



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Metano emisijų mažinimas Lietuvos energetikos sektoriuje: gamybos pramonės vaidmuo

Baigiamasis magistro projektas

Dovidas Rubežius

Projekto autorius

Doc. dr. Irina Kliopova

Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Metano emisijų mažinimas Lietuvos energetikos sektoriuje: gamybos pramonės vaidmuo

Baigiamasis magistro projektas
Darnus valdymas ir gamyba (6213EX001)

Dovidas Rubežius

Projekto autorius

Doc. dr. Irina Kliopava

Vadovė

dr. Edgaras Stunžėnas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Aplinkos inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Dovidas Rubežius

Metano emisijų mažinimas Lietuvos energetikos sektoriuje: gamybos pramonės vaidmuo

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Dovidas Rubežius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Aplinkos ir inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Projekto tema Metano emisijų mažinimas Lietuvos energetikos sektoriuje: gamybos pramonės vaidmuo

Reikalavimai ir sąlygos

Tyrimo metu turi būti parengta metodika metano (CH₄) emisijų vertinimui apdirbamosios pramonės įmonėse, nustatant tiesioginį ir netiesioginį (pvz., dėl kuro tiekimo nuostolių) poveikį klimato kaitai, remiantis tarptautiniais šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) apskaitos principais.

Metodikoje naudojami veiklos duomenys apie Lietuvos pramonę, turi būti pagrįsti oficialiais statistikos duomenimis.

Metodikoje taikomi CH₄ emisijų faktoriai turi būti pagrįsti informacija, pateikta Lietuvos Nacionalinėje ŠESD inventorizacijos ataskaitoje.

Parengta metodika turi būti apčiuota eksperimentui parinktame objekte – pramonės įmonėje.

CH₄ šaltinių – sukėliklių identifikavimui naudoti pagrindinius Švaresnės gamybos (ŠG) įdiegimo pramonės įmonėse metodikos principus (medžiagų ir energijos bei kuro ir energijos balanso kūrimas, esamos ir planuojamos situacijos lyginamoji analizė), reglamentuotus poveikio aplinkai vertinimo (PAV) metodus.

Darbe siūlomos inovacijos turi būti pagrįstos mokslinės ir praktinės literatūros analizės rezultatais.

Darbe turi būti atlikta siūlomų inovacijų (min. 3) įvykdomumo analizė (techninis, aplinkosauginis ir ekonominis vertimas), įvertintas aplinkosauginis veiksmingumas klimato kaitos srityje, išrinkti įmonei geriausiai prieinami gamybos būdai siekiant sumažinti arba eliminuoti CH₄ emisijas.

Vadovas / Vadovė

doc. dr. Irina Kliopova

2026-03-09

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

(data)

Rubežius Dovidas. Metano emisijų mažinimas Lietuvos energetikos sektoriuje: gamybos pramonės vaidmuo. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Irina Kliopova; Kauno technologijos universitetas, Aplinkos inžinerijos institutas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03) – pagrindinė, Gamybos inžinerija (E10), Verslas (L1), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: švaresnė gamyba, metanas, metano mažinimas, apdirbamoji pramonė

Kaunas, 2026. 64 p.

Santrauka

Metano (CH₄) emisijų mažinimas Europos Sąjungoje laikomas viena svarbiausių klimato kaitos valdymo krypčių. CH₄ yra antra pagal svarbą šiltnamio efektą sukianti duja (ŠESD) po anglies dioksido (CO₂), kurios visuotinio atšilimo potencialas yra apie 28 kartus didesnis nei CO₂. Remiantis Lietuvos nacionaline ŠESD apskaitos ataskaita, 2020 m. Lietuvoje susidarė 113,12 tūkst. tonų CH₄ emisijų. CH₄ emisijos 2020 m. Lietuvoje sudarė 16,2 % visų ŠESD emisijų. Energetikos sektorius yra pagrindinis ŠESD šaltinis Lietuvoje, šiame sektoriuje 2020 m. susidarė 15 904 tonos CH₄. Pagrindiniai CH₄ emisijų šaltiniai Lietuvos energetikos sektoriuje yra kuro deginimo įrenginiai visuose ekonomikos sektoriuose bei gamtinių dujų nuotėkiai perdavimo, saugojimo ir skirstymo tinkluose. Pagal pasaulinį susitarimą dėl metano emisijų, siekiama iki 2030 m. sumažinti pasaulinio metano išmetimą visuose sektoriuose bent 30 %, lyginant su 2020 m.

