritumu. Stikāka informācija skatāma 3.6. attēlā. Tomēr šī sistēma joprojām ir vislabākā alternatīva. Analīze liecina, ka ar biomasu darbināmā Stirlinga dzinēja sistēma nav jutīga pretietekmes svāra izmaiņām un joprojām būtu vislabākā alternatīva, ja kritēriju svāri nebūtu vienādi.



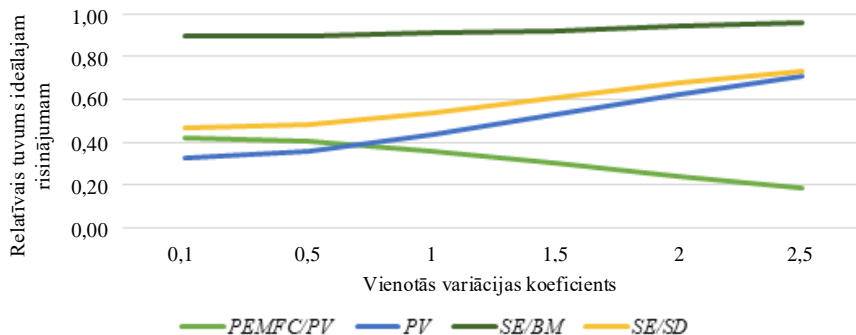
3.6. att. Darbības laika kritēriju jutīguma analīzes rezultāti.

Citas alternatīvas ir jutīgākas pret ietekmes svārstībām. Relatīvais tuvums ideālajam risinājumam un klasifikāciju sadalījums ievērojami mainās, mainoties kritēriju svērumiem. Uzticamība ir vienīgais kritērijs, kas saglabā nemainīgu kārtību, mainoties kritērija svaram, kā parādīts 3.7. attēlā.



3.7. att. Uzticamības kritēriju jutīguma analīzes rezultāti.

Visos gadījumos, kad kritērijam ir samazināta ietekme, kas nozīmē, ka vienotās variācijas koeficients ir 0,01, ar saules enerģiju darbināmais Stirlinga dzinējs joprojām ir otra labākā alternatīva. Šādā gadījumā PV un kurināmā elementu sistēmas apmainās ar vietām LCOE un kalpošanas laika kritēriju analīzē, t. i., PV nolaižas līdz pēdējai vietai, bet PEMFC/PV pārceļas uz trešo vietu. LCOE kritērija analīzes rezultāti ir parādīti 3.8. attēlā.



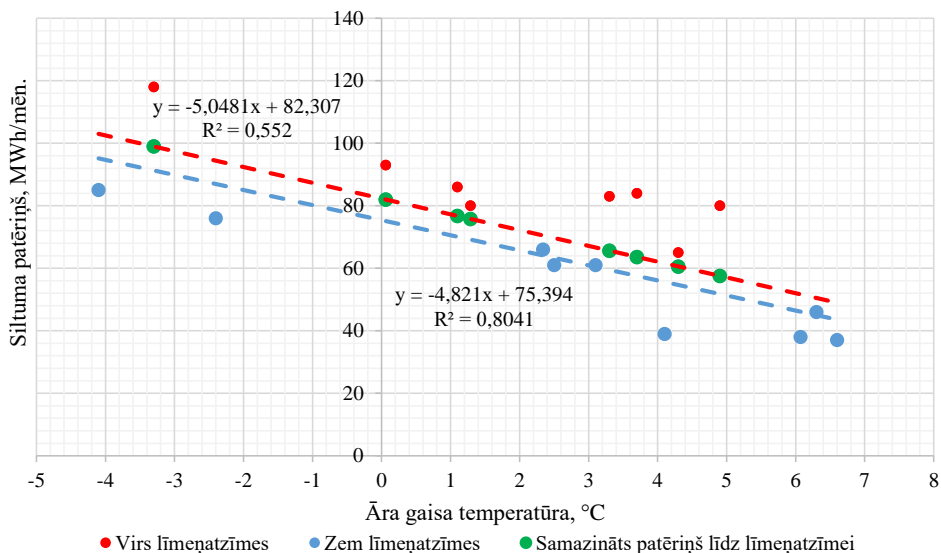
3.8. att. Enerģijas kritēriju izlīdzināto izmaksu jutīguma analīzes rezultāti.

Ja kritērijiem tiek piešķirta liela ietekme (vienotās variācijas koeficients ir 2,5), visām alternatīvām, izņemot ar biomasu darbināmo Stirlinga dzinēju, ir mainīga pakāpe. *PEMFC/PV* alternatīva no ceturtais pakāpjas uz otro vietu efektivitātes un *GWP* kritēriju jutīguma analīzē. *PV* pēc tādiem pašiem kritērijiem ieņem ceturto vietu. Ar vienotu variācijas koeficientu 2,5 ar saules enerģiju darbināmais Stirlinga dzinējs ir trešajā vietā pēc trim analizētajiem kritērijiem (efektivitāte, *GWP* un kalpošanas laiks).

3.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance

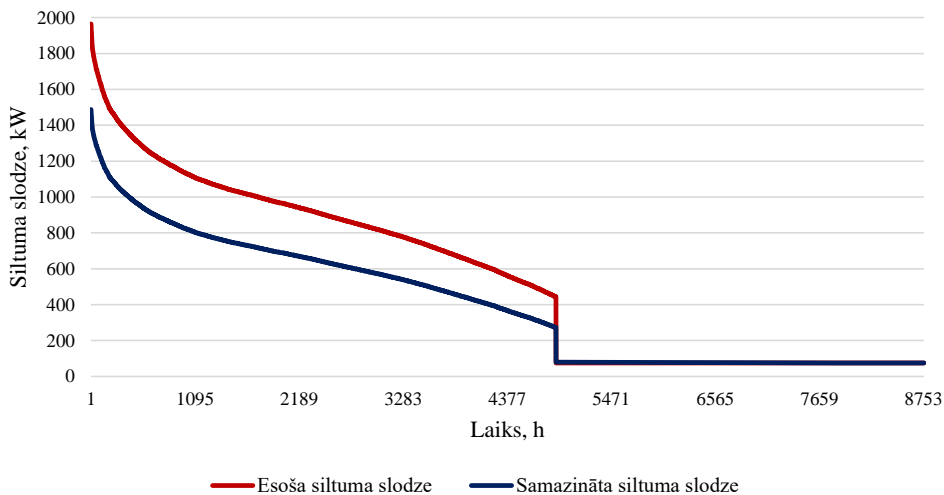
Siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņa samazināšana

Pamatojoties uz Q patēriņa analīzi (skatīt 2.3. apakšnodaļu), izvēlētajām ēkām noteiktas iespējas tā samazināšanai. 3.9. attēlā redzams, ka līmeņatzīmēm izvēlēta noteikta regresijas līkne (sarkanā līkne), kas raksturo Q patēriņu atkarībā no āra gaisa temperatūras pašreizējā situācijā. Attiecīgi viss patēriņš virs korelācijas līknes (sarkani punkti) uzskatāms par nepamatotu un samazināts līdz līmeņatzīmei (zaļi punkti). Q patēriņš zem līknes netiek mainīts (zili punkti). Rezultātā tiek iegūta jauna regresijas līkne (zilā līkne), kas apraksta Q patēriņu atkarībā no āra gaisa temperatūras pēc līmeņatzīmes ieviešanas. 3.9. attēlā parādīts B ēkas siltumenerģijas patēriņš. Aprakstītā aprēķina pieceja piemērota arī citām ēkām.



3.9. att. Modificēta izvēlēto pašvaldības ēku siltumenerģijas patēriņa un āra gaisa temperatūras korelācija apkures sezonā.

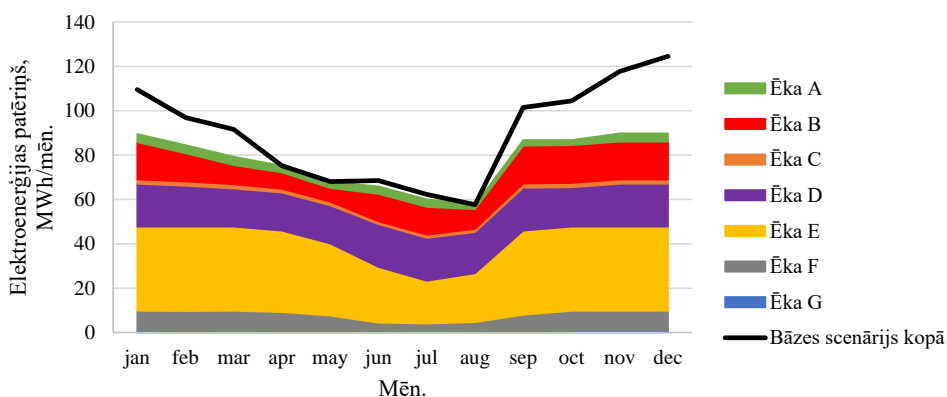
Ņemot vērā korelāciju starp Q patēriņu un āra gaisa temperatūru, ir izveidota siltumslodzes diagramma (3.10. att.). Siltuma slodzes diagramma parāda atšķirību starp dažādu ēku Q pieprasījumu, taču kopējā tendence ir tāda, ka siltumslodzes maksimumi ir salīdzinoši īsi, salīdzinot ar visu apkures sezonu. Tajā pašā laikā šo pīķu ietekme uz apkures sistēmu ir ievērojama. Energotehnoloģiju jauda parasti izvēlēta tā, lai pilnībā segtu īstermiņa Q patēriņa maksimālās stundas. Rezultātā energotehnoloģijas lielāko daļu apkures sezonas strādā ar samazinātu siltuma slodzi. Turklāt energotehnoloģiju jaudas izvēle atbilstoši maksimālajai siltuma slodzei palielina kapitāla izmaksas uzstādīšanas laikā. Dažām ēkām ir Q patēriņš vasaras periodā karstā ūdens sagatavošanai. Siltuma slodze vasarā ir ļoti zema attiecībā pret maksimālo siltuma slodzi ziemā. Šādas siltuma slodzes atšķirības rada papildu izaicinājumu ilgtspējīgas apkures sistēmas izveidei. Līdz ar to Q patēriņa samazināšana sniedz ievērojamus ieguvumus efektīvas energoapgādes sistēmas izveidei.



3.10. att. Izvēlēto pašvaldības ēku kopējā siltumslodze gadā.

Elektrības (E) patēriņš

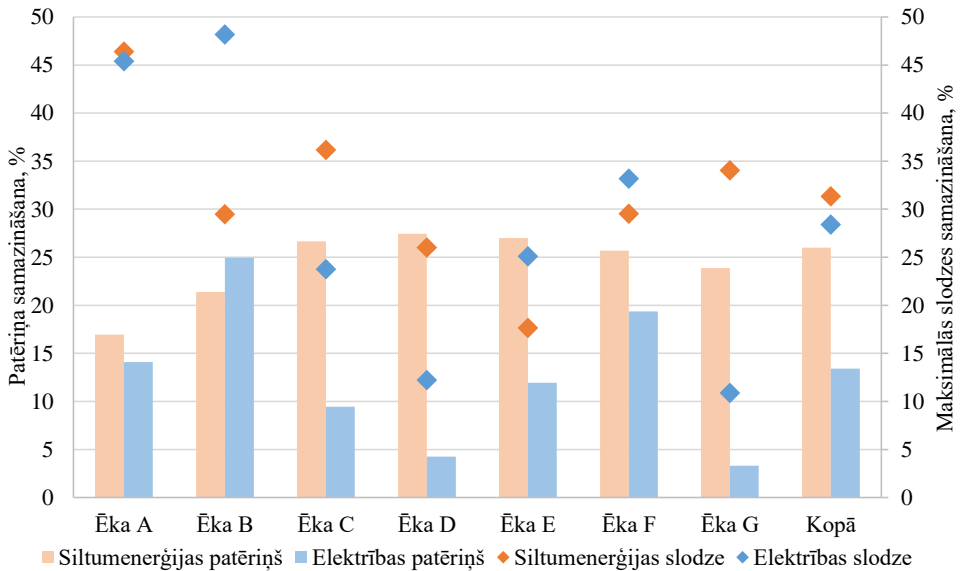
E gadījumā tiek piemērota arī līmeņatzīme E patēriņa samazināšanai. Katrai ēkai kā līmeņatzīme izmantots ikmēneša E patēriņš, kas nedrīkst būt lielāks par vidējo E patēriņu gadā. Tas ierobežo maksimālo E patēriņu un maksimālo elektrisko slodzi. Samazinās arī vidējais E patēriņš gadā (3.11. att.). Lielākais E patēriņa kritums ir vērojams ziemas mēnešos. Maksimālais samazinājums ir decembrī (34,7 MWh). Tajā pašā laikā dažādos mēnešos (aprīlī, maijā, augustā) kopējais E patēriņš paliek nemainīgs.



3.11. att. Izvēlēto pašvaldības ēku ikgadējais elektroenerģijas patēriņš.

Enerģijas samazināšanas iespējas

Piemērojot noteiktas līmeņatzīmes, tiek samazināts gan kopējais Q un E patēriņš, gan maksimālā siltuma un elektriskā slodze. 3.12. attēlā parādīts relatīvais samazinājums starp pašreizējo situāciju un līmeņatzīmēm. Novērotais samazinājums dažādās ēkās ievērojami atšķiras. Tas nozīmē, ka ir patērētāji, kuriem siltuma vai elektriskās slodzes jau ir sabalansētas. Vislielāko samazinājumu var panākt Q patēriņā (kopumā par 26,0 %) un vismazāko samazinājumu E patēriņā (kopumā par 13,4 %). Piķa slodžu samazinājums ir ievērojami lielāks gan siltumslodzes ziņā (vidēji 31,3 %), gan elektriskās slodzes ziņā (vidēji 28,4 %). Tas ir būtisks aspekts gan enerģētiskās drošības palielināšanas kontekstā, gan efektīvas energosistēmas izveidē, jo samazina nepieciešamo energotehnoloģiju uzstādīšanas jaudu, turklāt palielinās energotehnoloģiju efektivitāti (2.9. att.).



3.12. att. Siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņš un maksimālās slodzes samazināšanas iespējas.

Scenāriju izvērtēšana

Iegūtie dati par siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņu, kā arī maksimālajām slodzēm izmantoti energoapgādes scenāriju izvērtēšanai. Scenāriji atšķiras divos līmeņos:

- pēc slodzes (bāzes vai esošā slodze un samazināta slodze (pamatojoties uz noteiktajiem kritērijiem));
- pēc izmantotās enerģijas tehnoloģijas (dabasgāze, Stirlinga dzinējs, saules PV + siltumsūknis, saules kolektori + siltumenerģijas uzkrāšana).

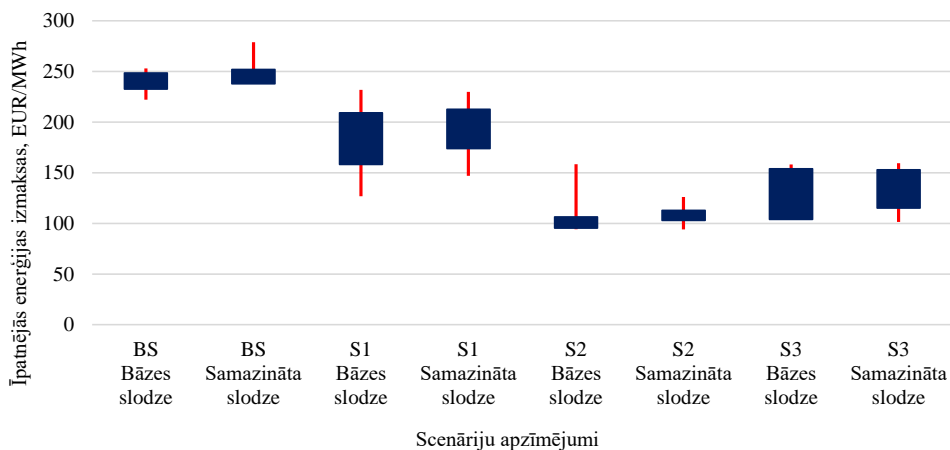
Scenāriji un to raksturojums parādīti 3.3. tabulā.

3.3. tabula

| Izvēlēto scenāriju raksturojums | | |
|---------------------------------|-----------------------|--|
| Enerģijas patēriņš | Scenārija nosaukums | Izmantotās enerģijas tehnoloģijas |
| Bāzes enerģijas patēriņš | Bāzes slodze, BS | Dabasgāzes katls, elektrība no tīkla |
| | Bāzes slodze, S1 | Stirlinga dzinējs |
| | Bāzes slodze, S2 | Saules PV + siltumsūkņi. Stirlinga dzinējs, lai segtu atlikušo slodzi |
| | Bāzes slodze, S3 | Saules kolektori ar akumulācijas sistēmu, Stirlinga dzinējs, lai segtu atlikušo slodzi |
| Samazināts enerģijas patēriņš | Samazināta slodze, BS | Dabasgāzes katls, elektrība no tīkla |
| | Samazināta slodze, S1 | Stirlinga dzinējs |
| | Samazināta slodze, S2 | Saules PV + siltumsūkņi. Stirlinga dzinējs, lai segtu atlikušo slodzi |
| | Samazināta slodze, S3 | Saules kolektori ar akumulācijas sistēmu, Stirlinga dzinējs, lai segtu atlikušo slodzi |

Īpatnējās enerģijas izmaksas

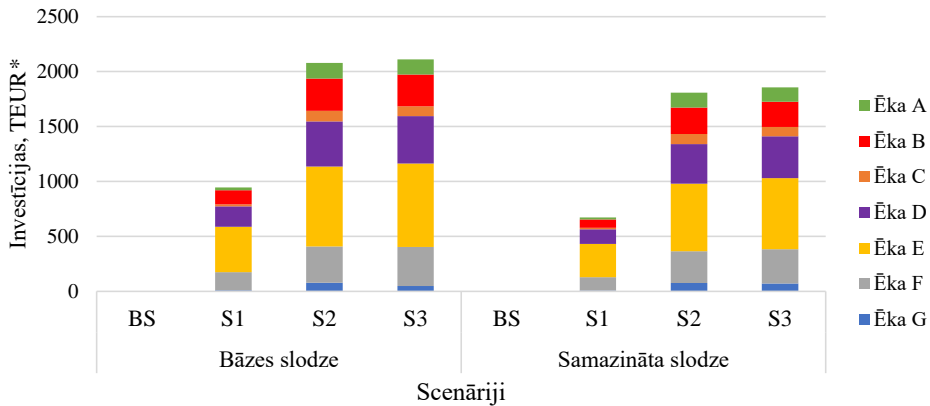
Katram pētījumā iekļautajam scenārijam tika aprēķinātas īpatnējās enerģijas izmaksas. Rezultāti liecina, ka katrā alternatīvajā scenārijā (S1, S2 un S3) šis rādītājs ir zemāks nekā pašreizējā situācijā (Scenārijs BS). 3.13. attēlā ir atspoguļota īpatnējo enerģijas izmaksu izkliede starp visām atlasītajām ēkām, kas ņemtas vērā visos scenārijos. Scenārijam S1 ar SE ir vislielākā izkliede, kas liecina, ka šī tehnoloģija var būt piemērota sasniegt augstus rezultātus noteiktos priekšnosacījumos (izlīdzināts Q un E patēriņš bez maksimumiem, vasaras karstuma slodze) un atbilstošām Q un E patēriņa attiecībām. Scenārijs BS ir visneizdevīgākais variants (vidējais rādītājs ir 241 EUR/MWh pie bāzes slodzes un 245 EUR/MWh pie samazinātas slodzes). Izdevīgākā alternatīva ir S2 scenārijs: ieviešot šajā scenārijā piedāvātās tehnoloģijas, īpatnējās enerģijas izmaksas vidēji samazināsies līdz 101 EUR/MWh pie bāzes slodzes un 108 EUR/MWh pie samazinātas slodzes. Slodzes samazinājums ļauj samazināt enerģijas patēriņu, bet tas noved pie īpatnējo izmaksu pieauguma. Apskatāmā scenārija pieaugums nav būtisks – tas ir vidēji no 4 EUR/MWh līdz 10 EUR/MWh.



3.13. att. Izvēlēto scenāriju īpatnējās enerģijas izmaksas.

