

Jānis Kramens

ENERGOAPGĀDES DROŠĪBAS TEHNOLOĢIJAS: STIRLINGA DZINĒJS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Jānis Kramens

Doktora studiju programmas "Vides inženierija" doktorants

ENERGOAPGĀDES DROŠĪBAS TEHNOLOĢIJAS: STIRLINGA DZINĒJS

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Dr. sc. ing. EDGARS VĪGANTS

Dr. sc. ing. VLADIMIRS KIRSANOVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2024

Kramens J. Energoapgādes drošības tehnoloģijas:
Stirlinga dzinējs. Promocijas darba kopsavilkums. –
Rīga: RTU Izdevniecība, 2024. – 34 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19”
2023. gada 28. decembra lēmumu, protokols Nr. 183.

<https://doi.org/10.7250/9789934370472>
ISBN 978-9934-37-047-2 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 2. maijā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 116. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. Raimondas Grubliauskas*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Asociētais profesors *Ph. D. Adam Cenian*,
Polijas Zinātņu akadēmijas Šķidrums plūsmas mašīnu institūts, Polija

APSTIPRINĀJUMS

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

Jānis Kramens (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 59 attēli, 13 tabulas, kopā 130 lappuses. Literatūras sarakstā ir 263 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
1. METODOLOĢIJA	9
1.1. Bibliogrāfiskā analīze.....	9
1.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze.....	10
1.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance.....	11
1.4. Eksperimentālā izpēte	12
1.5. Aprite cikla analīze	13
2. REZULTĀTI	14
2.1. Bibliogrāfiskā analīze.....	14
2.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze.....	16
2.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance.....	17
2.4. Eksperimentāla izpēte	21
2.5. Aprite cikla analīze	25
3. DISKUSIJA	29
3.1. Bibliogrāfiskā analīze.....	29
3.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze.....	29
3.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance.....	30
3.4. Eksperimentālā izpēte	31
3.5. Aprite cikla analīze	32
SECINĀJUMI	33

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitātē

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 sasetā *COP28*, kas 2023. gadā notika Dubaijā.

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

Energoapgādes drošība specifiskos krīzes apstākļos atšķiras no situācijas miera apstākļos, un tai ir duāla dimensija.

1. Tehnoloģiskā risinājuma dimensija (sākot ar mikroģenerāciju un beidzot ar lielām koģenerācijas stacijām vienlaikus vai atsevišķai siltuma un elektroenerģijas ražošanai).
2. Enerģijas pieprasījuma dimensija (sākot no individuālas viengimenes 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 dažādos potenciālo krīžu apstākļos un definēt īpašus nosacījumus šīm situācijām.

Lai izpildītu darba mērķi, ir definēti vairāki uzdevumi.

1. Veikt elektroenerģijas avotu tehnoloģisko risinājumu zinātnisko izpēti, izvērtējot to lietojuma piemērotību energoapgādes nodrošināšanai patērētājam krīzes situācijās.
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 mūsdienās.
3. Noteikt Stirlinga dzinēja veiktspēju, veicot eksperimentālo izpēti reāliem apstākļiem pielīdzinātos 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 zinātniska novitāte

Promocijas darba izstrādes laikā radīti vairāki zinātniskie jauninājumi, kas balstīti vēsturiski zināmu tehnoloģisko risinājumu inovatīvā integrācijā 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 energoavotā empīriskā modeļa izveidei;
- daudzkritēriju 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 sešās publikācijās, 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:

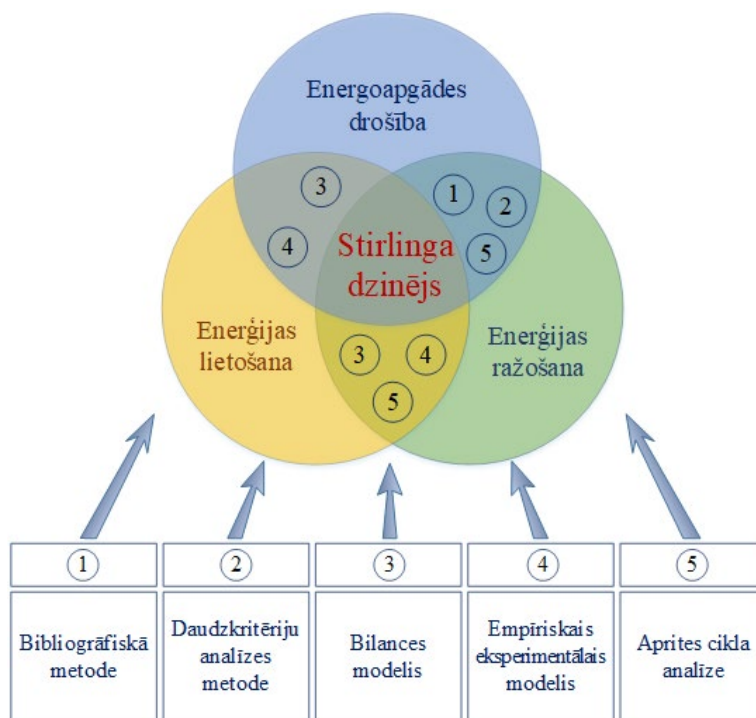
- 1) literatūras analīze;
- 2) pētījuma metodoloģija;
- 3) rezultāti;
- 4) diskusijas.

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, diskutēts par darbā sasniegto un definēti secinājumi.

Promocijas darba struktūra, izmantojot trīskāršās spirāles pieeju, redzama 1. attēlā.



1. att. Promocijas darba struktūra.

Trīskāršās spirāles pieejas ilustrācija ietver visas darbā izmantotās metodes un 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 liecina par Stirlinga dzinēja izmantošanas aktualitāti. Šajā izpētes posmā 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. METODOLOĢIJA

Šajā nodaļā aplūkota veikto pētījumu un eksperimentu metodoloģija. Šī metodoloģija nodrošināja iegūto datu ticamību un drošumu.

1.1. 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* procesā, pirmkārt, ir jāizstrādā literatūras apskata protokols, un viens no sākotnējiem soļiem ir pētījuma jautājumu formulēšana (*Research Questions, RQ*). Strukturētam literatūras apskatam ir izstrādāti šādi *RQ*:

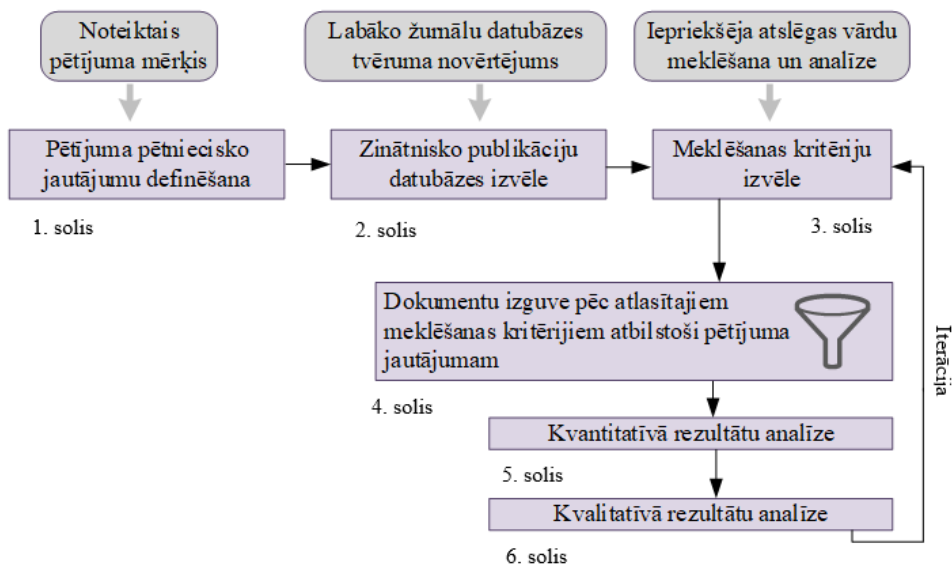
RQ1 – kā Stirlinga dzinēju pētniecība attīstījusies agrāk un tagad;

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 (1.1. att.) ir aprakstīts *SLR* process, tajā iekļautas metodes, kas izmantotas informācijas avotu (datubāzes) izvēlei, analizējamo pētījumu atlasei, apkopošanai un izpētei.