Baigiamajame magistro projekte yra kuriama CH₄ emisijų vertinimo ir mažinimo priemonių atrankos metodika apdirbamosios pramonės įmonėms ir pagal sukurtą metodiką vertinamos galimybės sumažinti CH₄ emisijas apdirbamojoje pramonėje. Eksperimentui pasirinkta surimi produktų gamybos įmonė UAB „Plungės kooperatinė prekyba“. Projekte taikyti moksliniai metodai: aplinkos apsaugos strateginių dokumentų, mokslinės literatūros ir statistinių duomenų analizė, IPCC 2006 metodika, švaresnės gamybos įdiegimo pramonės įmonėje metodika ir lyginamoji analizė.

Tyrimo metu nustatyti analizuojamo objekto pagrindiniai CH₄ emisijų sukėlikliai: degalų, kietojo biokuro ir gamtinių dujų deginimas ir netiesioginės CH₄ emisijos dėl gamtinių dujų nuotėkių skirstymo ir perdavimo tinkluose. 2020 m. objekte susidarė 10,051 t tiesioginių ir 10,296 t netiesioginių CH₄ emisijų. Darbe pasiūlytos trys inovacinės priemonės CH₄ emisijų mažinimui. Nustatyta, kad visų siūlomų priemonių įdiegimas leistų sumažinti šiluminės energijos gamybą 907 MWh per metus, biokuro suvartojimą 11 %, gamtinių dujų suvartojimą 39 %. Tiesiogines ir netiesiogines CH₄ emisijas sumažėtų 24,5 %.

Taip pat darbe pateiktos rekomendacijos Lietuvos apdirbamosios pramonės įmonėms dėl CH₄ emisijų prevencijos ir mažinimo, diegiant energijos vartojimo efektyvumo didinimo projektus, taikant švaresnės gamybos principus, procesų optimizavimo ir integravimo metodus bei mažinant priklausomybę nuo iškastinio kuro.

Rubežius Dovidas. Reducing Methane Emissions in the Lithuanian Energy Sector: the Role of the Manufacturing Industry. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Irina Kliopova; Institute of Environmental Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03) – main study field, Production and Manufacturing Engineering (E10), Business (L01), Engineering Sciences.

Keywords: cleaner production, methane, methane reduction, manufacturing industry.

Kaunas, 2026. Number of pages 64.

Summary

Reducing methane (CH₄) emissions in the European Union is considered one of the most important priorities in climate change management. CH₄ is the second most significant greenhouse gas (GHG) after carbon dioxide (CO₂), with a global warming potential approximately 28 times greater than that of CO₂. According to Lithuania's national GHG inventory report, 113,120 metric tons of CH₄ emissions were generated in Lithuania in 2020. CH₄ emissions accounted for 16.2% of total GHG emissions in Lithuania in 2020. The energy sector is the main source of GHG emissions in Lithuania; in 2020, this sector generated 15,904 tons of CH₄. The main sources of CH₄ emissions in Lithuania's energy sector are fuel combustion facilities across all economic sectors and natural gas leaks in transmission, storage, and distribution networks. Under the global agreement on methane emissions, the goal is to reduce global methane emissions across all sectors by at least 30% by 2030, compared to 2020 levels.

The final master's thesis project develops a methodology for assessing CH₄ emissions and selecting mitigation measures for manufacturing companies and evaluates the potential for reducing CH₄ emissions in the manufacturing sector using this methodology. The surimi product manufacturing company UAB "Plungės kooperatinė prekyba" was selected for the experiment. Scientific methods applied in the project: analysis of environmental protection strategic documents, scientific literature, and statistical data; the IPCC 2006 methodology; the methodology for implementing cleaner production in industrial enterprises; and comparative analysis.

The study identified the main sources of CH₄ emissions at the facility under analysis: the combustion of fuel, solid biofuel, and natural gas, as well as indirect CH₄ emissions resulting from natural gas leaks in distribution and transmission networks. In 2020, the facility generated 10,051 t of direct and 10,296 t of indirect CH₄ emissions. The study proposes three innovative measures to reduce CH₄ emissions. It was determined that the implementation of all proposed measures would reduce thermal energy production by 907 MWh per year, biofuel consumption by 11%, and natural gas consumption by 39%. Direct and indirect CH₄ emissions would decrease by 24.5%.