Kopējās investīcijas

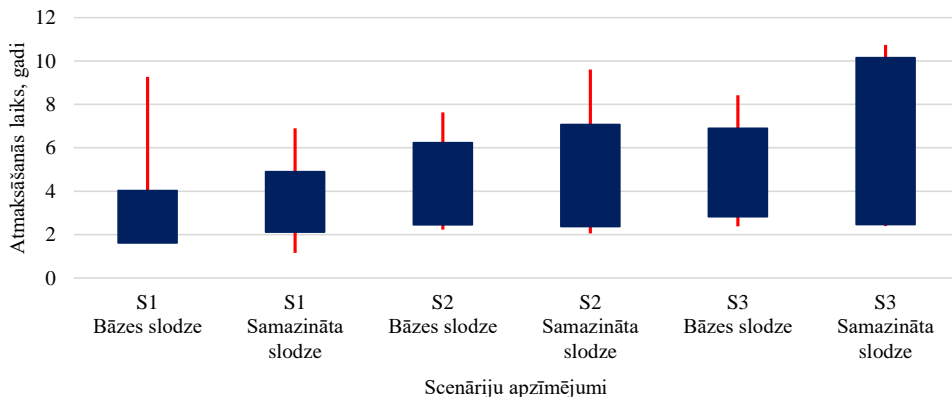
S1, S2 un S3 scenārijiem nepieciešamas jaunas enerģijas tehnoloģijas, kas prasa ieguldījumus. Investīcijas tika aprēķinātas, pamatojoties uz 2.4. tabulā sniegtajiem datiem. BS scenārijs ir balstīts uz pašreizējo situāciju un izmantotajām energotehnoloģijām, tāpēc papildu investīcijas nav nepieciešamas. 3.14. attēlā parādīti kumulatīvie ieguldījumi – vērtību summa katrai izvēlētajai ēkai katrā scenārijā. Jo lielāks Q un E patēriņš ēkā, jo lielākas ir investīcijas. Zemākais rādītājs ir S1 scenārijam, jo tajā paredzēts izmantot tikai vienu hibrīdtehnoloģiju – granulu katlu ar SE (945 *TEUR* pie bāzes slodzes un 674 *TEUR* pie samazinātas slodzes). Indikators atspoguļo gan granulu katla, gan Stirlinga dzinēja uzstādīšanas izmaksas. Ievērojami lielākas investīcijas ir S2 un S3 scenārijos, jo papildus tiek izmantotas saules tehnoloģijas – S2 scenārijā saules PV ar HP un S3 scenārijā saules kolektori ar TES. Vislielākās kumulatīvās investīcijas tiek prognozētas S3 scenārijam (attiecīgi 2110 un 1856 *TEUR* uz bāzes un samazinātas slodzes). Scenārijam S2, kas ir visrentablākais no darbības viedokļa, tas ir divreiz dārgāks nekā S1 scenārijs. Scenārijos ar samazinātu slodzi kapitāla veidošana ir mazāka nekā scenārijos ar bāzes slodzi.



3.14. att. Kopējās investīcijas scenārija īstenošanai (* TEUR – eiro tūkstošu vienībās).

Atmaksāšanās periods

Atmaksāšanās periods ir rādītājs, kas palīdz raksturot scenārija dzīvotspēju un ienesīgumu – jo īsāks tas ir, jo ātrāk scenārija īstenošana segs investīcijas. Atmaksāšanās laiks ir atkarīgs no investīciju apjoma un enerģijas ražošanas izmaksām. Jo zemākas ir investīciju un ražošanas izmaksas, jo īsāks atmaksāšanās laiks. Scenārijs BS neietver papildu investīcijas, tāpēc arī nav laika ieguldījumu atmaksai (3.15. att.), ņemot vērā investīciju apjomu. Vidēji īsākais atmaksāšanās periods, ņemot vērā visas pašvaldības ēkas, ir S1 scenārijam, kas ir attiecīgi trīs un četri kalendārie gadi pēc bāzes un samazinātas slodzes. Tas ir saistīts ar mazākiem ieguldījumiem, jo S1 scenārija enerģijas ražošanas izmaksas ir augstākas nekā S2 un S3 scenārijiem.



3.15. att. Atlasīto scenāriju atmaksāšanās periods.

Dažādām ēkām S1 scenārija ieviešana atmaksāsies deviņu gadu laikā. Ēkas ar garāko atmaksāšanās periodu ir tās ēkas, kurām siltumenerģijas attiecība pret elektroenerģijas patēriņu būtiski atšķiras no siltumenerģijas un elektrības slodzes attiecības SE, enerģijas patēriņš izteikts maksimumos vai nav vasaras siltumenerģijas patēriņa. Visilgākais atmaksāšanās periods ir S3 scenārijam ar vidējām vērtībām uz bāzes un samazinātu slodzi attiecīgi piecos un sešos kalendārajos gados. S2 scenārijam rādītājs ir attiecīgi no četriem līdz pieciem kalendārajiem gadiem pēc bāzes un samazinātas slodzes. Scenārijos ar samazinātu slodzi atmaksāšanās periods ir nedaudz ilgāks nekā scenārijiem ar bāzes slodzi. Tas ir saistīts ar nedaudz augstākām īpatnējām enerģijas izmaksām.

Investīciju ietekme

Emisijas faktori

Kā minēts iepriekš, pētījumā katrs scenārijs tika izvērtēts, ne tikai pamatojoties uz tehniskajiem priekšnosacījumiem un ekonomiskajiem faktoriem, bet arī analizēta ietekme uz vidi. Dažāda kurināmā izmantošana rada atšķirīgu ietekmi uz vidi. Biomasa S1, S2 un S3 scenārijiem rada CO, NO_x un PM emisijas, jo tika pieņemts, ka Stirlinga dzinējs ir uzstādīts granulu katlā. PM emisijas veidojas kokskaidu granulu sadedzināšanas rezultātā. Šos emisijas faktorus var redzēt 3.4. tabulā. Salīdzinot biomasas un dabasgāzes emisijas, var secināt, ka dabasgāzes dedzināšana rada mazāk CO un NO_x emisiju uz enerģijas vienību, bet CO₂ daudzums ir ievērojams. Biomasa tiek uzskatīta par oglekļa neitrālu kurināmo. Svarīgi atzīmēt, ka tabulā norādītie emisijas faktori attiecas uz kopējo saražotās enerģijas daudzumu, kas noteiktā proporcijā ietver gan Q , gan E . Ņemot vērā, ka biomasas gadījumā šis energoresurss tiek izmantots vienlaikus, emisijas koeficienti nav izdalīti katram enerģijas veidam, bet attiecināti uz kopējo enerģijas daudzumu.

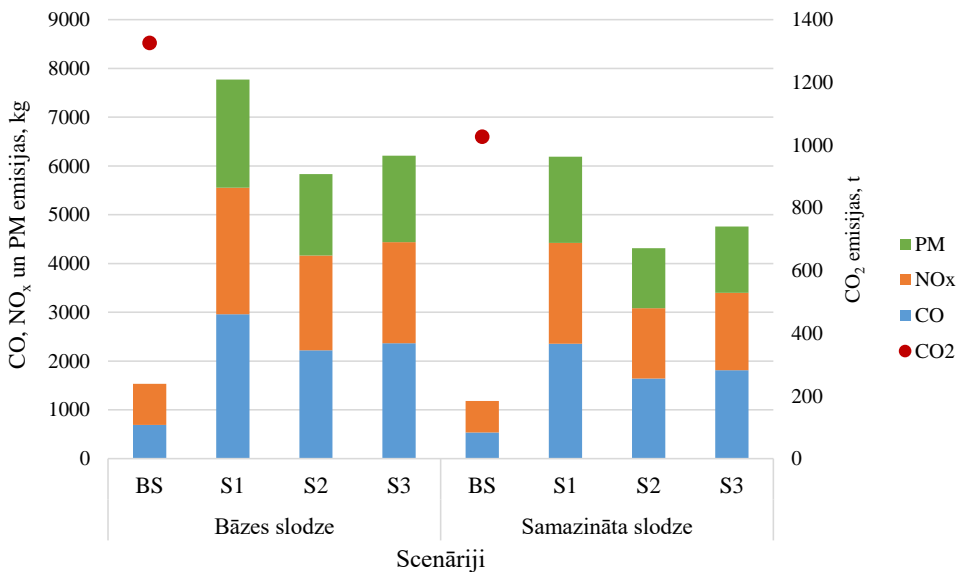
3.4. tabula

Emisijas faktori atkarībā no scenārijiem

| Scenāriji | | CO, g/MWh | NO _x , g/MWh | PM, g/MWh | CO ₂ , kg/MWh |
|----------------------|----|--------------|-------------------------|--------------|-----------------------------|
| | BS | 117 | 142 | 0 | 224 |
| Bāzes slodze | S1 | 521 | 456 | 391 | 0 |
| | S2 | 378 | 331 | 283 | 0 |
| | S3 | 416 | 364 | 312 | 0 |
| Samazināta slodze | BS | 119 | 144 | 0 | 229 |
| | S1 | 536 | 469 | 402 | 0 |
| | S2 | 362 | 317 | 271 | 0 |
| | S3 | 434 | 380 | 326 | 0 |

Kopējais izmešu daudzums

Scenāriju kopējā ietekme uz vidi ir atkarīga no izmantotā energoresursa veida un izmantotā energoresursa daudzuma. Kopējā emisiju daudzuma aprēķināšanai izmantotas 3.4. tabulā norādītās emisijas faktoru vērtības, zinot kopējo enerģijas patēriņu katram scenārijam. Scenārijiem ar samazinātu slodzi ir mazāks enerģijas patēriņš, tāpēc arī kopējais saražoto izmešu daudzums ir mazāks (3.16. att.), dabasgāzes izmantošana scenārijā BS rada CO un NO_x emisijas – 691 kg un 534 kg gadā bāzes slodzes gadījumā un 841 kg un 649 kg samazinātas slodzes gadījumā. Salīdzinot ar biomasu (S1 scenārijs), dabasgāzes CO emisijas ir aptuveni četras reizes mazākas, savukārt NO_x emisijas ir aptuveni trīs reizes mazākas. Turklāt biomasu rada arī ievērojamu daudzumu PM emisiju. Jāņem vērā, ka dabasgāzes sadedzināšanas laikā izdalās liels CO₂ daudzums. Bāzes slodzes gadījumā scenārijā BS tiek saražotas 1326 tonnas CO₂ emisiju un 1026 tonnas CO₂ emisiju samazinātas slodzes gadījumā. S2 un S3 scenārijā saules tehnoloģiju izmantošana samazina biomasas patēriņu, kas samazina arī gaisa piesārņojumu. Vismazākais kopējais CO, NO_x un PM daudzums tiek saražots S2 scenārijā: 2222 kg CO emisiju, 1944 kg NO_x emisiju un 1667 kg PM emisiju bāzes slodzes gadījumā un 1644 kg CO emisiju, 1438 kg NO_x emisiju un 1233 kg PM emisiju samazinātas slodzes gadījumā.

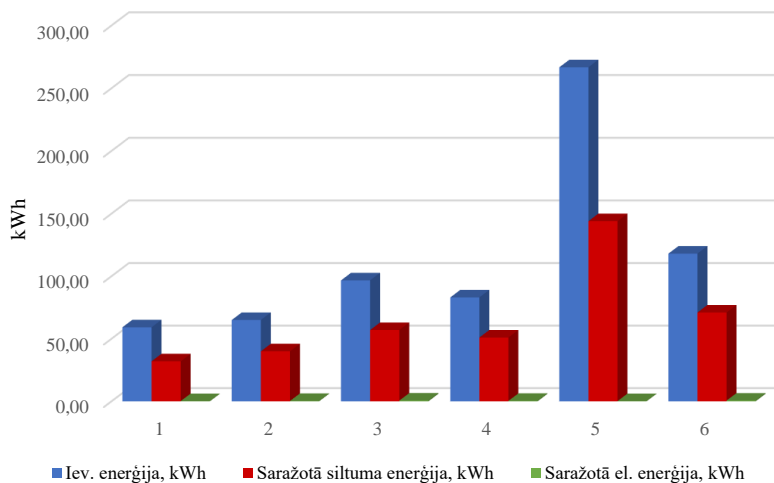


3.16. att. Kopējais atlasīto scenāriju emisiju apjoms.

3.4. Eksperimentāla izpēte

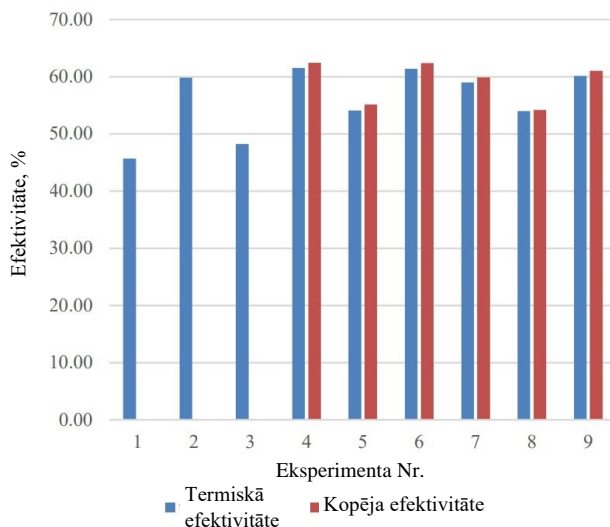
1. eksperiments: Stirlinga dzinēja darbības izpēte

Katla termiskās un summārās koģenerācijas režīma efektivitātes noteikšanai izmantots dažāds kurināmā mitrums un ievadītā malkas masa. Lai noteiktu koģenerācijas režīma ietekmi uz apkures katlu, veikti eksperimenti termiskajā un koģenerācijas režīmā, izmantojot kurināmo ar tādiem pašiem parametriem, kā aprakstīts 2.5. tabulā. Trīs eksperimenti (1–3, 2.5. tabula) veikti tikai siltumenerģijas ražošanas režīmā, savukārt eksperimenti (4–9) veikti koģenerācijas režīmā. Katrā eksperimentā veikti termiskās un elektriskās efektivitātes aprēķini. Veikts pievadītās enerģijas (malkas) un izmērītās siltumenerģijas un elektroenerģijas izlaides salīdzinājums. Eksperimentu rezultāti ir parādīti 3.17. attēlā, kur redzams, cik daudz enerģijas tika ievadīts ar kurināmo (koksni) un cik daudz siltumenerģijas un elektroenerģijas tika saražots katrā eksperimentā, izsakot kWh, efektivitāti (%). Elektroenerģijas ražošana ir katrā no eksperimentālajiem gadījumiem. Papildus aprēķināts, cik vidēji siltumenerģijas un elektroenerģijas eksperimentālā iekārta spēj saražot no 1 kg koksnes.



3.17. att. Ražotā siltumenerģija un elektroenerģija no ievadītās enerģijas.

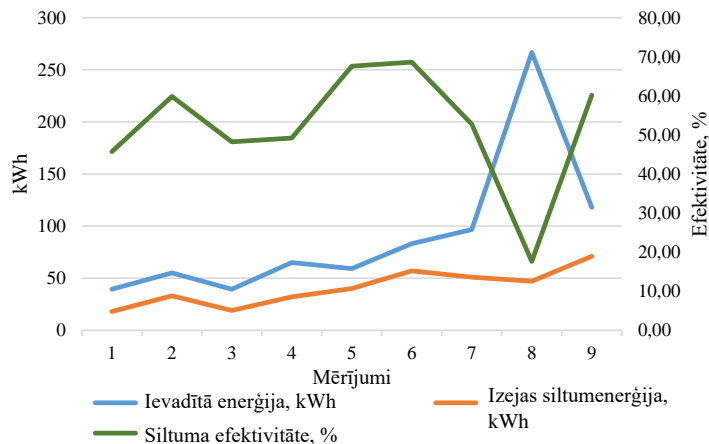
No 3.17. attēlā redzamajiem eksperimenta rezultātiem aprēķināta sistēmas termiskā un summārā (siltuma + elektriskā) efektivitāte, kas izteikta (%) (3.18. att.).



3.18. att. Termiskā un summārā koģenerācijas režīma efektivitāte.

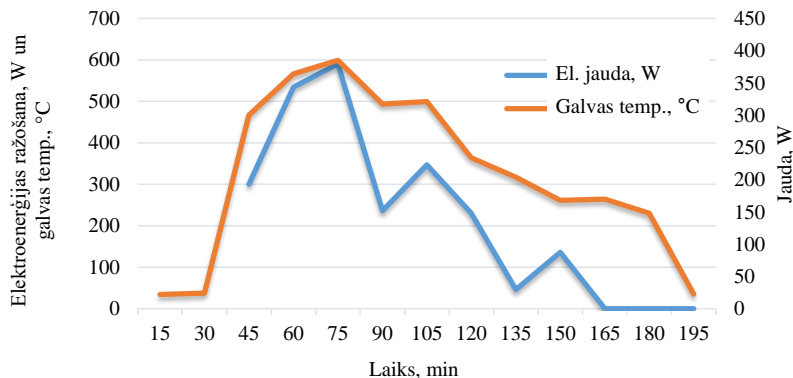
Izvērtējot eksperimentu rezultātus (2.5. tab.), netika konstatēta elektroenerģijas ražošanas koģenerācijas režīma ietekme uz katla siltumražīgumu (3.19. att.). Šie secinājumi varētu būt iespējami katla specifiskās konstrukcijas dēļ, jo daļa no siltumenerģijas tika reģenerēta no Stirlinga dzinēja dzesēšanas kontūra, tāpēc tas nodrošina papildu siltuma savākšanas virsmu. Šie elektroenerģijas ražošanas rādītāji (3.17. att.) ietver katla pašpatēriņu, kas ir aptuveni 180 W (*Maga s. r. o.*, 2021). Eksperimentos 4–9 netika konstatēti ievērojami siltuma jaudas zudumi. Iepriekšminētais liek secināt, ka stacijas darbība koģenerācijas režīmā palielina iekārtas kopējo efektivitāti (3.17. att.), salīdzinot ar identiskiem katliem (*Thomas et al.*, 2018), (*Priedniece et al.*, 2017), kuri darbojas tikai siltumenerģijas ražošanas režīmā.

Izvērtējot emisijas no apkures sistēmas (2.11.att.), CO₂ un O₂ mērījumi dūmgāzēs veikti ik pēc 15 minūtēm visa eksperimenta laikā ar dūmgāzu analizatoru *Testo 340*. Emisijas mērījumi veikti, kā aprakstīts metodoloģijā (*Zhu et al.*, 2018). Novērots kvalitatīvs degšanas process, stabilā degšanas procesā no 30 min līdz 180 min. (3.19. attēlā), kas atbilst “A” klases katlu standartiem (*WoodCo Energy Ireland*, 2017).



3.19. att. Katla termiskā efektivitāte.

Stirlinga dzinēja produktivitāte noteikta, izmantojot *Stirling Engine Data Viewer* programmatūru, reģistrējot datus ik pēc 15 minūtēm. Saskaņā ar plānu (2.5. tab.) eksperimentos izmantoti dažādi kurināmā veidi un mitruma saturs. Papildus tika pārbaudītas malkas un zāģskaidu briekšu kombinācijas.

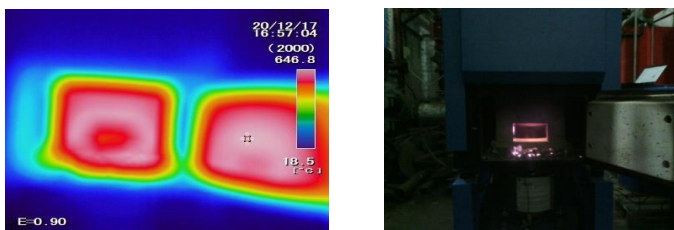


3.20. att. *MCHP* elektroģenerators jauda (zilā līnija) atkarībā no dzinēja galvas temperatūras (sarkanā līnija) (dati no reprezentatīvākā eksperimenta Nr.7).

Eksperimenta gaitā konstatēta korelācija starp Stirlinga dzinēja galvas temperatūru un ģenerators saražoto elektroenerģiju no 4. līdz 9. eksperimentam (3.17. att.). Viens no reprezentatīvākajiem eksperimenta rezultātiem ir parādīts 3.20. attēlā 90 un 150 eksperimenta minūtēs. Noskaidrots, ka elektroenerģijas ražošana strauji samazinās ar relatīvi vienmērīgu temperatūras kritumu un pēc tam palielinās, temperatūrai nedaudz palielinoties. Mērījumi veikti 13

reizes ik pēc 15 minūtēm, kurināmais tika ievadīts tikai pirms katla iekurināšanas un eksperimenta laikā netika papildināts, kas izskaidro lēni krītošo temperatūras līkni. *MCHP* ierīces darbība uzraudzīta ar analītisko aprīkojumu un programmatūru, kas izmantota (Priediece *et al.*, 2018) darbā.

Lai eksperimenta laikā noteiktu katla temperatūru stabilā koģenerācijas režīmā, veikti temperatūras mērījumi ar *IR* termokameru *Infrec Analyzer LT*.



3.21. att. Degkameras termogramma un fotoattēli.