Saskaņā ar datubāzes novērtēšanas pieeju, 2. 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". 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 %. Atlasē nebija neviena žurnāla, kas bija iekļauts *Web Of Science* datubāzē un nebija pieejams *Scopus*.



1.1. att. Lietotā pētījuma metodoloģija.

3. solis ir meklēšanas kritēriju atlase, lai filtrētu visu literatūras datubāzi. Tika lietoti šādi paņēmieni: pirmkārt, sākotnējai atslēgvārdu ģenerēšanai un analīzei tiek analizēta attiecīgās izpētes jomas literatūra, pēc tam tiek izmantota reversā meklēšana (*backward*) un uz priekšu (*forward*), lai uzlabotu meklēšanas kritērijus. Vispārīgākais atslēgvārds “Stirlinga dzinējs” tika izmantots sākotnējai meklēšanai.

1.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze

Šajā pētījumā tika izmantotas divas metodes: literatūras apskats un daudzkritēriju analīze (*Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA*). Literatūras apskats balstīts zinātniskajā literatūrā. *MCDA* izvēlēta, pamatojoties uz pārskatīto dokumentu.

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*); saules šķīvju Stirlinga dzinējs (*SE/SD*). 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 (1.1. tab.).

1.1. tabula

Daudzkritēriju lēmumu analīzes kritēriji

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

1.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance

Kompleksā metodoloģija izstrādāta, lai novērtētu enerģētiskās drošības palielināšanas scenārijus. Datu pieejamībai (lietotāju datiem vai energoauditam) ir liela nozīme, veidojot pareizo priekšstatu un tālāk izstrādājot atbilstošus attīstības scenārijus. Ja, izvērtējot esošo situāciju, tiks konstatēts, ka alternatīvais scenārijs nav nepieciešams vai pāreja uz jaunām tehnoloģijām nav iespējama, tad piedāvātais risinājums var ietvert ieteikumus esošās tehnoloģijas uzlabošanai.

Visi definētie scenāriji tika salīdzināti savstarpēji, kā arī ar bāzes scenāriju, kas raksturo pašreizējo situāciju. Lietotājs var izvēlēties kritērijus, pēc kuriem tiks salīdzināti analizētie scenāriji. 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.

Pētījumā tika veikta gadījuma izpēte Ādažu pilsētai. Ņemtas vērā tikai vietējās pašvaldības ēkas (1.2. tab.).

1.2. tabula

Izvēlēto pašvaldības ēku tehniskie parametri

Municipālā ēka	Apz.	Apkures zona, m ²	<i>E</i> (vidējais), MWh/mēn	<i>Q</i> (vidējais), MWh/mēn	Īp. gada <i>E</i> , kWh/m ²	Īp. gada <i>Q</i> , 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
Bērnu dārzs	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 sezonā, ** ārpus apkures sezonas.

1.4. Eksperimentālā izpēte

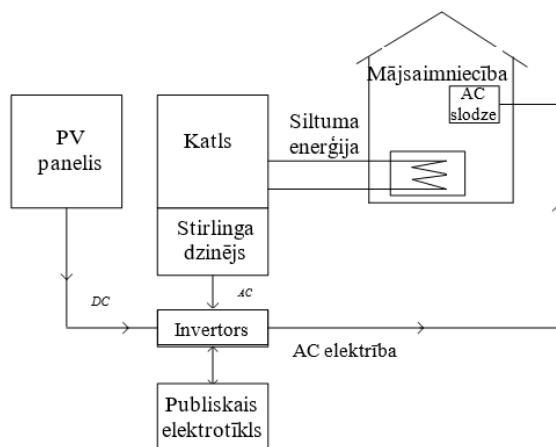
1. eksperiments – Stirlinga dzinēja darbības izpēte

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. Mājsaimniecību pašpatēriņa skalas Stirlinga dzinēja *mCHP* lietojuma novērtēšanai tika izstrādāta un uzstādīta eksperimentālā testa iekārta. 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 CO_2 un O_2 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. eksperiments – Stirlinga dzinēja apvienošana ar saules paneli

Izpētes sistēma sastāv no mikrokoģenerācijas iekārtas, kuras pamatā ir ārdedzes Stirlinga dzinējs, cietās biomasas gazifikācijas katla un saules fotosprieguma paneļiem (*PV*). Eksperimentiem izmantots cietās biomasas mikrokoģenerācijas iekārtas prototips. Prototipa izveidei izmantots “A” klases cietās biomasas apkures katls *Magasro 31 kW*. Pētījumam izveidota saules *PV* paneļu sistēma uz ēkas jumta 14° attiecībā pret horizontu ar novietojumu uz dienvidiem, uzstādītā paneļa kopējā jauda ir 1200 W. Pētījums veikts sistēmā, kas pieslēgta ārējam publiskajam elektrotīklam (2.19. att.).



2.19. att. Sistēmas savienojuma shēma.

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

1.5. Aprite cikla analīze

Šajā pētījumā izmantota *LCA* metodoloģija saskaņā ar vienoto standartu *ISO 14040:2006*, lai salīdzinātu dažādu vienģimenes dzīvojamo ēku energoapgādes scenāriju ietekmi uz vidi. 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 vienģimenes dzīvojamā māja Latvijā. Mājas dzīvojamā platība ir 200 m².

Salīdzinošā *LCA* veikta vienģimenes dzīvojamai mājai Latvijā šādiem scenārijiem:

- 1. scenārijs – siltumapgāde no katla un elektroenerģijas padeve no tīkla;
- 2. scenārijs – siltumapgāde no katla un elektroenerģijas padeve no *PV* paneļiem;
- 3. scenārijs – siltuma un elektroenerģijas piegāde no *mCHP*.

Šī pētījuma mērķis ir noskaidrot, kuram no definētajiem scenārijiem ir vismazākā ietekme uz vidi, kas saistīta ar izvēlētajām tehnoloģijām no to šūpuļa līdz izmantošanai enerģijas ražošanā, ieskaitot izejvielu iegūvi, transportēšanu, pārstrādi, ražošanu un kurināmā patēriņu no salīdzinātajiem scenārijiem. Aprite beigu posms, kas attiecas uz tehnoloģiju iznīcināšanu, šajā pētījumā nav iekļauts.

2. REZULTĀTI

Šajā nodaļā aplūkoti iepriekšējās nodaļās aprakstītie veikto pētījumu rezultāti.

2.1. Bibliogrāfiskā analīze

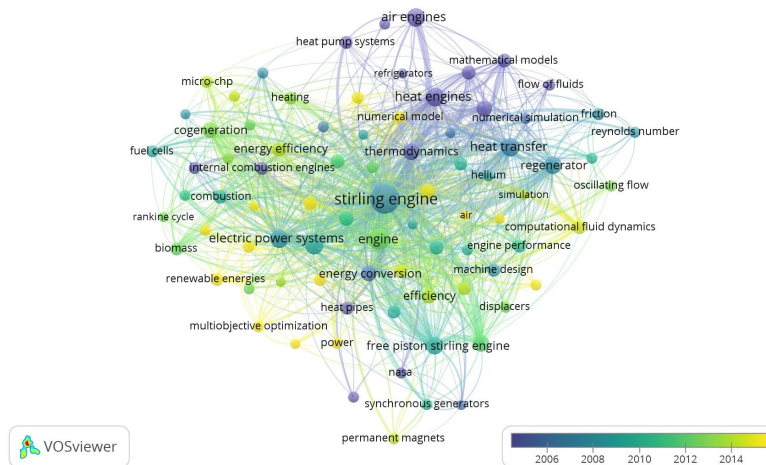
Kvantitatīvo rezultātu kopsavilkums visiem trim pētījuma jautājumiem redzams 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Meklēšanas kritēriji katram no definētajiem pētījuma jautājumiem