The study also provides recommendations for Lithuanian manufacturing companies on the prevention and reduction of CH₄ emissions by implementing energy efficiency improvement projects, applying cleaner production principles, process optimization and integration methods, and reducing dependence on fossil fuels.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Metano emisijų vaidmuo klimato kaitoje ir mažinimo galimybės pramonėje	13
1.1. Pagrindiniai ŠESD ir CH ₄ mažinimo tikslai Europos Sąjungoje ir Lietuvoje.....	14
1.2. Metano emisijos Lietuvoje ir jos šaltiniai energetikos sektoriuje	16
1.3. Energetinių išteklių ir CH ₄ mažinimo galimybės pramonėje	20
1.3.1. Skaitmeninių technologijų taikymas šilumos energijos gamybos procesų optimizavimui ...	22
1.3.2. Atliekamos šilumos panaudojimo galimybės pramonėje	22
2. Metano emisijų šaltinių identifikavimo ir mažinimo galimybių Lietuvoje pramonėje vertinimo metodika: tyrimo etapai ir siūlymai apdirbamajai pramonei	25
2.1. Metano išmetimų įvertinimas pramonės įmonėse	26
2.2. Atliekant tyrimą naudojamos papildomos formulės:	31
3. Metano emisijų mažinimo galimybių vertinimas eksperimentui parinktoje pramonės įmonėje.....	34
3.1. UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ esamos veiklos aplinkos apsaugos įvertinimas: metano emisijų sukėlėkliai, jų poveikis klimato kaitai, metano emisijų mažinimo galimybės	34
3.2. Dūmų kondensacinio ekonomizerio įdiegimo PKP katilinėje įvykdomumo analizė	43
3.3. Šiluminės energijos regeneravimo iš nuotekų įvykdomumo įvertinimas.....	47
3.4. Skaitmeninio dvynio įdiegimo katilinių valdymui įvykdomumo įvertinimas.....	50
3.5. Aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas įdiegus inovacijas	54
4. CH₄ mažinimo rekomendacijos Lietuvos pramonės įmonėms	57
Išvados	59
Literatūros sąrašas	61

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Energijos vartojimo efektyvumo didinimas ES	15
1.2 lentelė. Metano emisijų pokytis Lietuvoje 1990–2023 metais pagal ŠESD susidarymo sektorius [15]	16
1.3 lentelė. Metano emisijos išsiskyrimo šaltiniai ir tendencijos Lietuvos energetikos sektoriuje 1990–2023 metais.....	18
1.4 lentelė. Stacionarių KDI, energetikos sektoriuje veiklos duomenys – CH ₄ sukėlkliai, 1990, 2020, 2022 ir 2023 m. [16].....	19
1.5 lentelė. Taršos prevencijos metodų taikymas energijos vartojimo efektyvumo didinimo projektuose	21
2.1 lentelė. Tyrimo etapai, naudojami moksliniai metodai ir tikėtini rezultatai.....	25
2.2 lentelė. Lietuvoje deginamo kuro žemutinės kuro žemutinės šilumingumo vertės ir CH ₄ emisijų faktoriai 2020 metais [15].....	28
2.3 lentelė. MCF numatytosios vertės [40]	29
2.4 lentelė. Lietuvoje plačiausiai deginimo kuro žemutinės šilumingumo vertės ir CO ₂ nei N ₂ O emisijų faktoriai.....	33
3.1 lentelė. UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ garo katilų pagrindiniai parametrai	34
3.2 lentelė. UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ stacionari šaldymo įranga.....	35
3.3 lentelė. PKP veiklos pagrindiniai aplinkos apsaugos indikatoriai, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms	40
3.4 lentelė. PKP katilinės pagrindiniai aplinkos apsaugos indikatoriai.....	41
3.5 lentelė. Kondensacinio dūmų ekonomizaizerio įdiegimo aplinkosauginis ir ekonominis vertinimas	44
3.6 lentelė. Dujinės katilinės, po gamtinių dujų sąnaudų sumažėjimo, aplinkosauginis ir ekonominis vertinimas	46
3.7 lentelė. Kondensacinio dūmų ekonomizaizerio inovacijos numatomos investicijos	47
3.8 lentelė. Piranha T15 nuotekų šilumos siurblio techniniai parametrai	47
3.9 lentelė. Nuotekų šilumos siurblio aplinkosauginio ir ekonominio vertinimo rezultatai	49
3.10 lentelė. Nuotekų šilumos siurblio numatomos investicijos	50
3.11 lentelė. Skaitmeninio dvynio biokuro katilinėje įdiegimo aplinkosauginio vertinimo rezultatas	53
3.12 lentelė. Skaitmeninio dvynio biokuro katilinėje įdiegimo aplinkosauginis vertinimas	53
3.13 lentelė. Skaitmeninio dvynio įdiegimo numatomos investicijos.....	54
3.14 lentelė. PKP pagrindiniai medžiagų ir energijos srutai po inovacijų įdiegimo	54
3.15 lentelė. PKP aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas gamybos lygmenyje, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms, po inovacijų įdiegimo.....	55