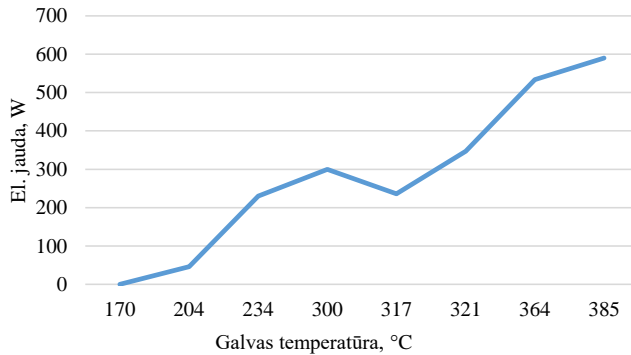
Mērot sadegšanas kameras temperatūru ar termokameru, konstatēta tieša korelācija starp sadegšanas kameras temperatūru un dzinēja radīto elektrisko jaudu. Eksperimenta labākais rezultāts (7. eksperimenta 5. mērīšanas epizodē) bija 590 W_{el}, neskaitot iekārtas pašpatēriņu (aplēsts, ka tas svārstās no 70 W līdz 150 W atkarībā no iekārtas darbības režīma), pašas degkameras temperatūra bija aptuveni 600 °C (3.21. att.) un dzinēja galvas temperatūra 385 °C, kas iegūta no *Data Viewer* programmatūras saskaņā ar (Kazulis *et al.*, 2018).

2. eksperiments: Stirlinga dzinēja apvienošana ar saules paneli

Elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana

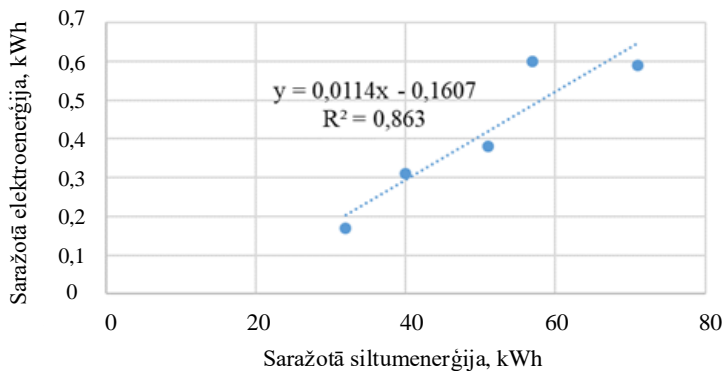
MCHP ražotā siltumenerģija un elektriskā enerģija

Pamatojoties uz ikmēneša vidējās gaisa temperatūras izmaiņām (LVĢMC, 2021), gada laikā mainās apkures iekārtu lietošanas intensitāte. Pētījumā izmantotās *mCHP* stacijas elektroenerģijas ražošana ir tieši saistīta ar katla siltumenerģijas ražošanu. Elektroenerģijas ražošana kā *mCHP* Stirlinga dzinēja galvas temperatūras funkcija ir parādīta 3.22. attēlā.



3.22. att. Elektroenerģijas ražošanas no Stirlinga dzinēja ģeneratora.

Pētījuma gaitā veikti eksperimenti, kuru mērķis bija noskaidrot, cik siltuma un elektroenerģijas *mCHP* iekārta spēj saražot koģenerācijas režīmā. Rezultātā iegūts regresijas vienādojums, kas atspoguļo Stirlinga dzinēja elektrisko jaudu atkarībā no termiskās jaudas.



3.23. att. Saražotās elektroenerģijas un siltumenerģijas sakarība.

PV paneļu sistēmas saražotā elektrība

Lai noteiktu faktisko *PV* paneļu saražotās elektroenerģijas apjomu, savākti dati no eksperimentāli uzstādītās 1,2 kW saules paneļu sistēmas (2.7. tab.). Ņemot vērā, ka eksperimentālā *PV* sistēma uzstādīta ārpus tīkla, tā neskaita saražoto elektroenerģiju bez patēriņa vai tad, kad akumulatoru sistēma ir pilnībā uzlādēta. Pamatojoties uz iepriekš minēto, tiek uzskaitīti un nodoti tīklā dati par citām Latvijā un Ziemeļeiropā uzstādītajām saules paneļu sistēmām, kas ir pieslēgtas tīklam, un visa saražotās elektroenerģijas dati tiek analizēti. Turpmākajiem aprēķiniem izmantoti dati no tīklam piesaistītajām sistēmām (Telicko, Heincis and Jakovics, 2020).

Atbilstoši eksperimenta rezultātiem, aprēķināts, ka, stacijai darbojoties koģenerācijas režīmā, gadā tiktu saražotas 1014 kWh elektroenerģijas.

Mērīšanas metodes un precizitāte

Izmantota analītiskā iekārta – siltumenerģijas skaitītājs *Sontex supercal 739*, kas nodrošina +/- 3 % precizitāti.

VEXON 140D skaitītāja izmantots publiskajā tīklā nodotās elektroenerģijas uzskaitēi, nodrošinot +/-1 % precizitāti.

Stirlinga dzinēja elektro ģeneratora momentānā jauda un tīklam nodotās elektroenerģijas daudzuma noteikšanai tika izmantota *Stirling Engine Data Viewer* programmatūra, saņemot datus no iebūvētiem siltum sensoriem, kuru precizitāte ir +/-1 %.

Iekrautā kurināma svara noteikšanai izmantoti kalibrēti 200 kg mehāniskie svāri ar precizitāti +/-3 %.

Kurināmā temperatūra ir pieņemta identiska istabas temperatūrai, jo kurināmais jau sen atrodas vienā telpā ar siltummezglu, mērījumiem izmantots digitālais termometrs *Sonex*, kura precizitāte ir +/-2 %.

Koksnes mitrums mērīts ar portatīvo mitruma mērītāju *iCraft*, pārbaudot katru malkas pagali, kura (precizitāte ir +/-5 %).

Turpgaitas/atgaitas temperatūra fiksēta ar katlā iebūvētiem temperatūras sensoriem, kuru precizitāte ir +/-2 %.

Dūmgāzu temperatūra nolasīta no katlā iebūvētajiem sensoriem, kuru precizitāte ir +/-3 %.

Dūmgāzu sastāvs mērīts ar kalibrētu analizatoru *Testo 340*, kļūdas robeža 0,2 % pēc tilpuma.

Lai samazinātu analītisko iekārtu neprecizitātes ietekmi uz datu nobīdi, katra eksperimenta laikā mērījumi veikti ik pēc 15 minūtēm. Vidēji vienā eksperimentā veikti 15 mērījumi, tāpēc secināms, ka datu precizitāte ir mazāka par iekārtas maksimālo neprecizitātes diapazonu.

Mājsaimniecības enerģijas pieprasījums

Aprēķināts mājsaimniecības vidējais gada siltuma un elektroenerģijas pieprasījums. Šajā apakšdaļā modelēti scenāriji, lai segtu šīs slodzes, sasniedzot elektroenerģijas un siltumenerģijas pieprasījuma nulles neto līdzsvaru. Sākotnējais aprēķins rāda, ka gada enerģijas patēriņš ir aptuveni 39 MWh, un 3516 kWh elektroenerģijas patēriņš ir gadā.

mCHP saražotā elektrība

Kā norādīts 2.4. apakšnodaļā, *mCHP* sistēmas elektroenerģijas ražošana ir tieši atkarīga no katla siltumenerģijas, kā rezultātā kopējā gadā saražotā elektroenerģija ir atkarīga no

mājsaimniecības siltumenerģijas pieprasījuma. Veicot pārrēķinu, noteikts, ka, sadedzinot 1 kg malkas, iegūtas vidēji 0,026 kWh elektroenerģijas (3.24. att.) un 2,53 kWh siltuma enerģijas (3.22. att.). Mājsaimniecība ar šiem parametriem gadā patērē 39 MWh siltumenerģijas. Attiecīgi aprēķinot *mCHP* iekārtas iespējas saražot elektroenerģiju, ja tā darbotos visu kalendāro gadu, nodrošinot siltuma enerģijas pieprasījumu, tiktu saražotas 1014 kWh elektroenerģijas.

PV paneļu saražotā elektroenerģija

Kā minēts 2.4. apakšnodaļā, no 1 kW uzstādīto saules bateriju paneļu gada produkcija ir aptuveni 800 kWh. Izmantotā eksperimentālā iekārta ir 1,2 kW, tātad tā varētu saražot 960 kWh elektroenerģijas gadā.

Ikgadējais elektroenerģijas pieprasījumu segums

Ikmēneša elektroenerģijas pieprasījums vidēji mājsaimniecībā ir 293 kWh. Gadā tas ir 3516 kWh. *mCHP* gadā saražotā elektroenerģijas būtu 1014 kWh.

Lai segtu ikgadējo elektroenerģijas pieprasījumu, nepieciešams *PV* paneļu uzstādītās jaudas pieaugums, salīdzinot ar eksperimentālo gadījumu. Lai segtu kopējo pieprasījumu 3516 kWh, no kuriem 1014 kWh varētu segt ar *mCHP* sistēmu, 2412 kWh ir jāsedz ar uzstādītajiem *PV* paneļiem. Kā jau aprakstīts iepriekš, 1 kW uzstādīto *PV* paneļu var saražot vidēji 800 kWh elektroenerģijas gadā. Mājsaimniecības gada elektroenerģijas pieprasījuma segšanai nepieciešams 3015 W uzstādītās *PV* jaudas. Tas nozīmē 10 saules paneļus (katrs 300 W), kā minēts 2.7. tabulā.

Elektrības neto bilances aprēķins

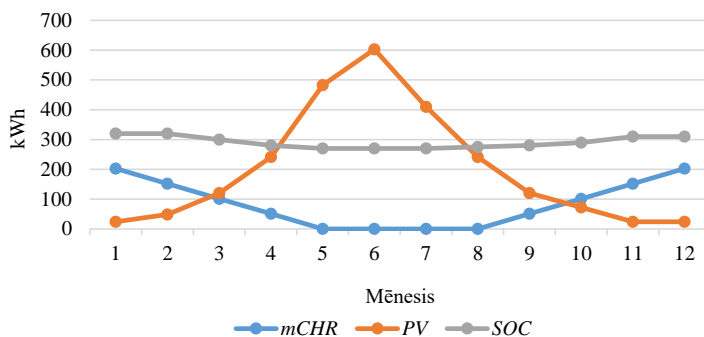
Neto norēķinu sistēma Latvijā noteikta Ministru kabineta noteikumos (Ministru kabinets, 2020). Šis pētījuma mērķis ir vienmērīga tīkla balansēšana.

Publiskā tīkla disbalanss

Zinātniskais raksts (*Nwaigwe, Mutabilwa and Dintwa, 2019*) un publiskie avoti (*Hepworth, 2011*), (*BUILD, 2021*) identificē problēmu, ka *NET Zero* risinājumi, kuru pamatā ir *PV* paneļu sistēmas, tikai rada pārslodzes risku publiskajam elektrotīklam sezonālās produktivitātes dēļ. Pašreizējā politika *NET* norēķiniem Latvijā ir balstīta tikai uz *PV* sistēmām, kurām reģionā ir izteikti sezonāls raksturs. Autora pētījums atklāj, kā *mCHP* un *PV* paneļu sistēmas kombinācija samazina sezonālās publiskā tīkla pārslodzes risku.

NET Zero aprēķinu scenāriji

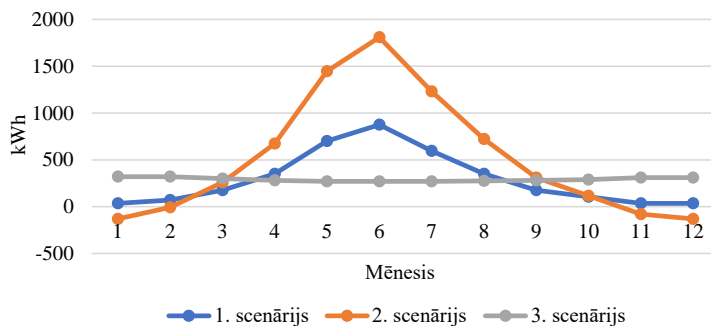
Eksperimentālie aprēķini veikti, lai definētu mājsaimniecību gada patēriņa elektroenerģijas piegādi (*Supply of consumption, SOC*), izmantojot *PV* sistēmu kombināciju ar *mCHP*, lai sasniegtu *NET Zero* bilanci. Šo aprēķinu rezultāti parādīti 3.24. attēlā.



3.24. att. Ar *mCHP* un-*PV* sistēmām gadā saražotā elektroenerģija mājsaimniecības patēriņa nodrošināšanai (*SOC*).

Kā alternatīvs scenārijs tiek aprēķināts, lai segtu *SOC*, izmantojot tikai *PV* paneļu sistēmu, sasniedzot *NET Zero* līdzsvaru. Lai noteiktu, cik daudz elektroenerģijas *PV* paneļu sistēma spēj saražot kalendārā gada laikā, veikta inventarizācija (3.24.att.), kā arī literatūras apskats par līdzīgu *PV* sistēmu darbību Latvijā (*Rozentale, Lauka and Blumberga, 2018*).

Šo divu alternatīvu *NET* bilances, kas nodrošina mājsaimniecības elektroapgādi tikai ar *PV* paneļiem (2. scenārijs) un *PV+mCHP* kombināciju (1. scenārijs), salīdzinājums parādīts 3.25. attēlā.



3.25. att. *NET Zero* enerģijas plūsma uz un no publiskā sadales tīkla.

3.5. Aprites cikla analīze

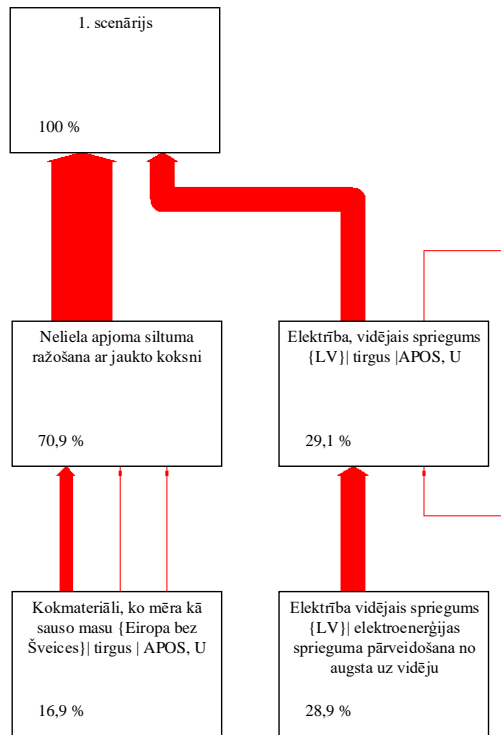
Dzīves cikla ietekmes novērtējuma rezultāti

SimaPro programmatūrā izveidotā modeļa rezultāti viengimenes dzīvojamo ēku energoapgādes modeļiem analizēti vairākos scenārijos, tostarp viena scenārija tīkla koka un viena scenārija ietekmes noteiktas katram konkrētam emisijas veidam, konkrētā procesa ietekmi kopējās ietekmes, ietekmes viduspunktā un bojājumu (galapunkta) kategorijās. Ir veikta dažādu scenāriju salīdzinošā analīze iepriekš minētajās kategorijās. Vērtēšanas kritēriju daudzdimensionalitāte ļauj noteikt, kur starp scenārijiem rodas vides slodžu sekas. Visi dati tiek izteikti uz *FU* un precīzi atspoguļo atšķirības starp tehnoloģijām analizētajos scenārijos.

Tīkla koka diagrammas analīze

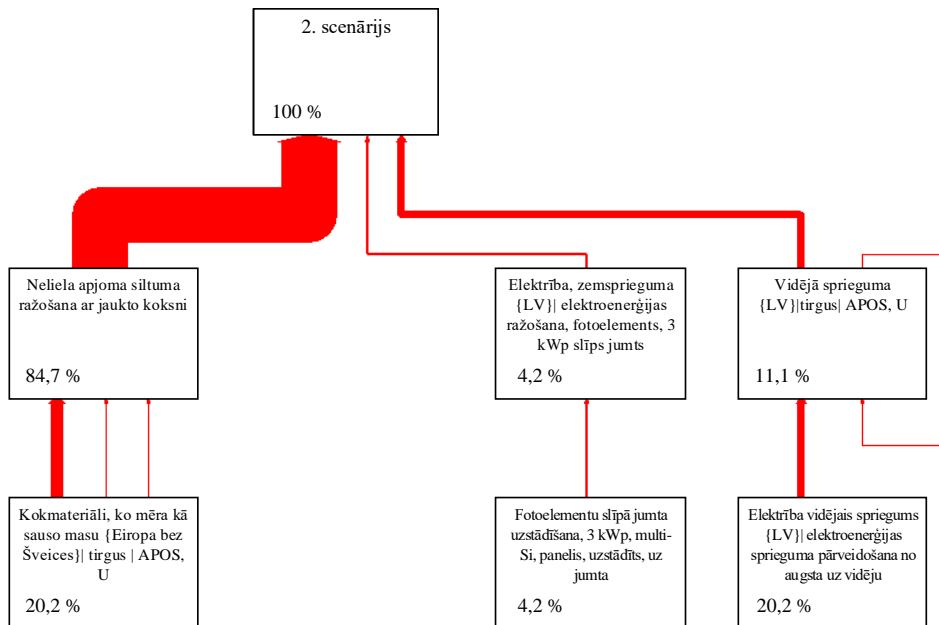
Modeļa struktūra ir attēlota ar modeļa tīkla koku, kas ļauj izsekot saiknēm starp sistēmā iesaistītajiem procesiem un identificēt galvenos procesus, kas veicina ietekmi uz vidi. Modeļu tīkla koku skaitļi ir parādīti visiem scenārijiem, iekļaujot tikai trīs augšējos procesu slāņus un piemērojot 4 % robežu, jo katram pētāmajam scenārijam izveidots liels saišu skaits datubāzes procesos, un nav iespējams vienā attēlā parādīt visus procesus, kuru ietekme ir mazāka par 4 %. Saites lielums apzīmē mezgla ietekmes uz vidi daļu attiecībā pret definētā scenārija kopējo ietekmi. Katra procesa ietekmes daļa tīkla koka diagrammās noteikta procentos no kopējās viena rezultāta ietekmes.

1. scenārija modeļa tīkla koks (3.26. att.) parāda siltumenerģijas ražošanas efektivitāti katlā (70,9 %) un elektroenerģijas patēriņu publiskajā tīklā (29,1 %). Aplūkojot 1. scenārija devuma cēloņus, siltumenerģijas ražošanā lielāko ietekmes daļu rada malkas sagatavošana (16,9 %). Analizējot 1. scenārija tīkla koku, pārsniedzot 4 % robežvērtību, atklājas, ka katla ražošana un koksnes pelni ir nākamais lielākais siltumīcu gāzu emisiju veicinātājs, kas norāda attiecīgi 1,36 % un 0,02 %. Tas ir mazs ieguldījums sistēmas ietekmē uz vidi, un pārējiem modeļi iekļautajiem procesiem ir pat mazāka ietekme nekā diviem iepriekš minētajiem.



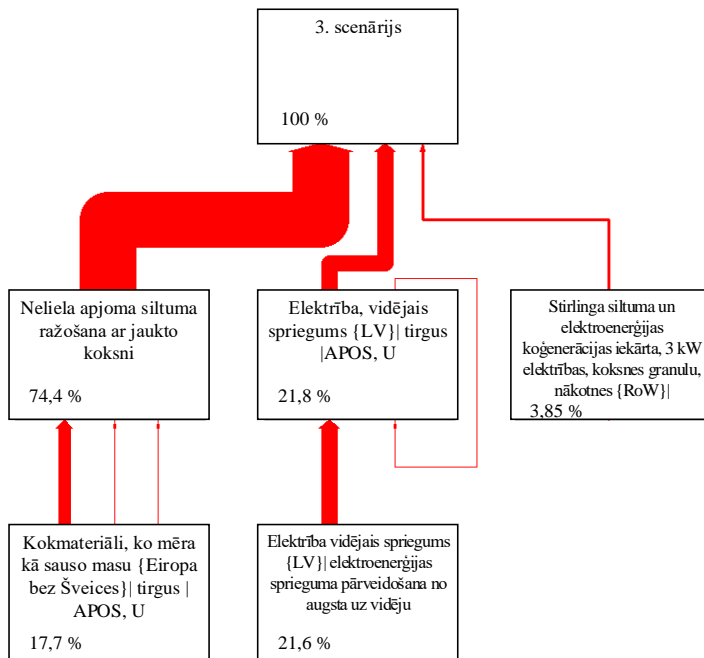
3.26. att. 1. scenārija tīkla koka diagramma (robežvērtība 4 %).

2. scenārija tīkla koka diagramma 3.27. attēlā parāda, ka siltumenerģijas ražošanas katlā ietekmes daļa ir līdz 84,7%. Sistēmai pievienota elektroenerģijas ražošana ar saules PV, kas veido 4,2 % no kopējās ietekmes. Ietekme, kas saistīta ar elektroenerģijas patēriņu no publiskā tīkla, 2. scenārijā ir 11,1 %.