<i>RQ</i>	Iegūti ieraksti	Iegūti pilni papīri	Laika rindu 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 konferences referāti, 1 apskats

Iegūtajos rakstos kā atslēgvārdi, kas attiecas uz saules tehnoloģijām, izmantoti dažādi termini. Tomēr pēdējo 10 gadu laikā vislielākais kopējais pieaugums vērojams ar “efektivitāti” saistītu atslēgvārdu lietojumam. Attiecībā uz analizēto publikāciju ģeogrāfisko pārklājumu ir apkopotas valstis, kas visbiežāk publicē ar Stirlinga dzinēju saistītos pētījumus. Ģeogrāfisko pārklājumu var vizualizēt, izmantojot bibliometriskās datu analīzes programmas, piemēram, *VOS viewer*. *VOS viewer* vizualizācijas iespējas izmantotas arī, lai analizētu iegūtajos rakstos izmantoto atslēgvārdu dinamiku laikā. Minimālais atslēgvārdu pieminēšanas skaits iestatīts 50, lai iegūtu reprezentējamu atslēgvārdu kopu, kā arī tika apvienoti dublicējošo tēmu raksti, nodrošinot aizstājējsinonīmus. Līdz ar to vismaz 50 publikācijās minēti 84 atslēgvārdi, kas apvienoti trīs galvenajās kopās (2.1. att.).



2.1. att. Visbiežāk sastopamo atslēgvārdu pārklājuma vizualizācija *RQ1*.

Lai atbildētu uz *RQ2*, veikta vēl viena dokumentu ieguves iterācija, pamatojoties uz speciālu meklēšanas kritēriju kopu. Mērķis bija izvēlēties konkrēto saderību ar Stirlinga dzinēju saistīto literatūru, kurā aplūkoti arī to lietojumi dzīvojamajās mājās, kur kā kurināmo izmanto biomasu. Lai panāktu vēl labāku māsaimniecības mēroga tehnoloģiju pārklājumu, no *RQ1* atslēgvārdu statistikas tika iegūtas sešas populārākās ar mikrokoģenerāciju saistītu atslēgvārdu variācijas un pievienotas pētījuma virknei ar loģiskā “VAI” funkciju.

Tālāk apkopota to publikāciju statistika, kas atlasītas, lai atbildētu uz *RQ2*. Agrākās no iegūtajām publikācijām ir publicētas 2001. gadā, 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. Līdzās bažām par vides un klimata pārmaiņām pašreizējās un turpmākās energoapgādes drošības problēmas arī turpmāk veicinās Stirlinga 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 liecina par tēmas aktualitāti pēdējā laikā.

Kā atklāja Stirlinga dzinēja vēsturiskās attīstības tendence, tehnoloģijas aktualitāte un popularitāte gadu gaitā ir svārstījusies, taču pēdējos gados un arī līdz ar plašākas publicēšanas iespējām pieaug pētījumu intensitāte. Viens no daudzsološākajiem jaunajiem attīstības virzieniem, kas identificēts ar strukturētās literatūras analīzes pieejas izvēlēto rakstu satura analīzi, ir pētījumi par biomasas kurināmo tehnoloģiju un Stirlinga dzinēju integrāciju.

Kā norādīts sākotnējās izpētes un atslēgvārdu 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.

Attiecībā uz ārpusīkla AER sistēmām nozīmīgs izaicinājums var būt ražošanas un pieprasījuma pārvaldība. 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. Augstās siltuma un jaudas attiecības un atkarības no siltuma pieprasījuma dēļ Stirlinga dzinēji vasarā var darboties tikai ar pārtraukumiem. Gaidāmā tendence ir integrētu *PV* un Stirlinga dzinēja hibrīda koģenerācijas sistēmu lietošana.

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. Kopumā 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.

2.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas salīdzinošā analīze

Kvantitatīvie dati par katru kritēriju un alternatīvām ir apkopoti 2.2. tabulā.

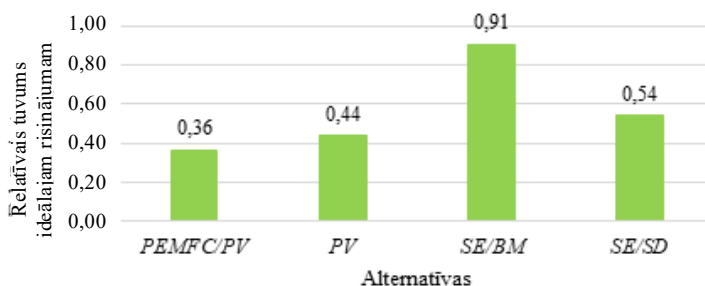
2.2. tabula

Daudzkritēriju lēmumu analīzes lēmumu matrica

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

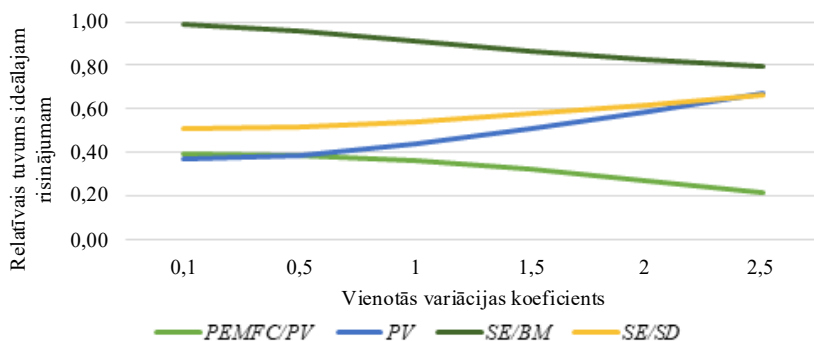
Dažādu veidu kurināmā elementu elektriskā efektivitāte svārstās no 20 % līdz 70 %. Tomēr, aplūkojot to sistēmu efektivitāti, kurās tie darbojas, var redzēt, ka efektivitāte parasti ir diapazonā no 10 % līdz 60 %. *PEMFC* elektriskā efektivitāte ir no 50 % līdz 60 %, savukārt sistēmas, kurā tas darbojas,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

Pēc datu apkopošanas tika veikti *TOPSIS* aprēķini (2.2. att.).



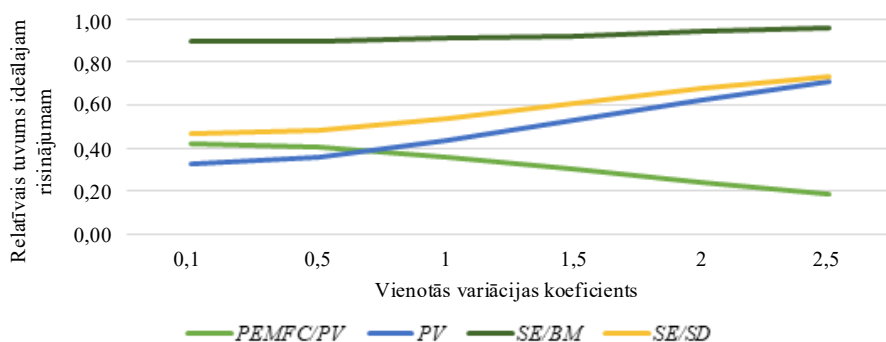
2.2. att. *TOPSIS* analīzes rezultāti.

Juīguma 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 (2.3. att.).



2.3. att. Darbības laika 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 vietām *LCOE* un kalpošanas laika kritēriju analīzē, t. i., *PV* ieņem pēdējo vietu, savukārt *PEMFC/PV* pārceļas uz trešo vietu. *LCOE* kritērija analīzes rezultāti redzami 2.4. attēlā.