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Vidutinė pasaulinė metinė oro temperatūra 1900–2025 metais [3].....	13
1.2 pav. Metano emisijų pokytis ir pagrindiniai emisijų sukėlėjai Lietuvoje 1990–2023 metais [15]	17
1.3 pav. Atliekamos šilumos potencialas	23
1.4 pav. Šilumos siurblio schema atliekamos šilumos panaudojimui [39].....	24
2.1 pav. Metano emisijų vertinimo ir mažinimo priemonių atrankos metodinė schema.....	27
3.1 pav Medžiagų ir energijos srautų diagrama.....	36
3.2 pav. PKP be katilinės veiklos pagrindiniai medžiagų ir energijos srautai, vnt./m.	37
3.3 pav. PKP katilinės veiklos pagrindiniai medžiagų ir energijos srautai, vnt./m.	38
3.4 pav. Piranha T15 principinė schema.....	48

Santrumpų sąrašas

AAI – aplinkos apsaugos indikatorius;
AAIs – santykinis aplinkos apsaugos indikatorius;
AAV – aplinkosauginis veiksmingumas;
AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;
AT – atsipirkimo trukmė;
CH₄ – metanas;
CO – anglies monoksidas;
CO₂ – anglies dvideginis arba anglies dioksidas;
CO_{2e} – anglies dioksido ekvivalentas;
COP – veiksmingumo koeficientas (Angl. – Coefficient of Performance);
DI – dirbtinis intelektas;
DKE – dūmų kondensacinis ekonomizaizeris;
DLK – didžiausia leistina koncentracija;
GWE – visuotinio šiltėjimo potencialas (Angl. – Global Warming Potential);
KD – kietosios dalelės;
KDI – kurą deginantis įrenginys;
LR – Lietuvos Respublika;
n. k. – naudingumo koeficientas;
N₂O – diazoto oksidas arba diazoto monoksidas;
NO_x – azoto oksidai;
PKP – UAB „Plungės kooperatinė prekyba“;
RV – ribinė vertė;
SO₂ – sieros dioksidas;
ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;
ŠG – švaresnė gamyba;
t. š. – oro taršos šaltinis;
TIPK – taršos integruota prevencija ir kontrolė;
UAB – Uždaroji akcinė bendrovė.
ŽNŽNKM – Žemės naudojimo, žemės naudojimo keitimo ir miškininkystės sektorius (Angl. – *LULUCF*).

Įvadas

Metano (CH₄) emisijų mažinimas Europos Sąjungoje laikomas viena svarbiausių klimato kaitos valdymo krypčių, glaudžiai susijusių su bendrais šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) mažinimo įsipareigojimais bei siekiu iki 2050 m. pereiti prie klimato neutralios ekonomikos. CH₄ yra antra pagal svarbą ŠESD emisija po anglies dioksido (CO₂), kurios visuotinio atšilimo potencialas yra apie 28 kartus didesnis nei CO₂.

Remiantis Lietuvos nacionaline ŠESD apskaitos ataskaita [15], 2020 m. Lietuvoje susidarė 113,12 tūkst. tonų CH₄ emisijų arba 16,2 % visų ŠESD emisijų. Lietuvos energetikos sektorius, yra pagrindinis ŠESD šaltinis Lietuvoje, bet didžiąją dalį visų ŠESD jame sudaro CO₂. Šiame sektoriuje 2020 m. susidarė 15 904 tonos CH₄ [15]. Pagal ŠESD apskaitą pagrindiniai CH₄ emisijų šaltiniai Lietuvos energetikos sektoriuje yra visų Lietuvos ekonomikos sektorių kuro deginimo įrenginiai ir gamtinių dujų nuotėkiai perdavimo, saugojimo ir skirstymo tinkluose [15, 40]. Didžiausias emisijų mažinimo potencialas slypi technologinių procesų energinio efektyvumo didinime.