3.27. att. 2. scenārija tīkla koka diagramma (robežvērtība 4 %).

3. scenārija tīkla koks 3.28. attēlā parāda siltuma ražošanas ietekmes uz vidi daļu, kas vienāda ar 74,4 %, elektroenerģijas patēriņa no publiskā tīkla daļa ir 21,8 %, un Stirlinga dzinējam tā ir 3,85 %. Stirlinga dzinēja ietekmes uz vidi galvenais veicinātājs ir ražošana (kopā 552 procesi), kas ietver lielu skaitu dažādu metālu ieguves un apstrādes procesu, kā arī neatjaunojamo kurināmo resursu izmantošanu.



3.28. att. 3. scenārija tīkla koka diagramma (robežvērtība 4 %).

Ietekmes kategoriju rādītāji

Rezultāti, kas atspoguļoti viduspunkta līmenī, ir noteikti 14 ietekmes kategorijām (3.5. tab.). Lielākajai daļai ietekmes kategoriju viduspunkta līmenī augstākais ietekmes uz vidi novērtējums ir 1. scenārijam, tam seko 3. scenārijs, un zemākais ir 2. scenārijam, izņemot saldūdens eitrofikāciju, saldūdens ekotoksicitāti un jūras ekotoksicitāti, cilvēka nekancerogēnu toksicitāti un derīgo izrakteņu trūkuma ietekmes kategorijas. Saldūdens eitrofikācija ir nemainīga aptuveni 0,614 kg Peq 1. un 3. scenārijā un viszemākā – 2. scenārijā (0,512 kg Peq).

Atšķirīga ietekmes izplatība starp analizētajiem scenārijiem ir konstatēta saldūdens un jūras ekotoksicitātei, nekancerogēnai toksicitātei un minerālresursu trūkumam, kas norāda uz sloga pārvešanu starp ietekmes kategorijām. 3. scenārijam ir visaugstākais saldūdens un jūras ekotoksicitātes līmenis. Nekancerogēnā toksicitāte cilvēkiem ir vienāda 1. un 2. scenārijā, bet palielinās 3. scenārijā. 1. scenārijam ir viszemākais minerālresursu trūkuma rādītājs, savukārt 3. scenārijam šis rādītājs ir vislielākais.

3.5. tabula

Definēto scenāriju raksturojuma rezultāti *Recipe 2016* viduspunktā

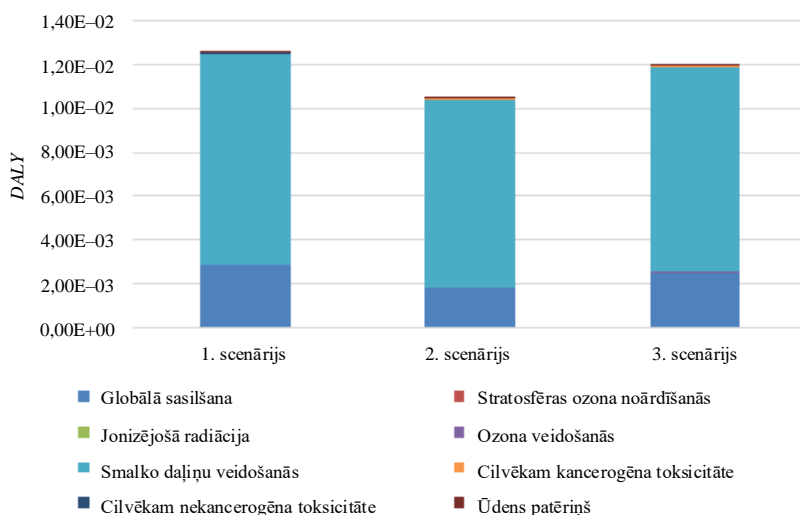
| Ietekmes kategorija | Vienība | Scenārijs A | Scenārijs B | Scenārijs C |
|---|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Globālā sasilšana | kg CO ₂ eq | 2,73E+03 | 1,62E+03 | 2,40E+03 |
| Stratosfēras ozona noārdīšanās | kg CFC ₁₁ eq | 1,10E-02 | 9,93E-03 | 1,06E-02 |
| Jonizējošā radiācija | kBqCo-60eq | 1,74E+02 | 8,30E+01 | 1,40E+02 |
| Ozona veidošanās, cilvēka veselība | kg NO _x eq | 2,50E+01 | 2,22E+01 | 2,41E+01 |
| Smalko daļiņu veidošanās | kg PM 2.5eq | 1,48E+01 | 1,32E+01 | 1,44E+01 |
| Ozona veidošanās, sauszemes ekosistēmas | kg NO _x eq | 2,63E+01 | 2,35E+01 | 2,54E+01 |
| Sauszemes paskābināšanās | kg SO ₂ eq | 1,62E+01 | 1,20E+01 | 1,49E+01 |
| Saldūdens eitrofikācija | kg Peq | 6,14E-01 | 5,12E-01 | 6,14E-01 |
| Jūras eitrofikācija | kg Neq | 6,29E-02 | 5,84E-02 | 6,13E-02 |
| Sauszemes ekotoksicitāte | kg 1,4-DCB | 1,96E+03 | 7,76E+02 | 1,47E+03 |
| Saldūdens ekotoksicitāte | kg 1,4-DCB | 3,71E+00 | 3,69E+00 | 4,96E+00 |
| Jūras ekotoksicitāte | kg 1,4-DCB | 6,64E+00 | 5,69E+00 | 8,03E+00 |
| Cilvēkam kancerogēna toksicitāte | kg 1,4-DCB | 3,61E+00 | 3,31E+00 | 3,52E+00 |
| Cilvēkam nekancerogēna toksicitāte | kg 1,4-DCB | 2,52E+01 | 2,52E+01 | 2,99E+01 |
| Zemes izmantošana | m ² a crop eq | 8,56E+03 | 8,48E+03 | 8,53E+03 |
| Derīgo izrakteņu trūkums | kg Cueq | 5,40E+00 | 7,42E+00 | 8,71E+00 |
| Fosilo resursu trūkums | kg oil eq | 7,69E+02 | 3,92E+02 | 6,41E+02 |
| Ūdens patēriņš | m ³ | 1,80E+01 | 1,46E+01 | 1,54E+01 |

Globālā sasilšana, stratosfēras ozona noārdīšanās, jonizējošais starojums, sauszemes paskābināšanās un jūras ekotoksicitāte ir ietekmes kategorijas, kurās atšķirības starp scenārijiem ir būtiskas. Ietekmes līmeņi šajos apgabalos dažādos scenārijos ievērojami atšķiras.

Bojājumu kategorijas rādītājs

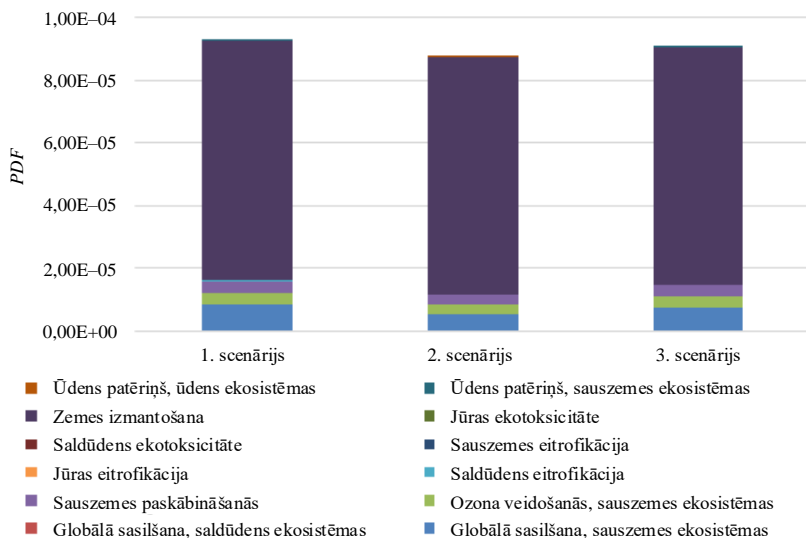
Informācija par kaitējumu videi, ko rada iepriekš aprakstītā ietekme uz vidi, saskaņā ar izvēlētajām ietekmes novērtēšanas metodēm noteikta trīs kategorijās: kaitējums cilvēka veselībai, kaitējums ekosistēmai un kaitējums resursu pieejamībai.

Globālā sasilšana un ozona slāņa noārdīšanās ir viena no ietekmes kategorijām, tāpat kā jonizējošais starojums, smalko daļiņu veidošanās, cilvēkam kancerogēnā un nekancerogēnā toksicitāte un ūdens patēriņš, un tas viss veicina kopējo ietekmi uz cilvēku veselību. Ietekme, kas saistīta ar kaitējumu cilvēka veselībai, ko mēra *DALY*, ir norādīta 3.29. att. Cilvēka veselībai nodarītais kaitējums ir visaugstākais ir 1. scenārijā un vismazākais – 2. scenārijā. Smalko daļiņu veidošanās ir nodarījusi vislielāko kaitējumu cilvēka veselībai starp analizēto scenāriju ietekmes kategorijām. Otrā lielākā ietekme ir globālās sasilšanas kategorijai. Pārējām ietekmes kategorijām ir salīdzinoši neliels kaitējums cilvēka veselībai.



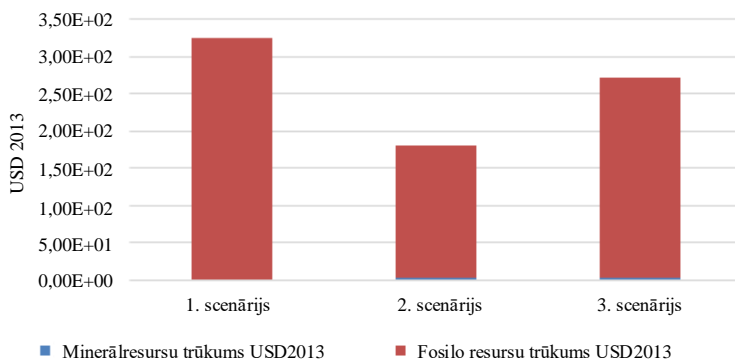
3.29. att. Cilvēka veselībai nodarītais kaitējums trīs scenārijos.

Ekosistēmas bojājumi analizētajos scenārijos ir parādīti *PDF* vienībās 3.30. attēlā. Kaitējumam ekosistēmām ir tāds pats sadalījums pa scenārijiem kā kaitējumam cilvēka veselībai. Vislielākais kaitējums konstatēts 1. scenārijā un vismazākais – 3. scenārijā. Vislielāko ieguldījumu postījumos rada zemes izmantošanas indikators visos scenārijos, kam seko globālā sasilšana, ozona veidošanās un sauszemes paskābināšanās.



3.30. att. Ietekme uz ekosistēmu trīs scenārijos.

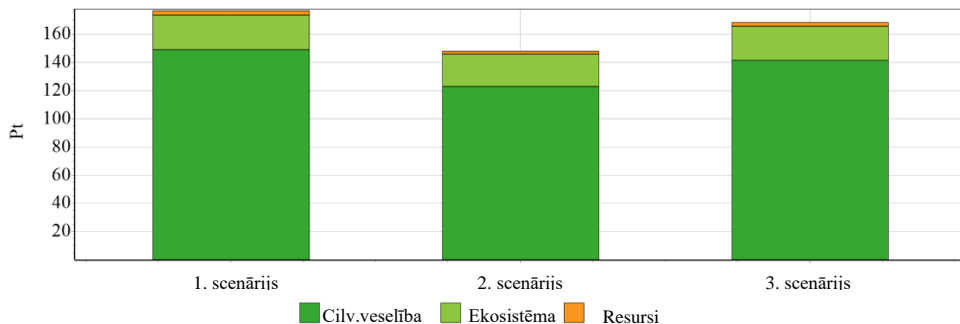
Resursu pieejamības bojājumu rezultāti parādīti 3.31. attēlā. Arī šajā gadījumā vislielākais kaitējums vērojams 1. scenārijā un vismazākais – 2. scenārijā. Fosilo resursu trūkums ir daudz būtiskāks resursu pieejamības kaitējuma cēlonis, salīdzinot ar derīgo izrakteņu iegūvi visos analizētajos scenārijos.



3.31. att. Resursu pieejamības bojājumi 2013 USD apmērā trīs scenārijos.

Salīdzinošās LCA galīgajos rezultātos viena punkta līmenī ir apkopoti bojājumu kategoriju rādītāji, un tie ir parādīti 3.32. attēlā ekopunktu vienībās. 1. scenārijs ir visietekmīgākais scenārijs visās bojājumu kategorijās. 2. scenārijā ir vismazākie bojājumi, un 3. scenārijs ierindojas otrajā

vieta. Vislielākā ietekme visos scenārijos radīta kategorijā "Cilvēka veselībai nodarītie bojājumi", kam seko ekosistēmu kvalitāte un pēc tam klimata pārmaiņas un resursi.

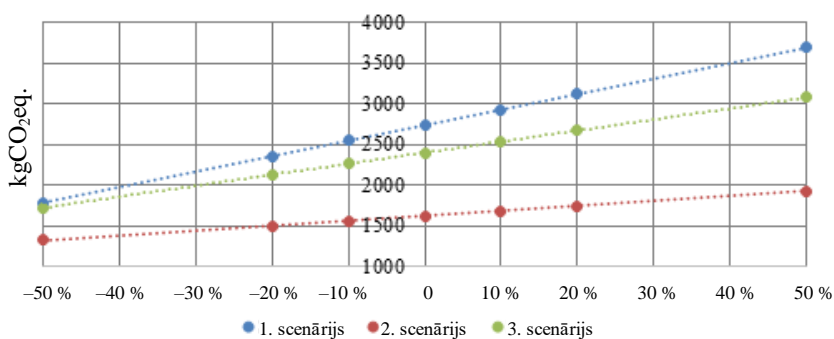


Metode: ReCiPe2016 Endpoint (H) V1.08 / World (2010) H/H Sigle score
Salīdzinājums 1 p "1. scenārijs", 1 p "2. scenārijs", 1 p "3. scenārijs";

3.32. att. Definēto scenāriju viena punkta rezultāti.

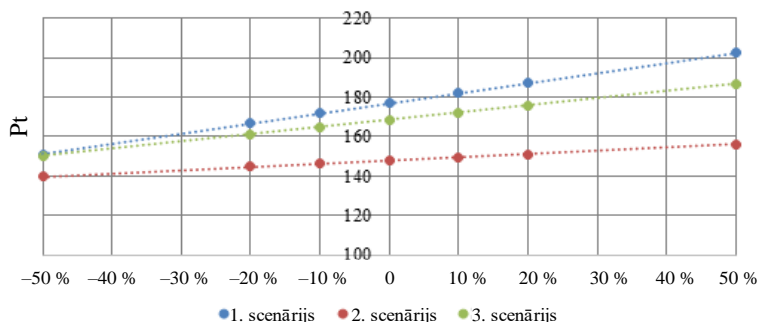
Jutīguma analīze

Globālās sasilšanas potenciāla jutīguma analīze CO₂ ekv. kg ir parādīta 3.33. attēlā. Visiem analizētajiem scenārijiem jutīguma tendence liecina, ka globālās sasilšanas potenciālā ietekme palielinās, pieaugot elektroenerģijas patēriņam. Visjutīgākais pret elektroenerģijas patēriņa izmaiņām ir 1. scenārijs, un vismazāk jutīgs ir 2. scenārijs. Uzskatot, ka 1. un 3. scenārijam ir līdzīga ietekme uz elektroenerģijas patēriņa samazināšanos par 50 %, 1. scenārija izmaiņas palielinās gandrīz divas reizes no 1783 kg CO₂eq līdz 3685 kg CO₂eq, savukārt 3. scenārijā palielinās tikai no 1722 kg CO₂eq līdz 3074 kg CO₂eq.



3.33. att. Elektroenerģijas patēriņa jutīguma analīze globālās sasilšanas potenciālam, kg CO₂eq.

Līdzīgi jutīguma analīze veikta attiecībā uz elektroenerģijas izmaiņām, lai noteiktu ietekmi uz vidi vienā punktu līmenī, kā parādīts 3.34. attēlā. Arī šeit vislielāko ietekmes pieaugumu var novērot 1. scenārijā un vismazāko – 2. scenārijā. Izmaiņas vienā rādītājā ir mazākas nekā globālās sasīlšanas potenciālam. Līdz ar to var secināt, ka starp scenārijiem un arī ietekmes kategorijām būtiska sloga pārnese nenotiek.



3.34. att. Elektroenerģijas patēriņa jutīguma analīze vienai ballei, Ekopunktos.

Jutīguma analīzes rezultāti parāda, ka modeļa rezultāti ir cieši atkarīgi no ievades mainīgiem datiem un izmaiņas ir loģiski izprotami visā modelī, tas atbilst modeļa struktūrai. Tādējādi modelis ir derīgs un rezultāti ir reprezentatīvi izvēlētajam energoapgādes tehnoloģiju gadījumam vidējai mājsaimniecībai Latvijā.

4. DISKUSIJA

Ceturtnā nodaļa ir veltīta trešajā nodaļā iegūto rezultātu apspriešanai un analīzei. Iepriekšējās nodaļas kontekstā, kurā tika prezentēti pētījumu sistematizēti rezultāti, šīs daļas mērķis ir papildināt analīzi ar iegūto rezultātu interpretāciju un apkopot darbā paveikto.

4.1. Bibliogrāfiskā analīze

Atbilde uz *RQ1* "Kā Stirlinga dzinēju literatūra ir attīstījies iepriekš un tagad" tika pēfīta, analizējot atbilstoši aprakstītajam pētījuma protokolam iegūto dokumentu paraugu statistiku. Konstatēts, ka vairāk nekā sešus gadu desmitus raksti, kuros minēti Stirlinga dzinēji, ir publicēti starptautiski indeksētos žurnālos un konferencēs. Atslēgvārdu dinamika parādīja, ka sākotnēji visbiežāk izmantoti tiešie atslēgvārdi, tādi kā siltumdzinējs, gaisa dzinējs un termodinamika. Tomēr pēdējās divās desmitgadēs publikācijas ir attīstījušās, iekļaujot daudz plašākus apakšvirzienus, tostarp Zaļā kursa kontekstā ļoti aktuālos atjaunojamus energoresursus, t. i., saules enerģiju un biomasas tehnoloģijas, enerģijas transformācijas palielināšanu un mikrokoģenerācijas tehnoloģiju izmantošanu. Stirlinga dzinēju tehnoloģiju pētījumi attīstās, un mūsdienās arvien vairāk zinātnieku publicē jaunus pētījumus, kuru mērķis ir atrast šīs tehnoloģijas lietojumu mūsdienā apstākļos.

Definētais *RQ2* bija "Kāda ir uzmanība un jaunākās tendences maza mēroga (dzīvojamo) atjaunojamo energoresursu pētniecībā Stirlinga dzinēju izpētē, īpašu uzmanību pievēršot biomasai?". Kvantitatīvās bibliogrāfiskās un kvalitatīvās satura analīzes rezultāti apstiprina virzību uz atjaunojamo resursu izmantošanu, kur zinātnieki jau daudzus gadu desmitus ir plaši aplūkojuši saules enerģijas ražošanas sistēmas, taču pēdējā laikā pieaug arī pētniecisko rakstu skaits, kas saistīti ar Stirlinga dzinējiem, kuru pamatā ir biomasas. Mājsaimniecību vai dzīvojamo māju līmenī arvien vairāk tiek pēfītas hibrīdsistēmas, tostarp mikrokoģenerācijas, *PV* un Stirlinga dzinēju kombinācijas, norādot, ka tā ir ieviešanas tendence nākotnē. Aktuāls jautājums ir arī energoefektivitātes paaugstināšana, jo atslēgvārdu un pārklājuma analīze uzrādīja biežāku publikāciju šajā un iepriekš minētajās jomās. Satura analīze par diviem specifiskākiem interešu apakšvirzieniem, t. i., ar biomasu darbināmu Stirlinga dzinēju izmantošanu mājsaimniecībās un Stirlinga dzinēja ietekmi uz energoapgādes drošību, parādīja, ka, lai gan pēdējā laikā ir palielinājusies pētnieciskā aktivitāte šajos virzienos, jo īpaši ir nepieciešami padziļināti pētījumi par energoapgādes drošību un neatkarību.

4.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze

Pāreja uz atjaunojamo enerģiju ES ietvers maza mēroga mājsaimniecību enerģijas ražošanas risinājumus. Tāpēc šajā pētījumā salīdzinātas četras atjaunojamās enerģijas sistēmas, kurās izmanto *MCDA*: protonu apmaiņas membrānas kurināmā elementu ar fotoelektriskajiem paneļiem,

fotoelementu paneļiem, ar biomasu darbināmu Stirlinga dzinēju un ar saules enerģiju darbināmu Stirlinga dzinēju. Mērķis bija noteikt vispiemērotāko energosistēmu mājsaimniecību elektroenerģijas ražošanai SE līdz 50 kW.