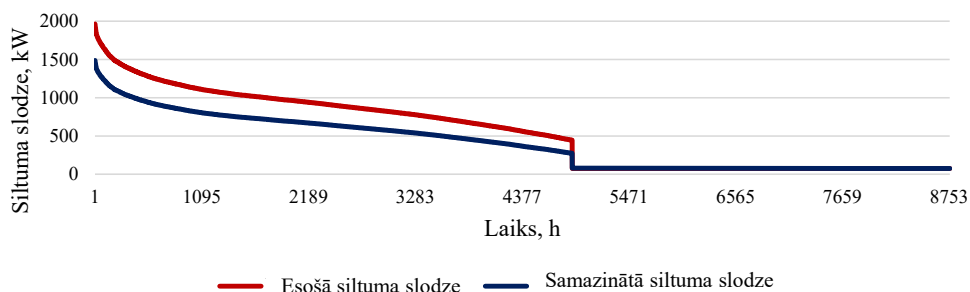
2.4. att. Enerģijas kritēriju izlīdzināto izmaksu jutīguma analīzes rezultāti.

Ja kritērijam tiek piešķirta liela ietekme (vienotās variācijas koeficients ir 2,5), visām alternatīvām, izņemot ar biomasu darbināmo Stirlinga dzinēju, ir mainīga pakāpe.

2.3. Energoapgādes sistēmas darbības bilance

Pamatojoties uz siltumenerģijas (Q) patēriņa analīzi, izvēlētajām ēkām noteiktas iespējas tā samazināšanai. Ņemot vērā korelāciju starp Q patēriņu un āra gaisa temperatūru, ir izveidota siltumslodzes diagramma (2.5. 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

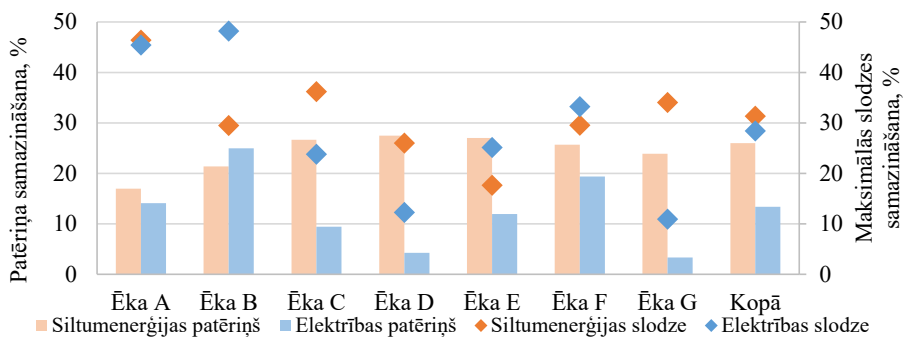
maksimālās stundas. Rezultātā energotehnoloģijas lielāko daļu apkures sezonas strādā ar samazinātu siltuma slodzi. Turklāt energotehnoloģiju jaudas izvēle atbilstoši maksimālajai siltuma slodzei palielina kapitāla izmaksas uzstādīšanas laikā. Dažām ēkām ir Q patēriņš vasaras periodā karstā ūdens sagatavošanai. 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.



2.5. att. Izvēlēto pašvaldības ēku kopējā siltumslodze gadā.

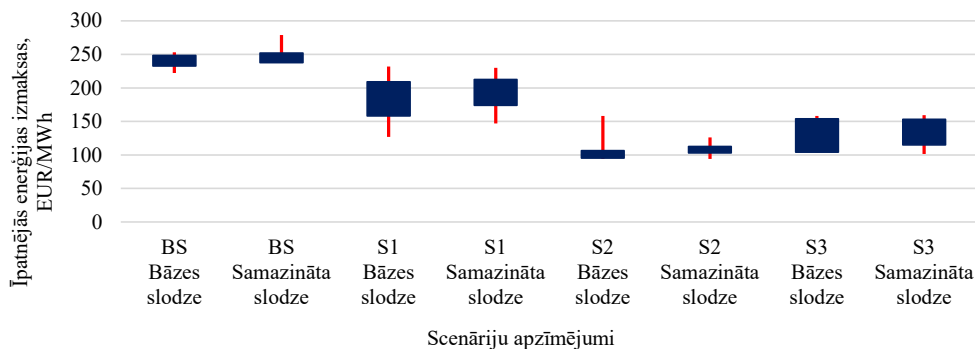
Elektrības (E) gadījumā tiek piemērota arī līmeņatzīme E patēriņa samazināšanai. Katrai ēkai kā līmeņatzīme izmantots ikmēneša E patēriņš, kas nedrīkst būt lielāks par vidējo E patēriņu gadā. Tas ierobežo maksimālo E patēriņu un maksimālo elektrisko slodzi. Samazinās arī vidējais E patēriņš gadā. Lielākais E patēriņa kritums ir vērojams ziemas mēnešos. Maksimālais samazinājums ir decembrī (34,7 MWh).

Piemērojot noteiktas līmeņatzīmes, tiek samazināts gan kopējais Q un E patēriņš, gan maksimālā siltuma un elektriskā slodze. 2.6. attēlā redzams 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 (26,0%), vismazāko samazinājumu – E patēriņā (13,4%). Pīķa 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.



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

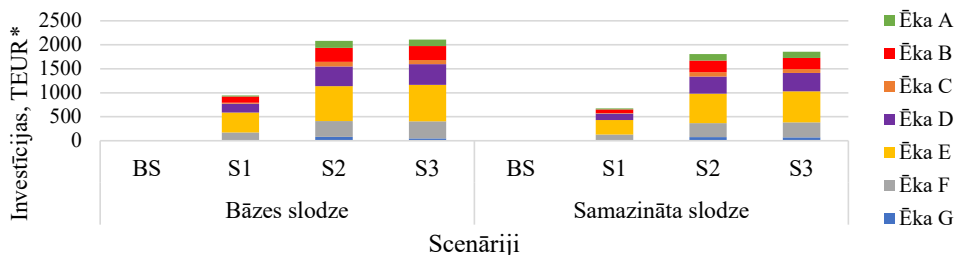
Katram pētījumā iekļautajam scenārijam tika aprēķinātas īpatnējās enerģijas izmaksas. Rezultāti liecina, ka katrā alternatīvajā scenārijā (S1, S2 un S3) šis rādītājs ir zemāks nekā pašreizējā situācijā (BS scenārijs). 2.7. attēlā redzama īpatnējo enerģijas izmaksu izkliede starp visām atlasītajām ēkām, kas ņemtas vērā visos scenārijos. S1 ar SE scenārijam ir vislielākā izkliede, kas liecina, ka šī tehnoloģija var būt piemērota, lai sasniegtu augstus rezultātus. BS scenārijs ir visneizdevīgākais variants (vidējais rādītājs ir 241 EUR/MWh pie bāzes slodzes, 245 EUR/MWh pie samazinātas slodzes). Izdevīgākā alternatīva ir S2 scenārijs. Ieviešot piedāvātās tehnoloģijas šajā scenārijā, 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 rada īpatnējo izmaksu pieaugumu.



2.7. att. Izvēlēto scenāriju īpatnējās enerģijas izmaksas.

S1, S2 un S3 scenārijiem nepieciešamas jaunas enerģijas tehnoloģijas, kas prasa ieguldījumus. BS scenārijs ir balstīts pašreizējā situācijā un izmantotajās energotehnoloģijās, tāpēc papildu investīcijas nav nepieciešamas. 2.8. attēlā redzami kumulatīvie ieguldījumi – vērtību summa katrai izvēlētajai ēkai katrā scenārijā. Zemākais rādītājs ir S1 scenārijam, jo tajā paredzēts izmantot tikai vienu hibrīdtehnoloģiju – granulu katlu ar SE. Ievērojami lielākas investīcijas ir S2 un S3 scenārijos, jo papildus tiek izmantotas saules tehnoloģijas – S2 scenārijā

saules PV ar HP, S3 scenārijā – saules kolektori ar TES. Vislielākās kumulatīvās investīcijas tiek prognozētas S3 scenārijam.



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

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. Dažādām ēkām S1 scenārija ieviešana atmaksāsies deviņu gadu laikā. 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.