Maisto pramonė yra viena reikšmingiausių energijos vartotojų pasaulyje ir daro didelę įtaką ŠESD emisijoms. Maisto gamybos, perdirbimo, transportavimo ir vartojimo sistemos sukuria apie 25 % visų pasaulinių ŠESD emisijų ir sunaudoja apie 30 % pasaulinės energijos, o maisto pramonės gamybiniai procesai sudaro apie 28 % visos maisto tiekimo grandinės energijos suvartojimo. Didžiausia šio poveikio dalis susijusi su intensyviu energijos vartojimu technologiniuose procesuose, šaldymo sistemose, transporte, šilumos gamybą kurą deginančiuose įrenginiuose [1].

Baigiamajame magistro darbe pagrindinis dėmesys skiriamas CH₄ emisijų mažinimo galimybėms Lietuvos energetikos sektoriuje apdirbamosios pramonės srityje, vertinant technologinius ir organizacinius sprendimus, galinčius mažinti pirminės ir galutinės energijos vartojimą bei ŠESD emisijas. Darbe analizuojami šilumos gamybos ir energijos naudojimo procesai surimio produktų gamybos įmonėje, remiantis Švaresnės gamybos bei energinio efektyvumo principais. Didelis dėmesys skiriamas atliekamos šilumos panaudojimo, skaitmeninių technologijų taikymo bei procesų optimizavimo priemonių vertinimui, siekiant sumažinti deginamo kuro sąnaudas ir su energijos gamyba bei gamtinių dujų tiekimu susijusias CH₄ emisijas. Taip pat vertinamos technologinių inovacijų ir atsinaujinančių energijos išteklių integravimo galimybės, prisidedančios prie klimato kaitos švelninimo tikslų įgyvendinimo.

Tyrimo objektas – pramonės įmonių, priskiriamų prie energetikos sektoriaus, energijos vartojimo ir gamybos procesai bei jų įtaka CH₄ ir kitų ŠESD emisijoms.

Tyrimo tikslas – sukurti metodiką, kuri padėtų nustatyti CH₄ emisijų šaltinius ir mažinimo galimybes Lietuvos pramonės įmonėse, taikant tvarios pramonės plėtros priemones.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti aplinkosauginių strateginių dokumentų ir mokslinės bei praktinės literatūros analizę ŠESD mažinimo srityje, ypatingą dėmesį skiriant CH₄ emisijoms ir jų susidarymo šaltiniams apdirbamosios pramonės įmonėse.
2. Parengti metodiką CH₄ emisijų vertinimui (1 ir 2 lygiu) ir poveikio klimato kaitai mažinimui apdirbamosios pramonės įmonėse.

3. Eksperimentui pasirinktame objekte – pramonės įmonėje identifikuoti CH₄ susidarymo šaltinius, įvertinti jų tiesioginį ir netiesioginį poveikį klimato kaitai ir pasiūlyti alternatyvas šiam poveikiui mažinti, taikant tvarios pramonės plėtros priemones.
4. Pateikti rekomendacijas Lietuvos pramonės įmonėms dėl CH₄ emisijų prevencijos ir mažinimo.

Ginamieji teiginiai

1. Lietuvos pramonės įmonėse, kurios pagal ŠESD apskaitą priskiriamos prie energetikos sektoriaus, taikant energinio efektyvumo didinimo priemones, galima sumažinti su energijos vartojimu susijusias CH₄ emisijas ne mažiau kaip 30 % lyginant su 2020 metų lygiu.
2. Sukurtas vertinimo modelis leidžia nustatyti pagrindinius CH₄ emisijų susidarymo šaltinius bei pagrįsti tvarios pramonės plėtros projektų taikymą, suderinant aplinkosauginę naudą ir ekonominį efektyvumą.