Literatūras apskatā apkopotu dati par katru energosistēmu. *TOPSIS* tika izvēlēti pieci kritēriji, ņemot vērā vides, ekonomiskos un tehniskos aspektus. Rezultāti liecina, ka ar biomasu darbināmā Stirlinga dzinēju sistēma ir vislabvēlīgākā mājsaimniecību elektroenerģijas ražošanai (0,91). Tas galvenokārt ir tāpēc, ka tas ir lētākais, uzticamākais veids un tam ir zema ietekme uz vidi. Jūtīguma analīze atklāja, ka šo sistēmu neietekmē svara izmaiņas, un tā joprojām būtu vislabākā alternatīva, ja kritēriju svāri nebūtu vienādi.

Apskatītā publikācija (*Khan and Gohari Darabkhani, 2022*) liecina, ka degvielas šūna ir vislabākais tehnoloģiskais risinājums neliela apjoma siltuma un elektroenerģijas ražošanai, savukārt Stirlinga dzinējs ir piemērotāks mājsaimniecībām, jo tas ir lētāks. Pētījumā secināts, ka kurināmā elementam ir vismazākā ietekme uz vidi, taču tajā ir ņemtas vērā tiešās emisijas, nevis visa dzīves cikla ietekme uz vidi. Šis pētījums apstiprina, ka Stirlinga dzinējs ir vislabākā alternatīva mājsaimniecībām. Tomēr kurināmā šūna ir visnelabvēlīgākā, jo tā ir visdārgākā, tai ir īss kalpošanas laiks un tai ir liela ietekme uz vidi attiecībā uz aprites cikla emisijām.

Šos rezultātus var izmantot, lai uzlabotu esošo informāciju, ko valdības un uzņēmumi sniedz dzīvojamo māju sektoram. Tas var arī palīdzēt politikas veidotājiem pieņemt lēmumus valsts pārejā uz zaļo enerģiju. Tomēr pirms pētījuma rezultātu izmantošanas praksē ir nepieciešams padziļinātāks pētījums par Stirlinga dzinēju, kas savienots ar biomasas katlu, jo šajā pētījumā izmantoti dati no dažādām valstīm un dažādām sistēmas jaudām. Pētījumā apkopotie dati par katru sistēmu, *MCDA* rezultāti un jutīguma analīze ir vērtīgi turpmākajiem pētījumiem, jo iepriekš to zinātniskajā literatūrā nebija.

4.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance

Pētījuma mērķis bija izvērtēt energodrošības paaugstināšanas iespējas pašvaldību ēkās enerģētiskās krīzes gadījumā. Šim nolūkam tika izstrādāta kompleksa metodika, kas ietver vairākus savstarpēji saistītus soļus: 1) esošās situācijas izvērtēšana; 2) pašreizējā enerģijas patēriņa samazināšana; 3) energotehnoloģiju izvēle un alternatīvu scenāriju noteikšana; 4) izvēlēto scenāriju novērtējums. Metodoloģija tika izmantota piemēra izpētē. Tika atlasītas septiņas Ādažu pilsētas (Ādažu novads, Latvija) pašvaldības ēkas. Visas ēkas šobrīd ir 100 % energoatkarīgas: siltumenerģijas ražošanai tiek izmantoti dabasgāzes katli, bet elektrība tiek iepirkta no elektrotīkla. Turklāt visas ēkas atšķiras pēc kopējā siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņa, arī pēc gada patēriņa profila. Arī siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņa attiecība ir atšķirīga. Tas ļauj pilnībā izvērtēt izvēlēto tehnoloģiju priekšrocības un trūkumus un izprast prasības alternatīvo tehnoloģiju efektīvai izmantošanai katrā scenārijā.

Pētījumā iekļauti trīs galvenie alternatīvie scenāriji un bāzes scenārijs jeb atsaucies scenārijs ieguvumu salīdzināšanai. Atkarībā no slodzes scenāriji ir sadalīti divos līmeņos. Izmantotas divas slodzes: bāzes un samazinātā. Līmeņatzīmes piemērotas gan attiecībā uz siltumenerģijas, gan elektroenerģijas patēriņu. Siltumenerģijas gadījumā izmantoti regresijas vienādojumi, lai aprakstītu korelāciju starp mēneša siltumenerģijas pieprasījumu un āra gaisa temperatūru. Viss ikmēneša siltumenerģijas patēriņš, kas ir virs izveidotās korelācijas līknes, ir uzskatāms par nepamatotu, īpaši enerģētiskās krīzes gadījumā, lai nodrošinātu energoapgādes drošības ieviešanu. Viss nepamatoti augstais siltumenerģijas patēriņš virs korelācijas līknes samazināts līdz līmeņatzīmei. Siltumenerģijas patēriņš zem līknes nav mainīts. Elektroenerģijas gadījumā piemērots arī patēriņa samazināšanas kritērijs.

Visi scenāriji salīdzināti savā starpā, izmantojot iepriekš noteiktus kritērijus: 1) 100 % siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņa pašpietiekamība; 2) enerģijas ražošanas īpatnējās izmaksas; 3) kopējās investīcijas un atmaksāšanās periods; 4) emisiju apjoms. Aprēķini tika veikti visiem scenārijiem, un katram kritērijam tika iegūtas skaitliskās vērtības. Visos alternatīvajos scenārijos 100 % pašpietiekamība tika sasniegta, izmantojot biomasas katlu un Stirlinga dzinēju kombinācijā ar saules enerģijas tehnoloģijām un siltumsūkni. Atkarībai no patērētāja patēriņa profila un tehnoloģiju raksturlielumiem ir tendence veidoties enerģijas pārpalikumam. Šo elektroenerģiju nevar izmantot uzreiz, tāpēc to var nodotot tīklā. Turpmāk izskatāmi scenāriji ar iespēju enerģijas pārpalikumus akumulēt vēlākai izmantošanai pašpatēriņam.

Īpatnējās enerģijas ražošanas izmaksas būtiski atšķiras atkarībā no izmantotajām tehnoloģijām. Viszemākās izmaksas ir scenārijos ar saules *PV* un siltumsūkni. Visaugstākās enerģijas ražošanas izmaksas ir bāzes scenārijā, kur tiek izmantota dabasgāze. Izmaksas ir salīdzinoši augstas, ja tiek izmantots granulū katls ar Stirlinga dzinēju. Samazinoties enerģijas patēriņam, katrai no tehnoloģijām novērojams neliels enerģijas ražošanas īpatnējo izmaksu pieaugums.

Kopējo ieguldījumu tehnoloģiju ieviešanā rezultāti skaidri norāda, ka *S2* un *S3* scenārijā investīcijas ir aptuveni divas reizes lielākas nekā *1.* scenārijā. Tas ir tāpēc, ka *2.* un *3.* scenārijā izmantots vairāk nekā viens hibrīdtehnoloģijas risinājums. Enerģijas patēriņa samazināšana samazina tehnoloģijām nepieciešamo uzstādīšanas jaudu un līdz ar to arī nepieciešamos ieguldījumus.

Atmaksāšanās periods katrā alternatīvajā scenārijā ir atkarīgs no kopējām nepieciešamajām investīcijām un īpatnējām enerģijas izmaksām. Lai gan īpatnējās enerģijas izmaksas scenārijam *S1* ir augstākas nekā *S2* un *S3* scenārijam, scenārija *S1* atmaksāšanās periods ir īsāks. Tas ir tāpēc, ka *S2* un *S3* scenārijiem, kurā iekļauta saules *PV* tehnoloģiju izmantošanu ir nepieciešami ievērojami lielāki kopējie ieguldījumi.

Pētījumā aplūkoti scenāriji arī salīdzināti, pamatojoties uz saražoto emisiju apjomu. Aprēķinātas gaisu piesārņojošo vielu CO , NO_x un PM , kā arī siltumnīcefekta gāzu CO_2 emisijas. Scenārijā *BS*, kur tiek izmantots dabasgāzes katls, rodas ievērojami mazāk CO un NO_x izmešu,

tomēr ir ievērojamas CO₂ emisijas. Izmantojot saules tehnoloģijas S2 un S3 scenārijā, ir iespējams samazināt gaisu piesārņojošo vielu emisijas salīdzinājumā ar S1 scenāriju. Enerģijas patēriņa samazināšana samazina arī radīto emisiju daudzumu visos scenārijos.

Pētījuma rezultāti skaidri norāda, ka ir iespējams izveidot ilgtspējīgu pašvaldību ēku energoapgādes sistēmu, kuras pamatā ir lokāli iegūti atjaunojamie energoresursi, tādējādi palielinot gan pašvaldības, gan valsts energosistēmas energoapgādes drošību, panākot enerģētisko neatkarību. Rezultāti arī liecina, ka pirms jaunu energotehnoloģiju ieviešanas ir svarīgi nodrošināt enerģijas patēriņa samazinājumu. Tas ir svarīgs aspekts energoefektīvas un energodrošas siltumenerģijas un elektroenerģijas piegādes veidošanā.

Visi alternatīvie scenāriji S1, S2 un S3 spēj sasniegt 100 % pašpietiekama enerģijas patēriņa prasību. Tomēr katram scenārijam ir savas priekšrocības un trūkumi. S1 scenāriju, kurā paredzēts biomasas katls un Stirlinga dzinējs, raksturo mazākas investīciju vajadzības un īsāks atmaksas termiņš. No otras puses, S2 un S3 scenārijiem ar saules tehnoloģiju izmantošanu ir zemākas īpatnējās enerģijas izmaksas un emisijas. Energoapgādes drošības palielināšana ir tehnoloģisku, ekonomisko un vides aspektu kopums. Veidojot ilgtspējīgu energoapgādes sistēmu, ir svarīgi ņemt vērā visus pētījumā aplūkotos kritērijus.

Vislielākais rezultātu sadalījums starp atlasītajām ēkām ir S1 scenārijā. Tas attiecas gan uz konkrētām enerģijas izmaksām, gan uz atmaksāšanās periodu. Tā tad ir faktori, kas var ietekmēt to, vai Stirlinga dzinēja izmantošana var būt efektīva. Svarīgi aspekti ir siltumenerģijas attiecība pret elektroenerģijas patēriņu, izlīdzināts enerģijas patēriņš bez maksimumiem, siltumenerģijas patēriņš vasarā.

Turpmākajos pētījumos jaunos scenārijos var iekļaut arī citas enerģijas tehnoloģijas. Ir iespējams iekļaut arī papildu kritērijus scenāriju novērtēšanai. Ir jāizvērtē katra kritērija aktualitāte un nozīmīgums, lietojot kādu no attiecīgajām zinātniskajām metodēm, piemēram, lēmumu pieņemšanas analīzi.

4.4. Eksperimentālā izpēte

1. eksperiments: Stirlinga dzinēja darbības izpēte

Pētījuma pamatā bija literatūras analīzes ceļā un eksperimentu praktiskajā daļā iegūto datu salīdzinājums.

Secināms, ka ir iespējams sasniegt lielāku elektrisko jaudu eksperimentālajai iekārtai. Pamatojoties uz literatūras apskatā atrodamo informāciju, sadegšanas kameras temperatūra, kurā var ievietot Stirlinga dzinēja galvu, ir līdz 800–900 °C (*Smirnov et al.*, 2021). Ņemot vērā pētījuma eksperimentālajā daļā pierādīto, 3.20. attēlā mērījums uzrāda temperatūru tikai ap 600 °C, līdz ar to var prognozēt, ka konkrētā Stirlinga dzinēja maksimālā elektriskā jauda kopā ar cietās biomasas

katlu var sasniegt 800–900 W. Kā aprakstīts katla specifikācijā (Zhu *et al.*, 2018) sadegšanas kameras temperatūra var sasniegt 1200 °C. Pētījuma eksperimentālajā daļā veiktie novērojumi liecina, ka maksimālo dzinēja jaudu varētu palielināt, arī mainot katla kurtuves temperatūru, kā arī dzinēja dzesēšanas sistēmas ievēlētās/izvēlētās temperatūru. Izmantojot augstākas siltumietilpības kurināmo, piemēram, ļoti sausu (mazāk nekā 10 % mitruma) vai ļoti blīvu koksnī, piemēram, ozola malku, apkures katla kurināmā temperatūra paaugstināsies. Saskaņā ar eksperimentālās daļas rezultātiem relatīvais emisiju apjoms saražotajai siltumenerģijai un elektroenerģijai ir mazāks, salīdzinot ar analogiem katliem bez mikrokoģenerācijas, savukārt “A” klases katli (*Microgen Engine Corporation*, 2018) ir sertificēti ar tādu pašu emisiju līmeni tikai siltumenerģijas ražošanai, bet ar tādu pašu emisiju daudzumu ir saražota elektroenerģija.

2. eksperiments: Stirlinga dzinēja apvienošana ar saules paneli

Autora darbā ir atspoguļoti dati, kuri iegūti, veicot eksperimentāli izveidotās *mCHP* darbības izpēti. Sistēma sastāv no ārējās sadegšanas *Microgen* Stirlinga dzinēja *mCHP* bloka un *PV* paneļiem. Visas enerģētiskās vajadzības – gan siltuma, gan elektriskās – mājāsaimniecībā tiek mēģināts nodrošināt ar eksperimentiem, izmantojot mērījumu datus, lai tos interpolētu uz gada siltuma un elektroenerģijas pieprasījumu. Tika veikta apgriezta interpolācija, lai iestatītu minimālo *PV* paneļu uzstādīto jaudu, lai sasniegtu ikgadējo *NET Zero* enerģijas bilanci. Šis mērķis ir atkarīgs no ražošanas jaudas un sinhronizācijas starp enerģijas ražošanas un patēriņa profiliem.

Sinhronizācijas process ir atkarīgs no *mCHP* un mājāsaimniecības siltumenerģijas pieprasījuma. Kā liecina testa rezultāti, *mCHP* spēj saražot tikai aptuveni ¼ no kopējā gada elektroenerģijas pieprasījuma un pilnībā nodrošināt siltumenerģijas pieprasījumu. Apkures sezonas laikā tai joprojām ir jāsaņem elektroenerģija no tīkla, kā rezultātā ir vajadzīgs daudz vairāk saules paneļu uzstādītās jaudas, nekā tika prognozēts iepriekš. Ar 1,2 kW uzstādīto *PV* paneļu jaudu nepietiek. Aprēķini liecina, ka, lai sasniegtu *NET Zero* līdzsvaru, vajadzīgi aptuveni 3 kW uzstādīto *PV* paneļu jaudas.

Optimālā aprēķinu programmatūras metode tika izmantota, lai atrastu neto līdzsvaru starp mājāsaimniecību siltumenerģijas piegādi, elektroenerģijas ražošanu no *mCHP+PV* (1. scenārijs) un *PV* paneļiem tikai ar siltumu no parastā biomasas katla. Neto bilances aprēķinu rezultāti ir parādīti 3.24. attēlā. Grafiskā veidā noteikt pozitīvu rezultātu, lai līdz minimumam samazinātu publiskā tīkla disbalansu gada laikā, izmantojot 2. scenāriju. Publiskā tīkla maksimālā slodze tika samazināta par gandrīz 40 %, salīdzinot ar sistēmu, izmantojot elektroenerģijas ražošanu tikai ar *PV* paneļus (2. scenārijs). Tika konstatēts, ka vairāk samazināt tīkla disbalansu būtu iespējams, ja arī vasarā *mCHP* tiktu izmantots, piemēram, karstā ūdens sagatavošanai. Tāpat secināms, ka, uzstādot siltumenerģijas akumulācijas tvertni, varētu tik samazināts publiskā tīkla izmantošanas disbalanss, bet sīkākiem rezultātiem nepieciešama papildu izpēte.

Tā sekundārais mērķis bija panākt pilnīgu mājāsaimniecību siltuma un elektroenerģijas pieprasījuma CO₂ neitralitāti.

Mājsaimniecības oglekļa neitralitātes noteikšanai izmantota oglekļa pēdas aprēķina metode.

Aprēķini liecina, ka, izmantojot koksni telpu apkurei, mājsaimniecība šajā aspektā ir oglekļa neitrāla.

Elektroenerģijas ražošana no biomasas *mCHP* un *PV* paneļiem pati par sevi ir oglekļa neitrāla. Izmantojot elektroenerģiju no publiskā tīkla, ir iespēja izvēlēties oglekļa neitrālu elektroenerģiju, taču tas patiesībā ir vairāk virtuāls, nevis praktisks aspekts, savukārt ar šo izvēli ir iespējams atbalstīt elektroenerģijas ražošanu no atjaunojamiem resursiem, taču lielākā daļa elektroenerģijas tiek ražota no fosilā kurināmā.

Aprēķinu rezultāti norāda, ka, izmantojot *PV* un *mCHP* sistēmu kombināciju mājsaimniecību energoapgādei, varētu sasniegt CO₂ neitralitāti.

4.5. Aprites cikla analīze

Dzīves cikla analīze ir plaši lietota standartizēta metodoloģija ietekmes uz vidi novērtējumam un analīzei. Šajā pētījumā izmantota zinātniskajā literatūrā iepriekš neapskatīta *LCA* metodoloģija – novērtēt energoapgādes alternatīvo scenāriju ietekmi uz vidi vidējai vienģimenes mājsaimniecībai Latvijā. Šī pētījuma rezultāti liecina, ka apkures katla izmantošana mājsaimniecībā apkurei kopā ar saules *PV* uzstādīšanu elektroenerģijai rada vismazāko ietekmi uz vidi, salīdzinot ar diviem citiem scenārijiem, kas ietver elektroenerģijas piegādi no publiskā tīkla un *mCHP*, izmantojot Stirlinga dzinēju. Novērtējums galvenokārt ir saistīts ar vides problēmu primāro cēloņu noteikšanu, ietekmes kategoriju punktu aprēķināšanu un kaitējuma kategoriju punktu noteikšanu. Veiktas arī jutīguma analīzes, lai novērtētu modeļa noturību un mainīgo ievades mainīgo ietekmi uz kopējo rezultātu. Kopumā šī pētījuma secinājumi palīdz izprast energoapgādes tehnoloģiju vidusmēra Latvijas ģimenes ietekmi uz vidi, un tie var palīdzēt pieņemt lēmumus un izstrādāt politiku ilgtspējīgākiem enerģētikas risinājumiem reģionā.

Pārbaudot ietekmes kategoriju punktus, atklājās, ka 1. scenārijam ir vislielākie ietekmes uz vidi rādītāji lielākajā daļā ietekmes kategoriju, kam seko 3. scenārijs, bet 2. scenārijam ir vismazākā ietekme uz vidi. Jāatzīmē, ka lielākajai daļai ietekmes kategoriju ir konsekventi rādītāji visos scenārijos. Kategorijas, piemēram, saldūdens un jūras ekotoksicitāte, nekancerogēna toksicitāte un minerālresursu trūkums, uzrāda dažādus scenārijus, parādot tikai sloga pārnesanu starp ietekmes kategorijām. Visos trīs scenārijos vislielāko ieguldījumu ietekmi uz vidi sniedz smalko daļiņu veidošanās. Šis atklājums atbilst arī citu literatūrā minēto pētījumu rezultātiem un būtu nopietnāk jārisina vietējās politikas plānošanā. Ņemot vērā, ka smalko daļiņu veidošanās galvenokārt ir kaitējums cilvēka veselībai, šim faktoram būtu jāpievērš pastiprināta uzmanība īpaši blīvi apdzīvotās vietās, piemēram, pilsētās, mazpilsētās, piepilsētas teritorijās.

Pētījumā aplūkotas trīs parametru kategorijas, tostarp kaitējums cilvēku veselībai, kaitējums ekosistēmām un kaitējums resursu pieejamībai. 1. scenārijs konsekventi uzrādīja vislielāko

kaitējumu visās trīs kategorijās, bet 2. scenārijs – vismazāko. Smalko cieta daļiņu radīšanai ir vislielākā ietekme uz cilvēka veselību ar izteiktāku ietekmi nekā pārējiem ietekmes rādītājiem, tad seko globālā sasilšana. Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem galvenie ekosistēmu bojājumu cēloņi ir zemes izmantošana un globālā sasilšana. Vienotā vērtējumā starp analizētajiem scenārijiem nozīmīgākais ir kaitējums cilvēka veselībai, kas vēlreiz parāda, ka īpaša uzmanība jāpievērš emisiju avotam – sadedzināšanas krāsniem, kas konkrētajos klimatiskajos apstākļos ir populāra dzīvojamo māju apkures tehnoloģija. Lai mazinātu iespējamus draudus cilvēku veselībai, vietējiem lēmumu pieņēmējiem un politikas plānotājiem aktīvāk jāpievēršas preventīvajiem pasākumiem, kas ļauj samazināt smalko daļiņu veidošanos. To var panākt, ieviešot attiecīgus noteikumus dzīvojamo māju īpašniekiem un apsaimniekotājiem, kas paredz dažādas piesārņojuma avotu filtrēšanas tehnoloģijas.