Pētījumā katrs scenārijs tika izvērtēts, ne tikai pamatojoties uz tehniskajiem priekšnosacījumiem un ekonomiskajiem faktoriem, bet arī analizēta tā ietekme uz vidi. 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. Biomasas tiek uzskatīta par oglekļa neitrālu kurināmo. Svarīgi atzīmēt, ka 2.3. tabulā apkopotie emisijas faktori attiecas uz kopējo saražotās enerģijas daudzumu, kas noteiktā proporcijā ietver gan Q , gan E . Ņemot vērā to, ka biomasas gadījumā šis energoresurss tiek izmantots vienlaikus, emisijas koeficienti nav izdalīti katram enerģijas veidam, bet attiecināti uz kopējo enerģijas daudzumu.

Emisijas faktori atkarībā no scenārijiem

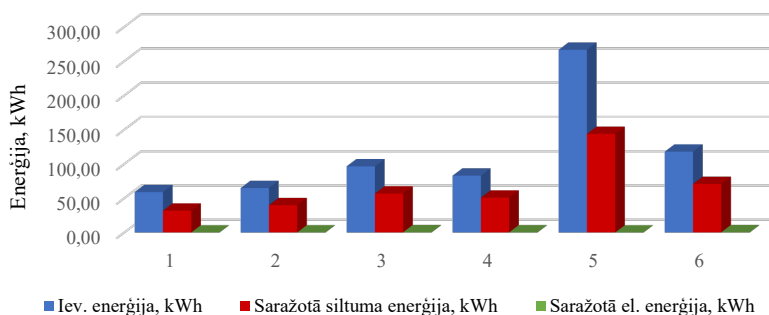
Scenāriji		CO, g/MWh	NO _x , g/MWh	PM, g/MWh	CO ₂ , kg/MWh
	BS	117	142	0	224
Bāzes slodze	S1	521	456	391	0
	S2	378	331	283	0
	S3	416	364	312	0
	BS	119	144	0	229
Samazināta slodze	S1	536	469	402	0
	S2	362	317	271	0
	S3	434	380	326	0

Scenāriju kopējā ietekme uz vidi ir atkarīga no izmantotā energoresursa veida un izmantotā energoresursa daudzuma. Kopējā emisiju daudzuma aprēķināšanai izmantotas 2.3. 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. Dabaszāģes 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), dabaszāģes 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 dabaszāģes sadedzināšanas laikā izdalās liels CO₂ daudzums. Bāzes slodzes gadījumā scenārijā BS tiek saražotas 1326 tonnas CO₂ emisiju, samazinātas slodzes gadījumā – 1026 tonnas CO₂ emisiju. 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, 1644 kg CO emisiju, 1438 kg NO_x emisiju un 1233 kg PM emisiju samazinātas slodzes gadījumā.

2.4. Eksperimentālā izpēte

1. eksperiments. Stirlinga dzinēja darbības izpēte

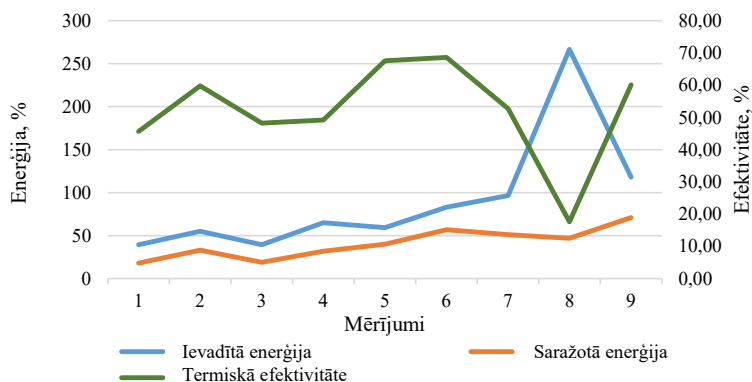
Lai noteiktu koģenerācijas režīma ietekmi uz apkures katlu, veikti eksperimenti termiskajā un koģenerācijas režīmā. Trīs eksperimenti (1.–3.) veikti tikai siltumenerģijas ražošanas režīmā, savukārt seši eksperimenti (4.–9.) veikti koģenerācijas režīmā. Katrā eksperimentā veikti termiskās un elektriskās efektivitātes aprēķini. Veikts pievadītās enerģijas (malkas) un izmērītās siltumenerģijas un elektroenerģijas izlaides salīdzinājums (2.9. att.). Ņemot vērā eksperimenturezultātus, kas redzami 2.9. attēlā, tika aprēķināta sistēmas termiskā un summārā (siltuma + elektriskā) efektivitāte. Papildus aprēķināts, cik vidēji siltumenerģijas un elektroenerģijas eksperimentālā iekārta spēj saražot no 1 kg koksnes.



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

Izvērtējot eksperimentu rezultātus, netika konstatēta elektroenerģijas ražošanas koģenerācijas režīma ietekme uz katla siltumražīgumu. 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. 4.–9. eksperimentā netika konstatēti ievērojami siltuma jaudas zudumi. Iepriekšminētais liek secināt, ka stacijas darbība koģenerācijas režīmā palielina iekārtas kopējo efektivitāti (2.9. att.), salīdzinot ar identiskiem katliem, kas darbojas tikai siltumenerģijas ražošanas režīmā.

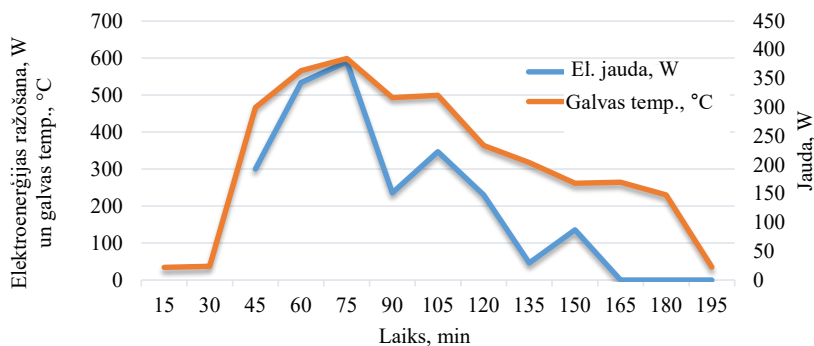
Izvērtējot emisijas no apkures sistēmas, visa eksperimenta laikā ik pēc 15 minūtēm tika veikti CO₂ un O₂ mērījumi dūmgāzēs ar dūmgāzu analizatoru *Testo 340*. Novērots kvalitatīvs degšanas process, no 30 min. līdz 180 min. (2.10. attēlā), kas atbilst “A” klases katlu standartiem



2.10. att. Katla termiskā efektivitāte.

Stirlinga dzinēja produktivitāte noteikta, izmantojot *Stirling Engine Data Viewer* programmatūru, reģistrējot datus ik pēc 15 minūtēm. Saskaņā ar plānu eksperimentos izmantoti dažādi kurināmā veidi un mitruma saturs. Papildus tika pārbaudītas malkas un zāģskaidu briekšu kombinācijas. Eksperimenta gaitā konstatēta korelācija starp Stirlinga dzinēja galvas temperatūru un ģeneratora saražoto elektroenerģiju 4.–9. eksperimentam (2.9. att.). Viens no reprezentatīvākajiem eksperimenta rezultātiem redzams 2.11. attēlā eksperimenta 90 min. un

150 min. 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.

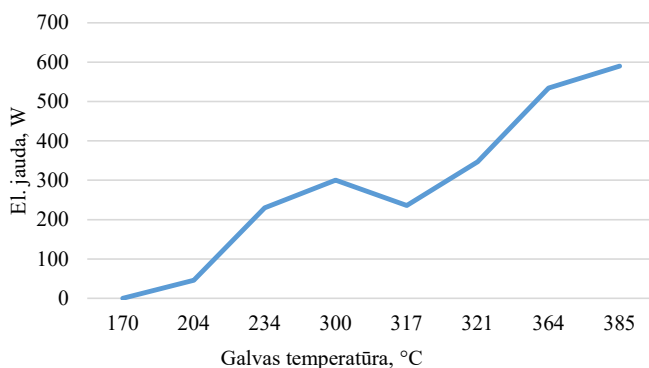


2.11. att. *MCHP* elektroģenerators jauda (zilā līnija) atkarībā no dzinēja galvas temperatūras (sarkanā līnija; dati iegūti reprezentatīvākajā 7. eksperimentā).