Jutīguma analīzes rezultāti apstiprina modeļa derīgumu un iznākumu reprezentatīvo raksturu. Jutīguma analīzē atklātie rezultāti sakrīt ar modeļa struktūrā iekļautajiem kritērijiem, stiprinot novērtējuma ticamību. Jutīguma analīzē konstatēts, ka 1. scenārijs ir visjutīgākais pret elektroenerģijas patēriņa izmaiņām, un tas ievērojami palielina ietekmi. 3. scenārijs arī uzrāda jutīgumu, lai gan ietekmes izmaiņas ir daudz mazākas nekā 1. scenārijā. 2. scenārijs šajā aspektā ir vismazāk jutīgs, norādot, ka tā ietekmes uz vidi profils ir stabilāks elektroenerģijas pieprasījuma izmaiņu apstākļos. Tomēr joprojām ir atklāts jautājums, kā risināt ietekmi uz vidi, kas īpaši saistīta ar siltumenerģijas ražošanu no vietējiem atjaunojamiem avotiem dzīvojamām ēkām. Šis aspekts būtu jārisina padziļināti turpmākajos pētījumos par dzīvojamo māju sektora energotehnoloģiju tēmu.

SECINĀJUMI

1. Energoapgādes drošība ir atkarīga gan no gan no sociālajiem gan tehnoloģiskajiem aspektiem. Sociālo aspektu pētniecība vairāk ir sociālo zinātņu nozare, bet tā nepaliek bez ievēribas arī eksaktajos pētījumos, jo cilvēku paradumu maiņa un uzvedība krīzes apstākļos var būtiski ietekmēt gan drošības, gan ietekmes uz vidi faktoros, kuri tiek plaši apskatīti promocijas darbā. Krīzes energoapgādes modelis būtiski atšķiras no ikdienas situācijām un pat nelieli traucējumi energoapgādē var radīt domino efektu izraisot daudz dziļākas krīzes, tai skaitā ekoloģiskās katastrofas, līdz ar ko drošības aspektiem ir jāpievērš ļoti augsta prioritāte.
2. Apskatot energoapgādes drošību no tehnoloģiskā aspekta, promocijas darbā sākotnējā diskusija ir par centralizēto vai decentralizēto energoapgādes modeli, kurš ir noturīgāks pret neparedzamām krīzes situācijām. Katram no modeļiem ir savas priekšrocības un trūkumi, kā galvenie ieguvumi centralizētajam energoapgādes modelim tiem pieminēta energoefektivitāte un iespēja efektīvāk piesaistīt investīcijas modernizācijas procesam, iekārtu nomaiņai, tīklu izbūvei, kaut tieši siltuma apgādes tīklu izbūve ir kritiskais jautājums vai modelis būs ekonomiski dzīvotspējīgs, tas saistāms ar tehnoloģiskiem izaicinājumiem blīvi apdzīvotās vietās un nesamērīgi lielām izmaksām reti apdzīvotās vietās.

Decentralizēts energoapgādes modelis uzrāda augstāku noturību krīzes situācijās, bet lielākie izaicinājumi ir augstas energoefektivitātes sasniegšana maza mēroga apkures katlos, sagaidāmas grūtības piesaistīt investīcijas modernu iekārtu uzstādīšanai, kvalificētu speciālistu piesaistei iekārtu apkopei un remontam.

3. Hibrīdais energoapgādes modelis ir uzrādījis augstāku noturību un piemērotību krīzes energoapgādes situācijās. Vairāku tehnoloģiju vienlaicīga izmantošana ļauj sezonāli un diennakts mainīgos apstākļos uzrādīt mazāku atkarību no ārējiem energoapgādes tīkliem, koģenerācijas iekārtas spēj pilnībā nodrošināt ēku siltuma apgādi un daļēji arī elektroapgādes pieprasījumu, kombinācijā ar saules PV paneļiem un akumulācijas iekārtām pie noteiktiem apstākļiem var darboties arī autonomi. Hibrīdā modeļa izveide prasa lielāks investīcijas sākotnējā posmā, bet ilgtermiņā ekonomiskie aspekti izlīdzinās salīdzinot ar centralizēto energoapgādes modeli, kuram ekonomiskās investīcijas sākotnējā posmā ir mazākas, bet enerģijas izmaksas ir lielākas, tās iepērkot no ārējiem piegādātājiem.
4. Izpētot vispiemērotākās tehnoloģijas autonoma energoapgādes modeļa izveide, kā vispiemērotākā tika noteikta Stirlinga dzinēja un biomasas apkures katla izmantošana. Veicot bibliogrāfisko izpēti tika secināts, ka pēdējā desmitgadē pieaug pētījumu skaits, kuri saistīti ar Stirlinga dzinēja izmantošanu koģenerācijas sistēmu izveidē, biomasas izmantošanā un autonomo energoapgādes sistēmu izveidē. Veicot eksperimentus tika izveidots empīriskais vienādojums, kurš norāda uz sakarībām starp saražoto siltuma un elektroenerģiju, pieaugot siltuma enerģijas ražošanai, pieaug arī elektroenerģijas ražošana, bet Stirlinga dzinēja darbībai ir nepieciešams sasniegt ne mazāk kā 350 °C, kas norāda uz nepieciešamību apkures katlu darbināt nominālās jaudas režīmā, kad katla kurtuves darba

temperatūra ir 700 °C robežās. Temperatūras režīma ievērošana norāda uz nepieciešamību izmantot siltuma akumulācijas sistēmu, kas nodrošina siltuma enerģijas stabilu pieprasījumu un mazina nepieciešamību katlam darboties ar samazinātu jaudu.

5. Stirlinga dzinēja tehnoloģiju aprites cikla analīze norāda vislielāko ietekmi uz vidi kurināmā sagatavošanas un sadedzināšanas posmā, paša dzinēja ietekme uz vidi ir būtiski mazāka. Sadedzināšanas cikla ietekme uz cilvēku veselību saistāma ar cieto daļiņu emisijām no biomasas sadedzināšanas norāda uz nepieciešamību paaugstināt katla energoefektivitāti un aicina domāt par dūmgāzu attīrīšanu, kā viens no risinājumiem būtu dūmgāzu mitrā attīrīšana, jeb tā saucamā skruberu izmantošana.
6. Energoapgādes risinājumi ir investīciju ietilpīgi, tehnoloģiju nomaiņa prasa laiku. Atsevišķas iekārtas un slēgumi var būt projektējami individuāli, kas prasa laiku. Secināms, ka krīzes situācijām jāgatavojas laicīgi, investējot uzreiz, negaidot kad jau krīze iestājusies, jo tad jau var būt par vēlu. Papildus jāņem vērā, ka apkures sistēmu apkures sezonas laikā atslēgt nav pieļaujams, kas prasa papildus plānošanas procesu un laiku pārbūves sagatavošanai. Investējot sākotnēji būs vieglāk pārvarēt krīzes un mazināsies riski energoapgādes pārtraukumiem.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- Abdelkareem, M. A. *et al.* (2021) 'Environmental aspects of fuel cells: A review', *The Science of the total environment*, 752. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.141803.
- Abid, M. *et al.* (2021) 'Performance Analysis of the Developed Air Source Heat Pump System at Low-to-Medium and High Supply Temperatures for Irish Housing Stock Heat Load Applications', *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 11753, 13(21), p. 11753. doi: 10.3390/SU132111753.
- Abuelyamen, A. and Ben-Mansour, R. (2018) 'Energy efficiency comparison of Stirling engine types (α , β , and γ) using detailed CFD modeling', *International Journal of Thermal Sciences*, 132, pp. 411–423. doi: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2018.06.026.
- Ahlqvist, V., Holmberg, P. and Tangerås, T. (2022) 'A survey comparing centralized and decentralized electricity markets', *Energy Strategy Reviews*, 40, p. 100812. doi: 10.1016/J.ESR.2022.100812.
- Ahmadi, L., Kannangara, M. and Bensebaa, F. (2020) 'Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37. doi: 10.1016/J.SETA.2019.100627.
- Al-Nimr, M., Khashan, S. A. and Al-Oqla, H. (2023) 'Novel techniques to enhance the performance of Stirling engines integrated with solar systems', *Renewable Energy*, 202, pp. 894–906. doi: 10.1016/J.RENENE.2022.11.086.
- Alam Emon, M. S., Ahmad, M. U. and Hasanuzzaman, M. (2022) 'Solar thermal energy conversion', in *Technologies for Solar Thermal Energy*. Academic Press, pp. 25–54. doi: 10.1016/B978-0-12-823959-9.00011-8.
- Alanne, K. and Jokisalo, J. (2014) 'Energy analysis of a novel domestic scale integrated wooden pellet-fueled micro-cogeneration concept', *Energy and Buildings*, 80, pp. 290–301. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.05.035.
- Alanne, K. and Saari, A. (2004) 'Sustainable small-scale CHP technologies for buildings: the basis for multi-perspective decision-making', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(5), pp. 401–431. doi: 10.1016/J.RSER.2003.12.005.
- Aldersey-Williams, J. and Rubert, T. (2019) 'Levelised cost of energy – A theoretical justification and critical assessment', *Energy Policy*, 124, pp. 169–179. doi: 10.1016/J.ENPOL.2018.10.004.
- Aliabadi, A. A. *et al.* (2009) 'Efficiency and Emissions Measurement of a Stirling-Engine-Based Residential Microcogeneration System Run on Diesel and Biodiesel', *Energy and Fuels*, 23(2), pp. 1032–1039. doi: 10.1021/EF800778G.
- Amani, N. and Soroush, A. A. R. (2021) 'Energy Consumption Management of Commercial Buildings by Optimizing the Angle of Solar Panels', *Journal of Renewable Energy and Environment*, 8(3), pp. 1–7. doi: 10.30501/JREE.2020.241836.1134.
- Angrisani, G. *et al.* (2015) 'Microcogeneration in buildings with low energy demand in load sharing application', *Energy Conversion and Management*, 100, pp. 78–89. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2015.04.065.
- APERC (2007) *A QUEST FOR ENERGY SECURITY IN THE 21 ST CENTURY*. Kachidoki.
- Arashnia, I. *et al.* (2015) 'Development of Micro-scale Biomass-fuelled CHP System Using Stirling Engine', *Energy Procedia*, 75, pp. 1108–1113. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.505.

- Ashok Kumar L., Indragandhi V. and Uma Maheswari Y. (2020) 'PVSYSY', *Software Tools for the Simulation of Electrical Systems*, pp. 349–392. doi: 10.1016/B978-0-12-819416-4.00009-0.
- Asif, M. (2022) 'Sustainable energy transition in the 21st century', *Handbook of Energy and Environmental Security*, pp. 27–38. doi: 10.1016/B978-0-12-824084-7.00023-0.
- Atabani, A. E. *et al.* (2012) 'Energy Economical and Environmental Analysis of Industrial Boilers Using VSD', *Applied Mechanics and Materials*, 110–116, pp. 3223–3233. doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.110-116.3223.
- Auñón-Hidalgo, J. A., Sidrach-de-Cardona, M. and Auñón-Rodríguez, F. (2021) 'Performance and CO₂ emissions assessment of a novel combined solar photovoltaic and thermal, with a Stirling engine micro-CHP system for domestic environments', *Energy Conversion and Management*, 230, p. 113793. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113793.
- Backes, J. G. *et al.* (2021) 'Life Cycle Sustainability Assessment of a dish-Stirling Concentrating Solar Power Plant in the Mediterranean area', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. doi: 10.1016/J.SETA.2021.101444.
- Badea, N., Vlad, C. and Stolan, A. (2010) 'Comparative study of energy performance for two mCCHP systems used in domestic residence', *Proceedings - 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, ISEEE 2010*, pp. 321–326. doi: 10.1109/ISEEE.2010.5628489.
- Badouard, T. *et al.* (2020) *Final Report Cost of Energy (LCOE) : Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments*. Rotterdam.
- Bahlawan, H. *et al.* (2020) 'Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by accounting for scaling effects', *Applied Thermal Engineering*, 171, p. 115062. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115062.
- Baker, M. J. (2004) 'Writing a Literature Review', *The Marketing Review*, 1(2), pp. 219–247. doi: 10.1362/1469347002529189.
- Bălănescu, D. T. and Homutescu, V. M. (2019) 'Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels', *Procedia Manufacturing*, 32, pp. 504–512. doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.246.
- Balcombe, P., Rigby, D. and Azapagic, A. (2015) 'Energy self-sufficiency, grid demand variability and consumer costs: Integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage', *Applied Energy*, 155, pp. 393–408. doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.06.017.
- Balode, L., Dolge, K. and Blumberga, D. (2021) 'The Contradictions between District and Individual Heating towards Green Deal Targets', *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 3370*, 13(6), p. 3370. doi: 10.3390/SU13063370.
- Bartolucci, L. *et al.* (2019) 'Fuel cell based hybrid renewable energy systems for off-grid telecom stations: Data analysis and system optimization', *Applied Energy*, 252, p. 113386. doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113386.
- Basu, P. (2010a) 'Gasification Theory and Modeling of Gasifiers', in *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Academic Press, pp. 117–165. doi: 10.1016/B978-0-12-374988-8.00005-2.
- Basu, P. (2010b) 'Pyrolysis and Torrefaction', in *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Academic Press, pp. 65–96. doi: 10.1016/B978-0-12-374988-8.00003-9.
- Baus, D. (2017) *Production of Energy and Environmental Protection as a Production of Energy and*

Environmental Protection as a Prerequisite for Sustainable Development Prerequisite for Sustainable Development. City University of New York.

Best, R. and Trück, S. (2020) 'Capital and policy impacts on Australian small-scale solar installations', *Energy Policy*, 136, p. 111082. doi: 10.1016/J.ENPOL.2019.111082.

Borisov, I., Khalatov, A. and Paschenko, D. (2022) 'The biomass fueled micro-scale CHP unit with stirling engine and two-stage vortex combustion chamber', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 58(7), pp. 1091–1103. doi: 10.1007/S00231-021-03165-Z/METRICS.

Brandoni, C. *et al.* (2014) 'Assessing the impact of micro-generation technologies on local sustainability', *Energy Conversion and Management*, 87, pp. 1281–1290. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2014.04.070.

Budak, Y. and Devrim, Y. (2019) 'Comparative study of PV/PEM fuel cell hybrid energy system based on methanol and water electrolysis', *Energy Conversion and Management*, 179, pp. 46–57. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.10.053.

BUILD (2021) *Rapid increase in solar installations potentially overloading the grid*. Available at: <https://build.com.au/rapid-increase-solar-installations-potentially-overloading-grid> (Accessed: 5 December 2023).

Business Europe (2022) *Business calls on market-driven winter preparedness*. Available at: <https://www.bussinesseurope.eu/publications/business-calls-market-driven-winter-preparedness> (Accessed: 4 December 2023).

C2ES (2018) *Resilience Strategies for Power Outages*, Center for Climate and Energy Solutions. Arlington.

Cabeza, L. F. *et al.* (2015) 'Introduction to thermal energy storage (TES) systems', in *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Woodhead Publishing, pp. 1–28. doi: 10.1533/9781782420965.1.

Cabinet of Ministers (2020a) 'On the Action Plan for Reducing Air Pollution for 2020-2030', *Latvijas Vestnesis*, p. 197. Available at: <https://likumi.lv/ta/id/314078-par-gaisa-piesarnojuma-samazinasanas-ricibas-planu-2020-2030-gadam> (Accessed: 14 April 2022).

Cabinet of Ministers (2020b) 'Par Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021.-2030 gadam', *Latvijas Vestnesis*, p. 29.

Cardozo, E. *et al.* (2014) 'Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power', *Applied Thermal Engineering*, 73(1), pp. 671–680. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2014.08.024.

Cardozo, E. and Malmquist, A. (2019) 'Performance comparison between the use of wood and sugarcane bagasse pellets in a Stirling engine micro-CHP system', *Applied Thermal Engineering*, 159, p. 113945. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.113945.

Carroll, P., Chesser, M. and Lyons, P. (2020) 'Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, p. 110275. doi: 10.1016/J.RSER.2020.110275.

CEC (2023) *Commission for Environmental Cooperation (CEC)*. Available at: <http://www.cec.org/> (Accessed: 1 December 2023).

Ceylan, C. and Devrim, Y. (2021) 'Design and simulation of the PV/PEM fuel cell based hybrid energy system using MATLAB/Simulink for greenhouse application', *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(42), pp. 22092–22106. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.034.

- Chadwick, L. (2022) *Energy crisis: What's the worst that could happen this winter?*, *Euronews*. Available at: <https://www.euronews.com/my-europe/2022/10/31/energy-crisis-whats-the-worst-that-could-happen-this-winter> (Accessed: 4 December 2023).
- Chakrabarty, M., Sarkar, D. and Basak, R. (2020) 'A comprehensive literature review report on basic issues of power system restoration planning', *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 101(3), pp. 287–297. doi: 10.1007/S40031-020-00449-6/METRICS.
- Cherp, A. and Jewell, J. (2014) 'The concept of energy security: Beyond the four As', *Energy Policy*, 75, pp. 415–421. doi: 10.1016/J.ENPOL.2014.09.005.
- Chmielewski, A. *et al.* (2016) 'Aspects of balanced development of RES and distributed micro-cogeneration use in Poland: Case study of a μ CHP with Stirling engine', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp. 930–952. doi: 10.1016/J.RSER.2016.01.131.
- Crema, L. *et al.* (2011) 'Development of a pellet boiler with Stirling engine for m-CHP domestic application', *Energy, Sustainability and Society*, 1(1), pp. 1–11. doi: 10.1186/2192-0567-1-5/FIGURES/14.
- Dahiru, A. T. *et al.* (2023) 'A comprehensive review of demand side management in distributed grids based on real estate perspectives', *Environmental Science and Pollution Research 2023 30:34*, 30(34), pp. 81984–82013. doi: 10.1007/S11356-023-25146-X.
- Damen, M. (2023) 'Four challenges of the energy crisis for the EU's strategic autonomy', *EU Strategic Autonomy 360°*, (April 2023).
- Damirchi, H. *et al.* (2015) 'Design, Fabrication and Evaluation of Gamma-Type Stirling Engine to Produce Electricity from Biomass for the Micro-CHP System', *Energy Procedia*, 75, pp. 137–143. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.240.
- Damirchi, H. *et al.* (2016) 'Micro Combined Heat and Power to provide heat and electrical power using biomass and Gamma-type Stirling engine', *Applied Thermal Engineering*, 103, pp. 1460–1469. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.04.118.
- Daoud, Z., Altstein, G. and Sakthivel, B. (2023) *Israel-Hamas War Impact Could Tip Global Economy Into Recession, Bloomberg*. Available at: <https://www.bloomberg.com/news/features/2023-10-12/israel-hamas-war-impact-could-tip-global-economy-into-recession?embedded-checkout=true> (Accessed: 4 December 2023).
- Dekker, E. *et al.* (2020) 'A taste of the new ReCiPe for life cycle assessment: consequences of the updated impact assessment method on food product LCAs', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(12), pp. 2315–2324. doi: 10.1007/S11367-019-01653-3/FIGURES/5.
- Denholm, P. *et al.* (2021) 'The challenges of achieving a 100% renewable electricity system in the United States', *Joule*, 5(6), pp. 1331–1352. doi: 10.1016/J.JOULE.2021.03.028.
- Dincer, I. and Rosen, M. A. (2015) 'Heat Pump Systems', *Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning*, pp. 131–168. doi: 10.1016/B978-0-12-417203-6.00004-1.
- Dolge, K. and Blumberga, D. (2022) 'What are the Linkages between Climate and Economy? Bibliometric Analysis', *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), pp. 616–629. doi: 10.2478/RTUECT-2022-0047.
- Dorothee, C. and Sondes, K. (2019) 'From Residential Energy Demand to Fuel Poverty: Income-induced Non-linearities in the Reactions of Households to Energy Price Fluctuations', *Energy Journal*, 40, pp. 101–137. doi: 10.5547/01956574.40.2.dcha.

Dorrell, J. and Lee, K. (2020) 'The Cost of Wind: Negative Economic Effects of Global Wind Energy Development', *Energies* 2020, Vol. 13, Page 3667, 13(14), p. 3667. doi: 10.3390/EN13143667.

Durcansky, P., Nosek, R. and Jandačka, J. (2020) 'Use of Stirling Engine for Waste Heat Recovery', *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4133, 13(16), p. 4133. doi: 10.3390/EN13164133.

Dutton, J. (2023) *Could Israel-Hamas war lead to another winter energy crisis for Europe?*, *Al-Monitor*. Available at: <https://www.al-monitor.com/originals/2023/10/could-israel-hamas-war-lead-another-winter-energy-crisis-europe> (Accessed: 4 December 2023).

Ecoinvent (2023) *Home - ecoinvent*. Available at: <https://ecoinvent.org/> (Accessed: 17 November 2023).

Elmer, T. et al. (2015) 'Fuel cell technology for domestic built environment applications: State-of-the-art review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, pp. 913–931. doi: 10.1016/J.RSER.2014.10.080.

Energy Agency, I. (2022) 'A 10-Point Plan to Cut Oil Use'. Available at: www.iea.org/t&c/ (Accessed: 4 December 2023).

Entezari, A., Manizadeh, A. and Ahmadi, R. (2018) 'Energetical, exergetical and economical optimization analysis of combined power generation system of gas turbine and Stirling engine', *Energy Conversion and Management*, 159, pp. 189–203. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.01.012.

EPA (2018) *Natural Gas Combustion*. Washington.

Euractiv (2022) *EU energy chief praises Algeria 'partnership'*. Available at: <https://www.euractiv.com/section/energy/news/eu-energy-chief-praises-algeria-partnership/> (Accessed: 4 December 2023).

European Commission (2020) *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*. Brussels.

European Commission (2022a) *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*. Brussels.

European Commission (2022b) *ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*. Brussels.

European Commission (2022c) *EU and Azerbaijan enhance bilateral relations*. Brussels.

European Commission (2022d) 'EU Egypt Israel Memorandum of Understanding', pp. 1–6.

European Commission (2022e) *Latest meeting of the EU-US Task Force on Energy Security*. Brussels.

European Commission (2022f) *Save Gas for a Safe Winter*. Luxembourg.

European Union (2012) 'Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union. PART THREE - UNION POLICIES AND INTERNAL ACTIONS. TITLE XXI - ENERGY. Article 194', *Official Journal of the European Union*, C 326/1.

Eurostat (2023) *EU energy mix and import dependency - Statistics Explained*. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:EU_energy_mix_and_import_dependency (Accessed: 4 December 2023).

Fabra, N. (2023) 'Reforming European electricity markets: Lessons from the energy crisis', *Energy*

Economics, 126. doi: 10.1016/j.eneco.2023.106963.

Famiglietti, J. *et al.* (2022) 'Developing a new data-driven LCA tool at the urban scale: The case of the energy performance of the building sector', *Energy Conversion and Management*, 256, p. 115389. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.115389.

Fisch, M. N., Guigas, M. and Dalenbäck, J. O. (1998) 'A REVIEW OF LARGE-SCALE SOLAR HEATING SYSTEMS IN EUROPE', *Solar Energy*, 63(6), pp. 355–366. doi: 10.1016/S0038-092X(98)00103-0.

Funcke, S. and Bauknecht, D. (2016) 'Typology of centralised and decentralised visions for electricity infrastructure', *Utilities Policy*, 40, pp. 67–74. doi: 10.1016/J.JUP.2016.03.005.

García, D. *et al.* (2022) 'Experimental and Numerical Characterisation of a Non-Tubular Stirling Engine Heater for Biomass Applications', *Sustainability (Switzerland)*, 14(24). doi: 10.3390/su142416488.

Gareiyou, Z., Drimili, E. and Zervas, E. (2021) 'Public acceptance of renewable energy sources', *Low Carbon Energy Technologies in Sustainable Energy Systems*, pp. 309–327. doi: 10.1016/B978-0-12-822897-5.00012-2.

Gautam, P., Kumar, S. and Lokhandwala, S. (2019) 'Energy-Aware Intelligence in Megacities', in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier, pp. 211–238. doi: 10.1016/B978-0-444-64083-3.00011-7.

George, J., Arun, P. and Muraleedharan, C. (2016) 'Stoichiometric Equilibrium Model Based Assessment of Hydrogen Generation through Biomass Gasification', *Procedia Technology*, 25, pp. 982–989. doi: 10.1016/J.PROTCY.2016.08.194.

Ghenai, C. and Bettayeb, M. (2017) 'Optimized design and control of an off grid solar PV/hydrogen fuel cell power system for green buildings', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 93(1). doi: 10.1088/1755-1315/93/1/012073.

Giddey, S., Badwal, S. P. S. and Ju, H. K. (2019) 'Polymer Electrolyte Membrane Technologies Integrated With Renewable Energy for Hydrogen Production', *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Renewable Energy Integrated with Membrane Operations*, pp. 235–259. doi: 10.1016/B978-0-12-813545-7.00010-6.

Global Solar Atlas (2023) *Global Solar Atlas*. Available at: <https://globalsolaratlas.info/map?c=55.028022,39.902344,3&m=site> (Accessed: 4 December 2023).

Gokarakonda, S., Venjakob, M. and Thomas, S. (2020) *D2.2 Report on EPC best practices*.

Gravelsins, A. *et al.* (2023) 'System Dynamics Model of Decentralized Household Electricity Storage Implementation: Case Study of Latvia', *Smart Cities 2023, Vol. 6, Pages 2553-2573*, 6(5), pp. 2553–2573. doi: 10.3390/SMARTCITIES6050115.

Habash, R. (2020) *Building as an energy system, Sustainability and Health in Intelligent Buildings*.

Hepbasli, A. and Kalinci, Y. (2009) 'A review of heat pump water heating systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), pp. 1211–1229. doi: 10.1016/J.RSER.2008.08.002.

Hepworth, A. (2011) *Rooftop solar panels overloading electricity grid*. Available at: <https://www.theaustralian.com.au/news/rooftop-solar-panels-overloading-electricity-grid/news-story/5ea583571dde0830ec34d3cd8c32b9dc> (Accessed: 5 March 2021).

Huang, Y. *et al.* (2017) 'Performance analysis of biofuel fired trigeneration systems with energy storage for remote households', *Applied Energy*, 186, pp. 530–538. doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.03.028.

- Huijbregts, M. A. J. *et al.* (2017) ‘ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level’, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), pp. 138–147. doi: 10.1007/S11367-016-1246-Y/TABLES/2.
- IEA (2023) *Emergency response and energy security*. Available at: <https://www.iea.org/about/emergency-response-and-energy-security> (Accessed: 6 December 2023).
- Ievina, L. *et al.* (2019) ‘Mapping of Distributed Power Generation Versus Biomass Availability’, *2019 IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2019 - Proceedings*. doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982373.
- Încili, V. *et al.* (2022) ‘Performance evaluation of novel photovoltaic and Stirling assisted hybrid micro combined heat and power system’, *Renewable Energy*, 189, pp. 129–138. doi: 10.1016/J.RENENE.2022.03.030.
- International Energy Agency (2022) *A 10-Point Plan to Reduce the European Union’s Reliance on Russian Natural Gas*. Paris.
- International Energy Agency (2023) *World Energy Investment 2023*. Paris.
- International Renewable Energy Agency (2023) *RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2022*. Abu Dhabi.
- IRENA (2019) *Future of solar photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)*, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf.
- Irie, N. and Kawahara, N. (2022) ‘Consumer preferences for local renewable electricity production in Japan: A choice experiment’, *Renewable Energy*, 182, pp. 1171–1181. doi: 10.1016/J.RENENE.2021.10.028.
- ISO (2006) ‘ISO 14040:2006(en), Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework’. Geneva: ISO. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> (Accessed: 17 November 2023).
- Jakstas, T. (2020) ‘What does energy security mean?’, *Energy Transformation Towards Sustainability*, pp. 99–112. doi: 10.1016/B978-0-12-817688-7.00005-7.
- Jan van Eck, N. and Waltman, L. (2022) ‘VOSviewer Manual’.
- Jeremi, M. (2009) *Distributed vs. centralized electricity generation: are we witnessing a change of paradigm?* Paris.
- Jonsson, D. K. *et al.* (2015) ‘Energy security matters in the EU Energy Roadmap’, *Energy Strategy Reviews*, 6, pp. 48–56. doi: 10.1016/J.ESR.2015.03.002.
- Jung, W. and Jazizadeh, F. (2019) ‘Human-in-the-loop HVAC operations: A quantitative review on occupancy, comfort, and energy-efficiency dimensions’, *Applied Energy*, 239, pp. 1471–1508. doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.01.070.
- Kabalci, E., Boyar, A. and Kabalci, Y. (2021) ‘Centralized power generation’, in *Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids*. Academic Press, pp. 47–72. doi: 10.1016/B978-0-12-821724-5.00002-7.
- Kacare, M. *et al.* (2021) ‘Spatial Analysis of Renewable Energy Sources’, *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), pp. 865–878. doi: 10.2478/RTUECT-2021-0065.

- Kalogirou, S. A. (2012) ‘Solar Thermal Systems: Components and Applications - Introduction’, *Comprehensive Renewable Energy*, pp. 1–25. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00301-2.
- Karanasiou, A. *et al.* (2016) *EMISSION FACTORS FOR BIOMASS BURNING*.
- Katona, B. and Laza, T. (2018) ‘The technical applicability of Stirling engines in a Hungarian village’, *Chemical Papers*, 72(12), pp. 3093–3103. doi: 10.1007/S11696-018-0531-6.
- Katsarava, M. and Gaschler, R. (2023) ‘Fluctuations in the wind energy supply do not impair acceptance of wind farms’, *Sustainable Energy Research 2023 10:1*, 10(1), pp. 1–9. doi: 10.1186/S40807-022-00071-8.
- Kazulis, V. *et al.* (2018) ‘Biomass and natural gas co-firing – evaluation of GHG emissions’, *Energy Procedia*, 147, pp. 558–565. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2018.07.071.
- Khadse, P. N. and Khadse, N. M. (2018) ‘Design of off grid trigeneration system using renewable energy sources for residential purpose in India’, *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI 2017*, pp. 1959–1965. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392056.
- Khan, H. R. ; Z. ; *et al.* (2022) ‘Development and Analysis of a Liquid Piston Stirling Engine’, *Engineering Proceedings 2022, Vol. 23, Page 34*, 23(1), p. 34. doi: 10.3390/ENGPROC2022023034.
- Khan, M. A. and Gohari Darabkhani, H. (2022) *Technoeconomic Analysis and Risk Assessment of Deploying Micro-Combined Heat and Power (M-Chp) Systems for Domestic Applications*, *SSRN Electronic Journal*. Paris: Elsevier BV. doi: 10.2139/SSRN.4044506.
- Khanafar, K. and Vafai, K. (2013) ‘Applications of Nanomaterials in Solar Energy and Desalination Sectors’, *Advances in Heat Transfer*, 45, pp. 303–329. doi: 10.1016/B978-0-12-407819-2.00005-0.
- Khelifa Kerfah, I. *et al.* (2020) ‘Analysis of strategies to reduce thermal discomfort and natural gas consumption during heating season in Algerian residential dwellings’, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development 2020 11:1*, 11(1), pp. 45–76. doi: 10.22712/SUSB.20200005.
- Khezri, R., Mahmoudi, A. and Aki, H. (2022) ‘Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153. doi: 10.1016/j.rser.2021.111763.
- Kiehadroudzinezhad, M., Merabet, A. and Hosseinzadeh-Bandbafha, H. (2023) ‘Bioenergy Programs in North and South America and Canada’, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. doi: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00028-1.
- Kielin-Maziarz, J. (2013) ‘Problems and challenges in the EU sustainable consumption and production action plan’, *International Journal of Public Law and Policy*, 3(3), pp. 276–286. doi: 10.1504/IJPLAP.2013.054745.
- Kijo-Kleczkowska, A., Bruś, P. and Więciorkowski, G. (2023) ‘Economic analysis of heat pump exploitation – A case study’, *Energy*, 280, p. 128184. doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128184.
- Knosala, K. *et al.* (2021) ‘Hybrid Hydrogen Home Storage for Decentralized Energy Autonomy’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(42), pp. 21748–21763. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.036.
- Kojonsaari, A. R. and Palm, J. (2023) ‘The development of social science research on smart grids: a semi-structured literature review’, *Energy, Sustainability and Society*, 13(1), pp. 1–15. doi: 10.1186/S13705-023-00381-9/FIGURES/5.

- Kott, J. and Kott, M. (2019) 'Generic Ontology of Energy Consumption Households', *Energies* 2019, Vol. 12, Page 3712, 12(19), p. 3712. doi: 10.3390/EN12193712.
- Kramens, Janis *et al.* (2021) 'Research of a biomass boiler with stirling engine microgeneration unit', *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), pp. 587–599. doi: 10.2478/RTUECT-2021-0043.
- Kramens, Jānis *et al.* (2021) 'RESEARCH OF BIOMASS MICRO-COGENERATION SYSTEM INTEGRATION WITH A SOLAR PV PANELS IN ZERO-ENERGY FAMILY BUILDING', *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 1(0), pp. 132–138. doi: 10.17770/ETR2021VOL1.6568.
- Kruyt, B. *et al.* (2009) 'Indicators for energy security', *Energy Policy*, 37(6), pp. 2166–2181. doi: 10.1016/J.ENPOL.2009.02.006.
- Kuhn, T. E. *et al.* (2021) *Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV), Energy and Buildings*. Elsevier. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.110381.
- Lam, M. K. *et al.* (2019) 'Biohydrogen Production From Algae', *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biohydrogen, Second Edition*, pp. 219–245. doi: 10.1016/B978-0-444-64203-5.00009-5.
- Larchet, K. *et al.* (2017) 'Enhancing economic competitiveness of dish Stirling technology through production volume and localization: Case study for Morocco', *AIP Conference Proceedings*, 1850(1), p. 50002. doi: 10.1063/1.4984406/616629.
- Lees, F. (2012) *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification*. Elsevier. Available at: https://books.google.lv/books?id=73M6aqqy-uUC&pg=PA2492&lpg=PA2492&dq=doi+10.1016/B978-0-12-397189-0.00040-9&source=bl&ots=_FaZ64TujW&sig=ACfU3U3FqdN66Uad6FaS657oMKW38UZc4w&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwiKxrCm9fqCAXuqHBAIHTwKD1QQ6AF6BAGIEAM#v=onepage&q=doi 10.101 (Accessed: 6 December 2023).
- Levine, A. (2003) 'Industrial waters: The power industry: Water requirements for power generation and cooling water', *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use*, pp. 75–101. doi: 10.1016/B978-185617389-6/50004-7.
- Liao, S. (2023) 'The Russia–Ukraine outbreak and the value of renewable energy', *Economics Letters*, 225, p. 111045. doi: 10.1016/J.ECONLET.2023.111045.
- Liu, Y., Xie, X. and Wang, M. (2023) 'Energy structure and carbon emission: Analysis against the background of the current energy crisis in the EU', *Energy*, 280, p. 128129. doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128129.
- Lombardi, S. *et al.* (2015) 'Effect of Coupling Parameters on the Performance of Fluidized Bed Combustor - Stirling Engine for a Micro CHP System', *Energy Procedia*, 75, pp. 834–839. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.149.
- Loonen, R. C. G. M. *et al.* (2013) 'Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, pp. 483–493. doi: 10.1016/J.RSER.2013.04.016.
- Luty, L. *et al.* (2023) 'Energy Security in Light of Sustainable Development Goals', *Energies* 2023, Vol. 16, Page 1390, 16(3), p. 1390. doi: 10.3390/EN16031390.
- LVĢMC (2021) *Latvijas klimats*. Available at: <https://videscentrs.lv/gmc.lv/lapas/latvijas-klimats> (Accessed: 5 December 2023).

- LVĢMC | *Climate of Latvia* (2010). Available at: <https://www.meteo.lv/en/lapas/environment/climate-change/climate-of-latvia/climat-latvia?id=1471> (Accessed: 17 November 2023).
- Maga s.r.o. (2021) *Wood gasifying boilers MA*. Available at: <https://magasro.sk/en/wood-and-brickets-boilers-d/wood-gasifying-boiler/> (Accessed: 1 December 2023).
- Malik, M. Z. *et al.* (2022) ‘A review on design parameters and specifications of parabolic solar dish Stirling systems and their applications’, *Energy Reports*, 8, pp. 4128–4154. doi: 10.1016/J.EGYR.2022.03.031.
- Mandø, M. (2013) ‘Direct combustion of biomass’, *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, pp. 61–83. doi: 10.1533/9780857097439.2.61.
- Maraver, D. *et al.* (2013) ‘Assessment of CCHP systems based on biomass combustion for small-scale applications through a review of the technology and analysis of energy efficiency parameters’, *Applied Energy*, 102, pp. 1303–1313. doi: 10.1016/J.APENERGY.2012.07.012.
- Marcotullio, P. J. *et al.* (2023) ‘Local power outages, heat, and community characteristics in New York City’, *Sustainable Cities and Society*, 99(September), p. 104932. doi: 10.1016/j.scs.2023.104932.
- Marocco, P. *et al.* (2022) ‘The role of hydrogen in the optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems’, *Journal of Energy Storage*, 46, p. 103893. doi: 10.1016/J.EST.2021.103893.
- Marra, F. S. *et al.* (2020) ‘Coupling a Stirling engine with a fluidized bed combustor for biomass’, *International Journal of Energy Research*, 44(15), pp. 12572–12582. doi: 10.1002/ER.5662.
- Martínez, D. M., Ebenhack, B. W. and Wagner, T. P. (2019) ‘Residential and commercial sector energy efficiency’, *Energy Efficiency*, pp. 227–269. doi: 10.1016/B978-0-12-812111-5.00008-1.
- Martinopoulos, G. (2020) ‘Are rooftop photovoltaic systems a sustainable solution for Europe? A life cycle impact assessment and cost analysis’, *Applied Energy*, 257. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114035.
- Massaro, M., Dumay, J. and Guthrie, J. (2016) ‘On the shoulders of giants: undertaking a structured literature review in accounting’, *Accounting, Auditing and Accountability Journal*, 29(5), pp. 767–801. doi: 10.1108/AAAJ-01-2015-1939/FULL/XML.
- Mauri, L., Vallati, A. and Ocloñ, P. (2019) ‘Low impact energy saving strategies for individual heating systems in a modern residential building: A case study in Rome’, *Journal of Cleaner Production*, 214, pp. 791–802. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.320.
- McKenna, R. (2018) ‘The double-edged sword of decentralized energy autonomy’, *Energy Policy*, 113, pp. 747–750. doi: 10.1016/J.ENPOL.2017.11.033.
- Merkel, E., McKenna, R. and Fichtner, W. (2015) ‘Optimisation of the capacity and the dispatch of decentralised micro-CHP systems: A case study for the UK’, *Applied Energy*, 140, pp. 120–134. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.036.
- Miccio, F. (2013) ‘On the integration between fluidized bed and Stirling engine for micro-generation’, *Applied Thermal Engineering*, 52(1), pp. 46–53. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.11.004.
- Di Micco, S. *et al.* (2023) ‘Techno-economic analysis of a multi-energy system for the co-production of green hydrogen, renewable electricity and heat’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(81), pp. 31457–31467. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.04.269.
- Microgen Engine Corporation (2018) ‘Microgen’s compact gas fired Heater-Generator’.
- Milojević, M. *et al.* (2021) ‘Households’ Energy Autonomy: Risks or Benefits for a State?’, *Energies*

2021, Vol. 14, Page 2026, 14(7), p. 2026. doi: 10.3390/EN14072026.

Minelli, F. (2017) *Achieving energy security and Environmental sustainable development*. New York.

Ministru kabinets (1994) 'Par siltumenerģijas piegādes nosacījumiem', *Latvijas Vēstnesis*, (204).

Ministru kabinets (2019) 'Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 002-19 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika"', *Latvijas Vēstnesis*, (280).

Ministru kabinets (2020) *Atviegloti nosacījumi neto sistēmas lietotājiem*. Available at: <https://www.mk.gov.lv/lv/jaunums/atviegloti-nosacijumi-neto-sistemas-lietotajiem> (Accessed: 5 December 2023).

Mišík, M. (2022) 'The EU needs to improve its external energy security', *Energy Policy*, 165, p. 112930. doi: 10.1016/J.ENPOL.2022.112930.

Moreno-Camacho, C. A. *et al.* (2019) 'Sustainability metrics for real case applications of the supply chain network design problem: A systematic literature review', *Journal of Cleaner Production*, 231, pp. 600–618. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.278.

Mota-Babiloni, A. and Navarro-Esbri, J. (2023) 'High-temperature heat pumps for renewable heating production', *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. doi: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00040-2.

Mundaca, L. *et al.* (2023) 'Hard-to-reach energy users: An ex-post cross-country assessment of behavioural-oriented interventions', *Energy Research and Social Science*, 104, p. 103205. doi: 10.1016/J.ERSS.2023.103205.

Nagapurkar, P. and Smith, J. D. (2019) 'Techno-economic optimization and environmental Life Cycle Assessment (LCA) of microgrids located in the US using genetic algorithm', *Energy Conversion and Management*, 181, pp. 272–291. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2018.11.072.