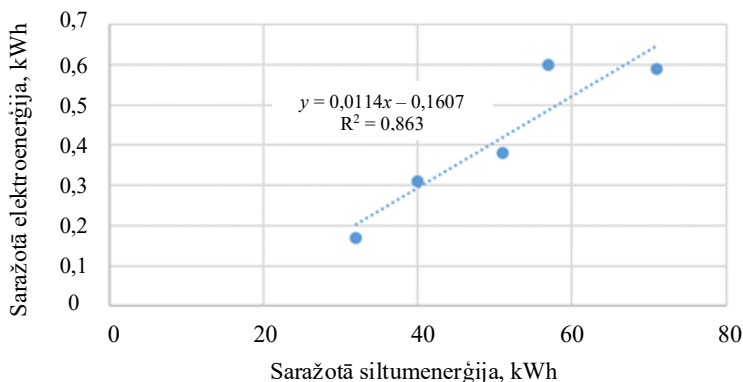
2. eksperiments. Stirlinga dzinēja apvienošana ar saules paneli

Pētījumā izmantotās *mCHP* stacijas elektroenerģijas ražošana ir tieši saistīta ar katla siltumenerģijas ražošanu. Pētījuma gaitā veikti eksperimenti, kuru mērķis bija noskaidrot, cik siltuma un elektroenerģijas *mCHP* iekārta spēj saražot koģenerācijas režīmā.

Eksperimentu sērijas veiktas, lai noteiktu *mCHP* sistēmas elektroenerģijas un siltumenerģijas (2.12. un 2.13. att.) ražošanu no 1 kg malkas sadedzināšanas. Trīs eksperimenti veikti tikai siltumenerģijas ražošanas režīmā, savukārt 4.–9. eksperiments veikts koģenerācijas režīmā.



2.12. att. Elektroenerģijas ražošana no Stirlinga dzinēja ģenerators.



2.13. att. Saražotās elektroenerģijas un siltumenerģijas sakarība.

Lai noteiktu faktisko *PV* paneļu saražotās elektroenerģijas apjomu, savākti dati no eksperimentāli uzstādītās 1,2 kW saules paneļu sistēmas. Ņemot vērā to, 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 tālākā darba gaitā tiek analizēti visas saražotās elektroenerģijas dati. Turpmākajiem aprēķiniem izmantoti dati no tīklam piesaistītajām sistēmām. Atbilstoši eksperimenta rezultātiem (2.13. att.) aprēķināts, ka, stacijai darbojoties koģenerācijas režīmā, gadā tiktu saražotas 1014 kWh elektroenerģijas.

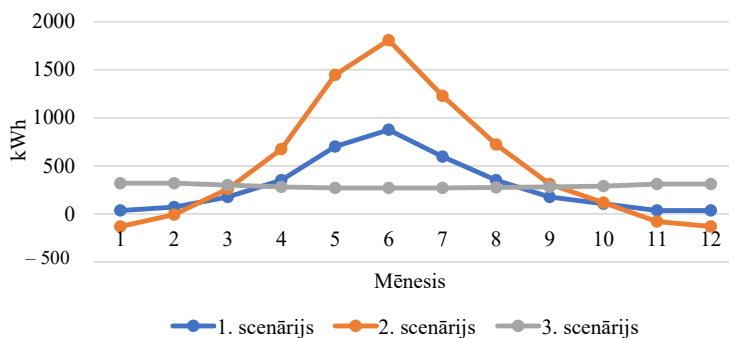
mCHP sistēmas elektroenerģijas ražošana ir tieši atkarīga no katla siltumenerģijas, kā rezultātā kopējā gadā saražotā elektroenerģija ir atkarīga no mājsaimniecības siltumenerģijas pieprasījuma. Veicot pārrēķinu, noteikts, ka, sadedzinot 1 kg malkas, iegūtas vidēji 0,026 kWh elektroenerģijas (2.13. att.) un 2,53 kWh siltuma enerģijas. Mājsaimniecība ar šiem parametriem gadā patērē 39 MWh siltumenerģijas. Attiecīgi aprēķinot *mCHP* iekārtas iespējas saražot elektroenerģiju, ja tā darbotos visu kalendāro gadi, nodrošinot siltuma enerģijas pieprasījumu, tiktu saražotas 1014 kWh elektroenerģijas.

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.

Ikmēneša elektroenerģijas pieprasījums mājsaimniecībā vidēji 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. Mājsaimniecības gada elektroenerģijas pieprasījuma segšanai nepieciešams 3015 W uzstādītās *PV* jaudas. Tas nozīmē, ka nepieciešami 10 saules paneļi (katrs 300 W).

Ekspērimētālīe aprēķīnī veiktī, lai definētu mājsaimnīcību gada patēriņa elektroenerģījas piegādī (*Supply of consumption, SOC*), izmantojot *PV* sistēmu kombināciju ar *mCHP*, lai sasniegtu *NET Zero* bilanci. Lai noteiktu, cik daudz elektroenerģījas *PV* paneļu sistēma spēj saražot kalendārā gada laikā, veikta inventarizācija, kā arī literatūras apskats par līdzīgu *PV* sistēmu darbību Latvijā. Tika apskatīti trīs scenāriji no *NET Zero* bilances skatpunkta (2.14. att.).



2.14. att. *NET Zero* enerģījas plūsma uz un no publiskā sadales tīkla.

2.5. Aprītes cikla analīze

SimaPro programmatūrā izveidotā modeļa rezultāti viengīmenes dzīvojamo ēku energoapgādes modeļiem analizēti vairākos scenārijos, tostarp viena atsevišķa scenārija m un scenārijam, kad ietekmes noteiktas katram konkrētā emisījas veidam, kā arī konkrētā procesa kopējo ietekmi, gan procesa viduspunktā, gan beigu posmā. Ir veikta dažādu scenāriju salīdzinošā analīze, ņemot vērā iepriekš minētās kategorijas. Vērtēšanas kritēriju daudzdimensionālītāte ļauj noteikt, kur starp scenārijiem rodas vides slodžu sekas. Visi dati tiek izteikti *Functional Unit (FU)* un precīzi atspoguļo atšķirības starp tehnoloģijām analizētajos scenārijos.

Modeļa struktūra ir attēlota ar modeļa tīkla koka, 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 %.

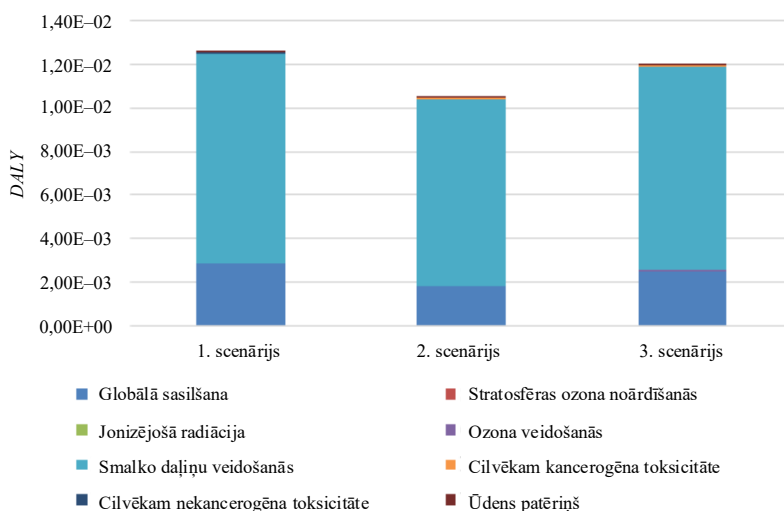
1. scenārija modeļa tīkla koks parāda siltumenerģījas ražošanas efektivitāti katlā (70,9 %) un elektroenerģījas patēriņu publiskajā tīklā (29,1 %). Aplūkojot 1. scenārija devuma cēloņus, siltumenerģījas ražošanā lielāko ietekmes daļu rada malkas sagatavošana (16,9 %). 2. scenārija tīkla koka diagramma (3.27. att.) parāda, ka siltumenerģījas ražošanas katlā ietekmes daļa ir līdz 84,7 %. Sistēmai pievienota elektroenerģījas ražošana ar saules *PV*, kas veido 4,2 % no kopējās ietekmes. Ietekme, kas saistīta ar elektroenerģījas patēriņu no publiskā tīkla, 2. scenārijā ir 11,1 %. 3. scenārija tīkla koks parāda siltuma ražošanas ietekmes uz vidi daļu, kas vienāda ar 74,4 %, elektroenerģījas patēriņa no publiskā tīkla daļa ir 21,8 %, un Stirlinga dzinējam tā ir 3,85 %.