Najafi, G. *et al.* (2020) 'Optimization of combustion in micro combined heat and power (mCHP) system with the biomass-Stirling engine using SiO₂ and Al₂O₃ nanofluids', *Applied Thermal Engineering*, 169, p. 114936. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.114936.

Neave, A. (2002) 'Heat pumps and their applications', *Plant Engineer's Reference Book*, pp. 41-1-41-9. doi: 10.1016/B978-075064452-5/50096-1.

Ngoma, R. *et al.* (2018) 'How households adapted their energy use during the Zambian energy crisis', *Energy for Sustainable Development*, 44, pp. 125–138. doi: 10.1016/J.ESD.2018.03.007.

Nielsen, J. E. and Sørensen, P. A. (2016) 'Renewable district heating and cooling technologies with and without seasonal storage', in *Renewable Heating and Cooling*. Woodhead Publishing, pp. 197–220. doi: 10.1016/B978-1-78242-213-6.00009-6.

Nižetić, S., Tolj, I. and Papadopoulos, A. M. (2015) 'Hybrid energy fuel cell based system for household applications in a Mediterranean climate', *Energy Conversion and Management*, 105, pp. 1037–1045. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2015.08.063.

Nolting, L. *et al.* (2019) 'Locating experts and carving out the state of the art: A systematic review on Industry 4.0 and energy system analysis', *International Journal of Energy Research*, 43(9), pp. 3981–4002. doi: 10.1002/ER.4427.

Nunes, L. J. R. *et al.* (2019) 'Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers', *Journal of Cleaner Production*, 223, pp. 270–277. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.165.

- Nwaigwe, K. N., Mutabilwa, P. and Dintwa, E. (2019) 'An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids', *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), pp. 629–633. doi: 10.1016/J.MSET.2019.07.002.
- OECD (2022) *How vulnerable is European manufacturing to gas supply conditions?* Paris: OECD. doi: 10.1787/959D5BA0-EN.
- Oficiālās statistikas portāls (2023) *Share of renewable energy resources*. Available at: http://data.csb.gov.lv/pxweb/en/sociala/sociala__majapst/MTG020.px/ (Accessed: 15 March 2021).
- Oficiālās Statistikas Portāls (2021) *Elektriskā jauda un saražotā elektroenerģija no atjaunīgiem energoresursiem - Atjaunīgo energoresursu elektrostaciju veids, Rādītāji un Laika periods*. Available at: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENA/ENA040/ (Accessed: 15 July 2021).
- Okundamiya, M. S. (2021) 'Integration of photovoltaic and hydrogen fuel cell system for sustainable energy harvesting of a university ICT infrastructure with an irregular electric grid', *Energy Conversion and Management*, 250. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114928.
- Ong, K. S., Jiang, L. and Lai, K. C. (2018) 'Thermoelectric Energy Conversion', *Comprehensive Energy Systems*, 4–5, pp. 794–815. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00433-8.
- Ortega-Arriaga, P. *et al.* (2021) 'Grid versus off-grid electricity access options: A review on the economic and environmental impacts', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, p. 110864. doi: 10.1016/J.RSER.2021.110864.
- Ortwein, A. and Lenz, V. (2015) 'Flexible power generation from solid biofuels', *Smart Bioenergy: Technologies and Concepts for a More Flexible Bioenergy Provision in Future Energy Systems*, pp. 49–66. doi: 10.1007/978-3-319-16193-8_4/TABLES/5.
- Padinger, R. *et al.* (2019) 'Best practise report on decentralized biomass fired CHP plants and status of biomass fired small-and micro scale CHP technologies', *IEA Bioenergy*, 32(2019), pp. 1–83.
- Pakere, I. and Blumberga, D. (2019) 'Solar Energy in Low Temperature District Heating', *Environmental and Climate Technologies*, 23(3), pp. 147–158. doi: 10.2478/RTUECT-2019-0085.
- Pakere, I. and Blumberga, D. (2020) 'Solar power or solar heat: What will upraise the efficiency of district heating? Multi-criteria analyses approach', *Energy*, 198, p. 117291. doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117291.
- Pakere, I., Lauka, D. and Blumberga, D. (2019) 'Estimation of Carbon Emission Reduction from Upgrading the DH Network to the 4th Generation. Multivariate Linear Regression Model', *Environmental and Climate Technologies*, 23(2), pp. 64–73. doi: 10.2478/RTUECT-2019-0055.
- Pantaleo, A. M. *et al.* (2015) 'Thermo-economic Assessment of Small Scale Biomass CHP: Steam Turbines vs ORC in Different Energy Demand Segments', *Energy Procedia*, 75, pp. 1609–1617. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.381.
- Pascual-González, J. *et al.* (2016) 'Statistical analysis of the ecoinvent database to uncover relationships between life cycle impact assessment metrics', *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 359–368. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.05.129.
- Pauschinger, T. (2016) 'Solar thermal energy for district heating', *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, pp. 99–120. doi: 10.1016/B978-1-78242-374-4.00005-7.
- Pavel, C. C. *et al.* (2017) 'Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric

road transport applications', *Sustainable Materials and Technologies*, 12, pp. 62–72. doi: 10.1016/J.SUSMAT.2017.01.003.

Pawanonont, K. and Leephakpreeda, T. (2017) 'Feasibility analysis of power generation from landfill gas by using internal combustion engine, organic Rankine cycle and Stirling engine of pilot experiments in Thailand', *Energy Procedia*, 138, pp. 575–579. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.10.162.

Petticrew, M. and Roberts, H. (2008) 'Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide', *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*, pp. 1–336. doi: 10.1002/9780470754887.

Pires, A. L. G. *et al.* (2021) 'Main Trends and Criteria Adopted in Economic Feasibility Studies of Offshore Wind Energy: A Systematic Literature Review', *Energies* 2022, Vol. 15, Page 12, 15(1), p. 12. doi: 10.3390/EN15010012.

Pirmohamadi, A. *et al.* (2021) 'Integrated solar thermal systems in smart optimized zero energy buildings: Energy, environment and economic assessments', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, p. 101580. doi: 10.1016/J.SETA.2021.101580.

Plutshack, V. *et al.* (2019) 'New and renewable energy social enterprises accessing government support: Findings from India', *Energy Policy*, 132, pp. 367–378. doi: 10.1016/J.ENPOL.2019.05.009.

Praveenkumar, S. *et al.* (2022) 'Techno-economic optimization of PV system for hydrogen production and electric vehicle charging stations under five different climatic conditions in India', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(90), pp. 38087–38105. doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.09.015.

Priedniece, V. *et al.* (2017) 'Biomass Co-firing Laboratory Equipment', *Energy Procedia*, 113, pp. 390–395. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.04.019.

Priedniece, V. *et al.* (2018) 'Laboratory research of the flue gas condenser – fog unit', *Energy Procedia*, 147, pp. 482–487. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2018.07.056.

Ranieri, S., Prado, G. A. O. and MacDonald, B. D. (2018) 'Efficiency Reduction in Stirling Engines Resulting from Sinusoidal Motion', *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2887, 11(11), p. 2887. doi: 10.3390/EN11112887.

Regen Power (2022) *What are the problems faced by renewable energy?* Available at: <https://regenpower.com/what-are-the-problems-faced-by-renewable-energy/> (Accessed: 4 December 2023).

Renzi, M. and Brandoni, C. (2014) 'Study and application of a regenerative Stirling cogeneration device based on biomass combustion', *Applied Thermal Engineering*, 67(1–2), pp. 341–351. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2014.03.045.

De Rosa, M. *et al.* (2022) 'Diversification, concentration and renewability of the energy supply in the European Union', *Energy*, 253, p. 124097. doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.124097.

Rosato, A. *et al.* (2017) 'The micro-cogeneration and emission control and related utilization field', *Lecture Notes in Energy*, 33, pp. 795–834. doi: 10.1007/978-3-319-26950-4_36/COVER.

Rosato, A., Sibilio, S. and Ciampi, G. (2013) 'Energy, environmental and economic dynamic performance assessment of different micro-cogeneration systems in a residential application', *Applied Thermal Engineering*, 59(1–2), pp. 599–617. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.06.022.

Rosemain, M., Mukherjee, S. and Pollina, E. (2022) *Exclusive: Europe braces for mobile network blackouts* | Reuters, Reuters. Available at: <https://www.reuters.com/business/media-telecom/exclusive-europe-braces-mobile-network-blackouts-sources-2022-09-29/> (Accessed: 4 December 2023).

- Rozentale, L., Lauka, D. and Blumberga, D. (2018) 'Accelerating power generation with solar panels. Case in Latvia', *Energy Procedia*, 147, pp. 600–606. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2018.07.077.
- Rybach, L. (2012) 'Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps', in *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, pp. 189–207. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00704-6.
- Sadales Tikls (2023) *Elektroapgādes apskats*. Available at: <https://sadalestikls.lv/lv/elektroapgades-apskats> (Accessed: 4 December 2023).
- Sadeghi, H., Ijaz, A. and Singh, R. M. (2022) 'Current status of heat pumps in Norway and analysis of their performance and payback time', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, p. 102829. doi: 10.1016/J.SETA.2022.102829.
- El Safty, S. and Rabinovitch, A. (2022) *EU, Israel and Egypt sign deal to boost East Med gas exports to Europe*, Reuters. Available at: <https://www.reuters.com/business/energy/eu-israel-egypt-sign-deal-boost-east-med-gas-exports-europe-2022-06-15/> (Accessed: 4 December 2023).
- SAI, R., Furubayashi, T. and Nakata, T. (2017) 'Preliminary study of energy security and energy resilience evaluation in Japan', *Transactions of the JSM*, 83(846), pp. 16–00161. Available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/83/846/83_16-00161/_article/-char/en (Accessed: 6 December 2023).
- Saidur, R. *et al.* (2011) 'A review on biomass as a fuel for boilers', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp. 2262–2289. doi: 10.1016/J.RSER.2011.02.015.
- Salih, S. A. *et al.* (2022) 'Factors Affecting the Thermodynamic Performance of the Stirling Engines: a Review Study', *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 16(10), pp. 529–539. doi: 10.15866/IREME.V16I10.22549.
- Schlösser, F. *et al.* (2020) 'Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, p. 110219. doi: 10.1016/J.RSER.2020.110219.
- Scimagojr (2023) *Scimago Journal & Country Rank*. Available at: <https://www.scimagojr.com/> (Accessed: 1 December 2023).
- Secundo, G. *et al.* (2020) 'Sustainable development, intellectual capital and technology policies: A structured literature review and future research agenda', *Technological Forecasting and Social Change*, 153, p. 119917. doi: 10.1016/J.TECHFORE.2020.119917.
- Shboul, B. *et al.* (2021) 'Design and Techno-economic assessment of a new hybrid system of a solar dish Stirling engine integrated with a horizontal axis wind turbine for microgrid power generation', *Energy Conversion and Management*, 245. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114587.
- Sheykhi, M. *et al.* (2019) 'Performance investigation of a combined heat and power system with internal and external combustion engines', *Energy Conversion and Management*, 185, pp. 291–303. doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.01.116.
- Shinobu, Y. and Matsuki, K. (1990) 'Recent Technical Trends in Direct Expansion Solar Heat Pump Systems', *Heat Pumps*, pp. 487–496. doi: 10.1016/B978-0-08-040193-5.50058-4.
- Simola, A. *et al.* (2018) 'Optimal dimensioning of a solar PV plant with measured electrical load curves in Finland', *Solar Energy*, 170, pp. 113–123. doi: 10.1016/J.SOLENER.2018.05.058.
- Sioshansi, F. P. (2014) 'Decentralized Energy: Is It as Imminent or Serious as Claimed?', *Distributed Generation and its Implications for the Utility Industry*, pp. 3–32. doi: 10.1016/B978-0-12-800240-

7.00001-1.

Smirnov, S. V. *et al.* (2021) 'A calculation method of a heat rejection system in a lunar power plant consisting of a free-piston Stirling engine (FPSE)', *Acta Astronautica*, 180, pp. 46–57. doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2020.12.008.

Soares, J. and Oliveira, A. C. (2017) 'Numerical simulation of a hybrid concentrated solar power/biomass mini power plant', *Applied Thermal Engineering*, 111, pp. 1378–1386. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.06.180.

Speidel, S. and Bräunl, T. (2016) 'Leaving the grid—The effect of combining home energy storage with renewable energy generation', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp. 1213–1224. doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.325.

Staffell, I. *et al.* (2010) 'UK microgeneration. Part II: Technology overviews', *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*, 163(4), pp. 143–165. doi: 10.1680/ENER.2010.163.4.143/ASSET/IMAGES/SMALL/ENER163-143-F9.GIF.

Streimikiene, D. and Baležentis, T. (2013) 'Multi-criteria assessment of small scale CHP technologies in buildings', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, pp. 183–189. doi: 10.1016/J.RSER.2013.05.046.

Stropnik, R. *et al.* (2022) 'The influence of degradation effects in proton exchange membrane fuel cells on life cycle assessment modelling and environmental impact indicators', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(57), pp. 24223–24241. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.04.011.

Suciu, R. *et al.* (2019) 'Systematic Integration of Energy-Optimal Buildings With District Networks', *Energies 2019, Vol. 12, Page 2945*, 12(15), p. 2945. doi: 10.3390/EN12152945.

Sydney Adams, H. (2022) *How Israel can support Europe in the gas crisis*, *Energy Digital*. Available at: <https://energydigital.com/oil-and-gas/how-israel-can-support-europe-in-the-gas-crisis> (Accessed: 4 December 2023).

Taccari, L. *et al.* (2015) 'Short-Term Planning of Cogeneration Power Plants: a Comparison Between MINLP and Piecewise-Linear MILP Formulations', *Computer Aided Chemical Engineering*, 37, pp. 2429–2434. doi: 10.1016/B978-0-444-63576-1.50099-6.

Takeuchi, M., Suzuki, S. and Abe, Y. (2021) 'Development of a low-temperature-difference indirect-heating kinematic Stirling engine', *Energy*, 229, p. 120577. doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120577.

Teirumnieka, E. *et al.* (2023) 'Sustainability dilemma of hemp utilization for energy production', *Energy Nexus*, 11, p. 100213. doi: 10.1016/J.NEXUS.2023.100213.

Teixeira, S. F. C. F. (2020) 'Assessment of the Stirling engine performance comparing two renewable energy sources: Solar energy and biomass', *Renewable Energy*. Available at: https://www.academia.edu/79871159/Assessment_of_the_Stirling_engine_performance_comparing_two_renewable_energy_sources_Solar_energy_and_biomass (Accessed: 17 November 2023).

Telicko, J., Heincis, D. and Jakovics, A. (2020) 'A study of solar panel efficiency in Latvian climate conditions', *E3S Web of Conferences*, 172, p. 16007. doi: 10.1051/E3SCONF/202017216007.

Thadani, H. L. and Go, Y. I. (2021) 'Integration of solar energy into low-cost housing for sustainable development: case study in developing countries', *Heliyon*, 7(12), p. e08513. doi: 10.1016/J.HELİYON.2021.E08513.

Thomas, J. *et al.* (2018) *Measurement of the in-situ performance of solid biomass boilers Full technical*

report. Cheltenham.

Ulloa, C. *et al.* (2013) 'Development of a Transient Model of a Stirling-Based CHP System', *Energies* 2013, Vol. 6, Pages 3115-3133, 6(7), pp. 3115–3133. doi: 10.3390/EN6073115.

Umbach, F. (2010) 'Global energy security and the implications for the EU', *Energy Policy*, 38(3), pp. 1229–1240. doi: 10.1016/J.ENPOL.2009.01.010.

UN Environment programme (2022) *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Available at: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/41133>.

Urchueguia, J. F. (2016) 'Shallow geothermal and ambient heat technologies for renewable heating', in *Renewable Heating and Cooling*. Woodhead Publishing, pp. 89–118. doi: 10.1016/B978-1-78242-213-6.00005-9.

Uzuneanu, K., Scarpete, D. and Badea, N. (2010) 'Technical assessment and thermodynamic analysis of a prime mover Stirling engine in a micro CCHP biomass system for an isolated residence in South-East region of Romania'.

Vaziri Rad, M. A. *et al.* (2023) 'Excess electricity problem in off-grid hybrid renewable energy systems: A comprehensive review from challenges to prevalent solutions', *Renewable Energy*, 212, pp. 538–560. doi: 10.1016/J.RENENE.2023.05.073.

Vigants, G. *et al.* (2015) 'Cost Analysis of a Wood Chip Boiler House with a Gas Condenser', *Energy Procedia*, 75, pp. 1214–1220. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.159.

Voronca, Ștefan D., Siroux, M. and Darie, G. (2022) 'Experimental Characterization of Transitory Functioning Regimes of a Biomass Stirling Micro-CHP', *Energies* 2022, Vol. 15, Page 5547, 15(15), p. 5547. doi: 10.3390/EN15155547.

Voronca, S. D. *et al.* (2022) 'Simulating ON-OFF Regimes on a Micro-CHP Using Biomass', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1050(1), p. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/1050/1/012010.

Walkermorris (2022) *Energy blackouts: Mitigating risks for businesses*. Available at: <https://www.walkermorris.co.uk/in-brief/energy-blackouts-mitigating-risks-for-businesses/> (Accessed: 4 December 2023).

Wei, W. and Skye, H. M. (2021) 'Residential net-zero energy buildings: Review and perspective', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, p. 110859. doi: 10.1016/J.RSER.2021.110859.

Weinand, J. M., Scheller, F. and McKenna, R. (2020) 'Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy', *Energy*, 203, p. 117817. doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117817.

Wirth, H. (2017) *Recent facts about photovoltaics in Germany, Fraunhofer ISE*. Freiburg.

Wittenberg, I. and Matthies, E. (2016) 'Solar policy and practice in Germany: How do residential households with solar panels use electricity?', *Energy Research & Social Science*, 21, pp. 199–211. doi: 10.1016/J.ERSS.2016.07.008.

WoodCo Energy Ireland (2017) *E-Compact Prestige 25P/40P Installation and Operation Manual*. Donaskeigh.

Yin, H., Zadshir, M. and Pao, F. (2021) *Building Integrated Photovoltaic Thermal System*. Academic Press.

- Zhang, H. *et al.* (2020) 'Load Distribution Optimization of Multi-Source District Heating System Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process', *IEEE Access*, 8, pp. 209074–209090. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038381.
- Zhang, J. *et al.* (2022) 'Life cycle assessment of three types of hydrogen production methods using solar energy', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(30), pp. 14158–14168. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.150.
- Zhang, Linlin *et al.* (2022) 'A review on emergency response and recovery method for large area outage of power grid', *IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, ITOEC 2022*, pp. 544–551. doi: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734679.
- Zhang, Le *et al.* (2022) 'Application of Exergy Analysis in Flue Gas Condensation Waste Heat Recovery System Evaluation', *Energies 2022, Vol. 15, Page 7525*, 15(20), p. 7525. doi: 10.3390/EN15207525.
- Zhu, S. *et al.* (2018) 'Modeling and experimental investigation of a free-piston Stirling engine-based micro-combined heat and power system', *Applied Energy*, 226, pp. 522–533. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.122.
- Zhu, S. *et al.* (2021) 'A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology', *Applied Energy*, 294, p. 116965. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116965.
- Zlaugotne, B. *et al.* (2020) 'Multi-Criteria Decision Analysis Methods Comparison', *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), pp. 454–471. doi: 10.2478/RTUECT-2020-0028.



Jānis Kramens dzimis 1972. gadā Liepājā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis automātikas inženiera kvalifikāciju (1995).

Pēc vairāku gadu darba medicīnas tehnoloģiju jomā 2011. gadā atsācis akadēmiskās studijas RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā maģistrantūras programmā, pētot autonomās energoapgādes sistēmas un atjaunojamo energoresursu izmantošanas iespējas Latvijas apstākļos. Jau studiju laikā nodarbojies ar praktiskiem risinājumiem enerģētiski autonomas mājsaimniecības izveidei, īpašu uzmanību pievēršot saules, vēja un biomasas mikroģenerācijas tehnoloģiju izmantošanai.

RTU ieguvis maģistra grādu (2014). Doktorantūras studiju laikā padziļināti pētījis biomasas izmantošanas iespējas siltuma un elektroenerģijas ražošanā maza izmēra apkures katlos. Pēdējo gadu ģeopolitiskie procesi pasaulē lika pievērst lielāku uzmanību arī energoapgādes drošībai, tādējādi papildinot jau iesākto izpēti jaunā dimensijā. Promocijas darba izstrādes gaitā izpētīta gan Stirlinga dzinēja tehnoloģija, gan daudzpusīgi apskatīti energoapgādes drošības jautājumi. Doktorantūras studiju laikā uzrakstītas 10 zinātniskās publikācijas, no tām deviņām J. Kramens ir pirmais autors.