Ietekmes kategoriju rādītāji

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

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; kaitējums resursu pieejamībai. Ietekme, kas saistīta ar kaitējumu cilvēka veselībai, ko mēra *DALY*, redzama 2.15. attēlā. Augstākais cilvēka veselībai nodarītais kaitējums ir 1. scenārijā, vismazākais – 2. scenārijā. Vislielāko kaitējumu cilvēka veselībai starp analizēto scenāriju ietekmes kategorijām ir nodarījusi smalko daļiņu veidošanās. Otrā lielākā ietekme ir globālās sasilšanas kategorijai. Pārējām ietekmes kategorijām ir salīdzinoši neliels kaitējums cilvēka veselībai.

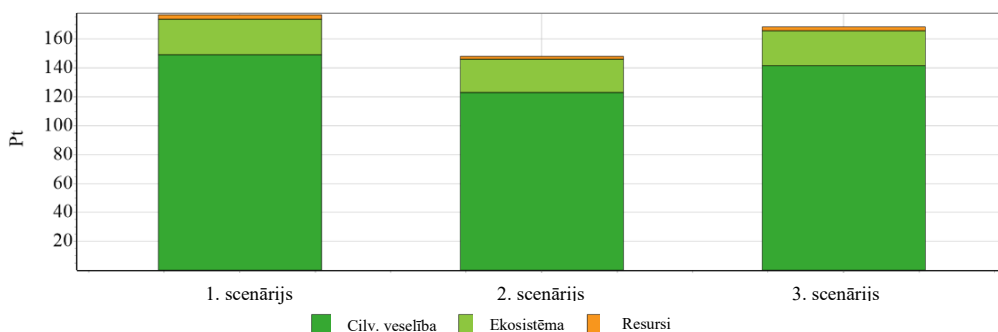


2.15. att. Cilvēka veselībai nodarītais kaitējums trīs scenārijos.

Kaitējumam ekosistēmām ir tāds pats sadalījums pa scenārijiem, kāds ir kaitējumam cilvēka veselībai. Vislielākais kaitējums konstatēts 1. scenārijā, vismazākais – 3. scenārijā. Visos scenārijos vislielāko ieguldījumu postījumos rada zemes izmantošanas indikators, kam seko globālā sasilšana, ozona veidošanās un sauszemes paskābināšanās. Resursu pieejamības izvērtējuma gadījumā vislielākais kaitējums vērojams 1. scenārijā, vismazākais – 2. scenārijā.

Visos analizētajos scenārijos fosilo resursu trūkums ir daudz būtiskāks resursu pieejamības kaitējuma cēlonis, salīdzinot ar derīgo izrakteņu ieguvi.

Salīdzinošās LCA galīgajos rezultātos viena punkta līmenī ir apkopoti bojājumu kategoriju rādītāji, tie redzami 2.16. attēlā ekopunktu vienībās. 1. scenārijs ir visietekmīgākais scenārijs visās bojājumu kategorijās. 2. scenārijā ir vismazākie bojājumi, 3. scenārijs ierindojas otrajā vietā. Vislielākā ietekme visos scenārijos radīta kategorijā “Cilvēka veselībai nodarītie bojājumi”, kam seko ekosistēmu kvalitāte, pēc tam – klimata pārmaiņas un resursi.

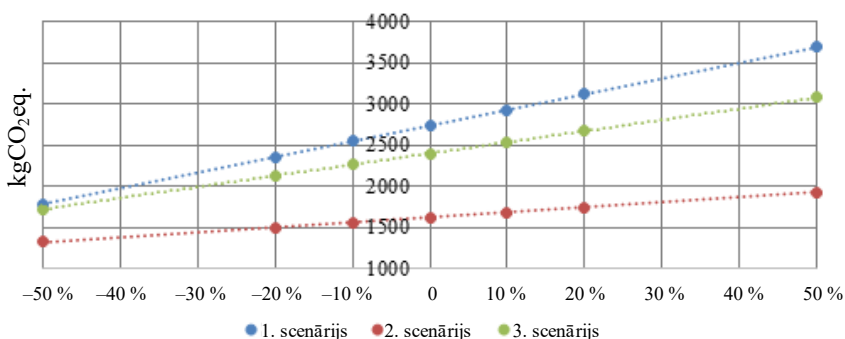


Metode: “ReCiPe2016 Endpoint (H) V1.08 / World (2010) H/H Sigle score”
 Salīdzinājums 1 p “1. scenārijs”, 1p “2. scenārijs”, 1p “3. scenārijs”;

2.16. att. Definēto scenāriju viena punkta rezultāti.

Jūtīguma analīze

Globālās sasilšanas potenciāla jutīguma analīze CO₂ ekv. kg redzama 2.17. attēlā. Visiem analizētajiem scenārijiem jutīguma tendence liecina, ka globālās sasilšanas potenciālā ietekme palielinās, pieaugot elektroenerģijas patēriņam. Visjutīgākais pret elektroenerģijas patēriņa izmaiņām ir 1. scenārijs, vismazāk jutīgs – 2. scenārijs. Uzskatot, ka 1. un 3. scenārijiem ir līdzīga ietekme uz elektroenerģijas patēriņa samazināšanos par 50 %, var secināt, ka 1. scenārija izmaiņas palielinās gandrīz divas reizes – no 1783 kg CO₂eq līdz 3685 kg CO₂eq, savukārt 3. scenārijā – tikai no 1722 kg CO₂eq līdz 3074 kg CO₂eq.



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

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

3. DISKUSIJA

Trešā nodaļa ir veltīta iegūto rezultātu apspriešanai un diskutēšanai. Iepriekšējās nodaļas kontekstā, kurā tika prezentēti pētījumu sistematizēti rezultāti, šīs nodaļas mērķis ir papildināt analīzi ar iegūto rezultātu interpretāciju un apkopot darbā paveikto.

3.1. Bibliogrāfiskā analīze

Atbilde uz *RQ1* “Kā Stirlinga dzinēju literatūra ir attīstījusies iepriekš un tagad” tika pētīta, 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 atjaunojamos 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 mūsdienu 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 pētniecības rakstu skaits, kas saistīti ar Stirlinga dzinējiem, kuru pamatā ir biomasas. Mājsaimniecību vai dzīvojamo māju līmenī arvien vairāk tiek pētītas 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 pētniecības aktivitāte šajos virzienos, jo īpaši ir nepieciešami padziļināti pētījumi par energoapgādes drošību un neatkarību.

3.2. 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; ar saules enerģiju darbināmu Stirlinga dzinēju. Mērķis bija noteikt vispiemērotāko energosistēmu mājsaimniecību elektroenerģijas ražošanai SE līdz 50 kW.

Literatūras apskatā apkopoti 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 svārstību izmaiņas un tā joprojām būtu vislabākā alternatīva, ja kritēriju svārstības nebūtu vienādi.

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.

3.3. 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.

Pētījumā iekļauti trīs galvenie alternatīvie scenāriji un bāzes scenārijs jeb atsauces scenārijs ieguvumu salīdzināšanai. Atkarībā no slodzes scenāriji ir iedalīti divos līmeņos. Izmantotas divas slodzes – bāzes un samazinātā. Visi scenāriji savstarpēji salīdzināti, izmantojot iepriekš noteiktus kritērijus. Visos alternatīvajos scenārijos 100 % pašpietiekamība tika sasniegta, izmantojot biomasas katlu un Stirlinga dzinēju kombinācijā ar saules enerģijas tehnoloģijām un siltumsūkni. Atkarībā no patērētāja patēriņa profila un tehnoloģiju raksturlielumiem ir tendence veidoties enerģijas pārpalikumam. Šo elektroenerģiju nevar izmantot uzreiz, taču to var nodot tīklā.

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 granulārs 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.

Pētījumā aplūkoti scenāriji arī salīdzināti, pamatojoties uz saražoto emisiju apjomu. Aprēķinātas gaisu piesārņojošo vielu CO, NO_x un PM, kā arī siltumnīcefekta gāzu CO₂

emisijas. BS scenārijā, 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, salīdzinot ar S1 scenāriju. Visos scenārijos enerģijas patēriņa samazināšana samazina arī radīto emisiju daudzumu.

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.

3.4. Eksperimentālā izpēte

1. eksperiments. Stirlinga dzinēja darbības izpēte

Pētījums parādīja, ka ir iespējams sasniegt lielāku elektrisko jaudu eksperimentālajai iekārtai. Ņemot vērā pētījuma eksperimentālajā daļā pierādīto, mērījumi 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. Pētījuma eksperimentālajā daļā veiktie novērojumi liecina, ka maksimālo dzinēja jaudu varētu palielināt, mainot arī katla kurtuves temperatūru, kā arī dzinēja dzesēšanas sistēmas iekļūdes/izplūdes temperatūru. Izmantojot augstākas siltumietilpības kurināmo, piemēram, ļoti sausu (mazāk nekā 10 % mitruma), apkures katla kurināmā temperatūra paaugstināsies.

2. eksperiments. Stirlinga dzinēja apvienošana ar saules paneli

Sistēma sastāv no ārējās sadegšanas *Microgen* Stirlinga dzinēja *mCHP* bloka un *PV* paneļiem. Tika veikta apgriezta interpolācija, lai iestāftu minimālo *PV* paneļu uzstādīto jaudu, lai sasniegtu ikgadējo *NET Zero* enerģijas bilanci.

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, un tā rezultātā ir nepieciešams 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. 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, taču precīzākiem rezultātiem nepieciešama papildu izpēte.

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

3.5. Aprites cikla analīze

Pārbaudot ietekmes kategoriju punktus, atklājās, ka 1. scenārijam ir vislielākie ietekmes uz vidi rādītāji lielākajā daļā ietekmes kategoriju, tam seko 3. scenārijs, savukārt 2. scenārijam ir vismazākā ietekme uz vidi. Jāatzīmē, ka lielākajai daļai ietekmes kategoriju ir konsekventi rādītāji visos scenārijos. Kategorijās, piemēram, saldūdens un jūras ekotoksicitāte, nekancerogēna toksicitāte un minerālresursu trūkums, uzrāda dažādus rezultātus parādot tikai sloģa pārvešanu 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 šis jautājums būtu nopietnāk jārisina vietējās politikas plānošanā. Ņemot vērā to, 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, 2. scenārijs – vismazāko. 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 krāsnīm, 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.

Jūtīguma analīzes rezultāti apstiprina modeļa derīgumu un iznākumu reprezentatīvo raksturu. Jūtīguma analīzē atklātie rezultāti sakrīt ar modeļa struktūrā iekļautajiem kritērijiem, stiprinot novērtējuma ticamību. Jūtīguma analīzē konstatēts, ka 1. scenārijs ir visjutīgākais pret elektroenerģijas patēriņa izmaiņām, tas ievērojami palielina ietekmi uz kopējo modeļa satabilitāti. 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 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 faktorus, kas 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 to drošības aspektiem ir jāpiešķir ļoti augsta prioritāte.
2. Apskatot energoapgādes drošību no tehnoloģiskā aspekta, promocijas darbā sākotnējā diskusija ir par centralizēto vai decentralizēto energoapgādes modeli, kas ir noturīgāks pret neparedzamām krīzes situācijām. Katram no modeļiem ir savas priekšrocības un trūkumi. Galvenie ieguvumi centralizētajam energoapgādes modelim ir energoefektivitāte un iespēja efektīvāk piesaistīt investīcijas modernizācijas procesam, iekārtu nomaiņai un tīklu izbūvei. Tieši siltuma apgādes tīklu izbūve nosaka to, vai modelis būs ekonomiski dzīvotspējīgs, un tas saistāms ar tehnoloģiskiem izaicinājumiem blīvi apdzīvotās vietās un nesamērīgi lielām izmaksām reti apdzīvotās vietās.

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

3. Hibrīdais energoapgādes modelis uzrāda augstāku noturību un piemērotību krīzes energoapgādes situācijās. Vairāku tehnoloģiju izmantošana vienlaikus 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 tās noteiktos apstākļos var darboties arī autonomi. Hibrīdā modeļa izveide prasa lielākas investīcijas sākotnējā posmā, taču ilgtermiņā ekonomiskie aspekti izlīdzinās, salīdzinot ar centralizēto energoapgādes modeli, kuram ekonomiskās investīcijas sākotnējā posmā ir mazākas, bet enerģijas izmaksas – lielākas, tās iepērkot no ārējiem piegādātājiem.
4. Izpētot vispiemērotākās tehnoloģijas autonoma energoapgādes modeļa izveidei, kā vispiemērotākā tika noteikta Stirlinga dzinēja un biomasas apkures katla izmantošana. Veicot bibliogrāfisko izpēti, tika secināts, ka pēdējā desmitgadē pieaug pētījumu skaits, kas saistīti ar Stirlinga dzinēja izmantošanu koģenerācijas sistēmu izveidē, biomasas izmantošanā un autonomo energoapgādes sistēmu izveidē. Veicot eksperimentus, tika izveidots empīriskais vienādojums, kas liecina par sakarībām starp saražoto siltuma un elektroenerģiju – pieaugot siltuma enerģijas ražošanai, pieaug arī elektroenerģijas ražošana. Savukārt Stirlinga dzinēja darbībai ir nepieciešams sasniegt ne mazāk kā 350 °C, kas norāda, ka apkures katlu nepieciešams darbināt nominālās jaudas režīmā, kad katla kurtuves darba temperatūra ap 700 °C. Temperatūras režīma ievērošana liecina par nepieciešamību izmantot siltuma akumulācijas sistēmu, kas nodrošina

siltuma enerģijas stabili 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 cieta daļiņu emisijām, kas rodas biomasas sadedzināšanas rezultātā, un tas liecina par nepieciešamību paaugstināt katla energoefektivitāti un aicina domāt par dūmgāzu attīrīšanu. Viens no risinājumiem varētu būt dūmgāzu mitrā attīrīšana jeb tā sauktā skruberu izmantošana.
6. Energoapgādes risinājumi prasa lielas investīcijas, tehnoloģiju nomaiņa – laiku. Atsevišķas iekārtas un slēgumi var būt projektējami individuāli, kas arī prasa laiku. Secināms, ka krīzes situācijām jāgatavojas laikus, investējot uzreiz, negaidot, kad krīze jau iestājusies, jo tad jau var būt par vēlu. Papildus jāņem vērā, ka apkures sistēmu apkures sezonas laikā atslēgt nav pieļaujams, tas prasa papildu plānošanas procesu un laiku pārbūves sagatavošanai. Investējot sākotnēji, būs vieglāk pārvarēt krīzes un mazināsies riski energoapgādes pārtraukumiem.



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 mikrokoģenerācijas 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.