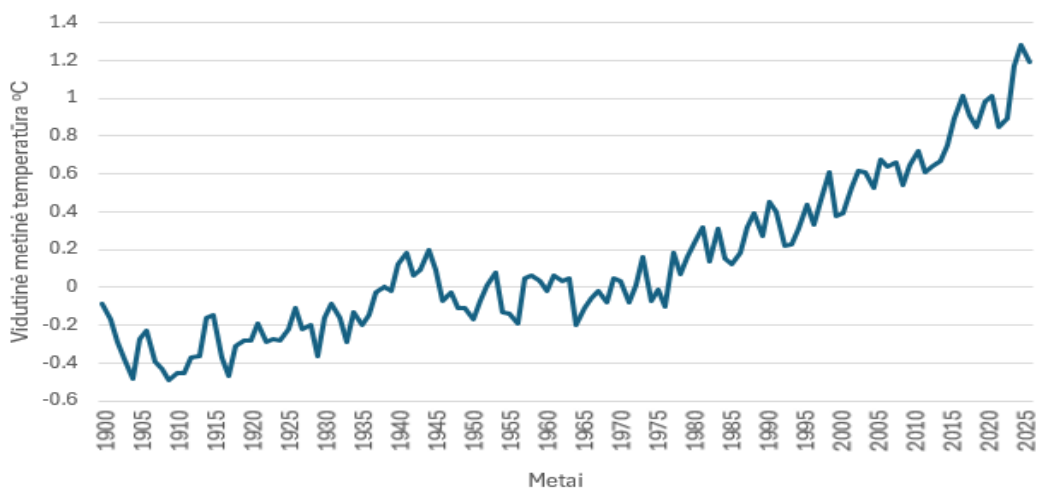
Tyrimo rezultatų publikavimas. Dalis darbo rezultatų pristatyta Latvijos gyvybės mokslų universitete 15-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje, skirtoje įmonių ir institucijų bendradarbiavimo kūrimui Baltijos jūros regione ir pasaulyje EcoTech 2025 (Angl. – 15th Annual International Scientific Conference on Establishment of Cooperation Between Companies and Institutions in the Baltic Sea region and the World) 2025 m. lapkričio 20 d.

Atlikto tyrimo praktinė nauda. Baigiamajame magistro projekte pateiktų pasiūlymų įdiegimas maisto produktų iš surimio gamybos įmonėje UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ leistų sumažinti šiluminės energijos suvartojimą 907 MWh/m. Dūmų kondensacinio ekonomizaizerio (DKE) įdiegimas kietojo biokuro katilinėje leistu sutaupyti 2126 tonas biokuro per metus (10,1 %). Nuotekų šilumos regeneravimo sistemos įdiegimas ir skaitmeninio dvynio naudojimas dujinėje katilinėje gamtinių dujų suvartojimą sumažintų virš 272 tūkst. m³/m. (38,76 %). Įdiegus visas darbe siūlomus energijos efektyvumą didinančius projektus, tiesioginės CH₄ emisijos sumažėtų 0,999 tonų per metus, netiesioginės CH₄ emisijos sumažėtų 3,986 tonų per metus. Bendras poveikis klimato kaitai dėl CH₄ emisijų sumažėja 159,65 t CO₂e per metus arba 24,5 % nuo 2020m. lygio.

Atlikto tyrimo naujumas. CH₄ emisijų mažinimas Lietuvos pramonės sektoriuje vertinamas kompleksiskai, analizuojant ne tik tiesiogines emisijas dėl kuro deginimo, bet ir netiesiogines emisijas, susidarančias gamtinių dujų perdavimo ir skirstymo tinkluose. Darbe pirmą kartą Lietuvos pramonės kontekste pasiūlyta CH₄ emisijų vertinimo ir mažinimo priemonių atrankos metodika, apimanti pagrindinių emisijų šaltinių – CH₄ sukėliklių identifikavimą, kiekybinį vertinimą ir siūlomų priemonių įvykdomumo analizę. Tyrimo metu nustatyta, kad gamtinių dujų deginimas pramonės įmonių katilinėse sukelia santykinai mažesnes tiesiogines CH₄ emisijas, palyginti su biokuro deginimu, tačiau netiesioginis poveikis dėl gamtinių dujų nuotėkių perdavimo ir skirstymo tinkluose gali sudaryti daugiau kaip 51 % visų su įmonės veikla susijusių CH₄ emisijų. Nustatyta, kad papildomas netiesioginių emisijų vertinimas ir jų mažinimo priemonių planavimas sudaro prielaidas efektyviau mažinti poveikį klimato kaitai bei skatina pereiti prie atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) naudojimo.

1. Metano emisijų vaidmuo klimato kaitoje ir mažinimo galimybės pramonėje

Klimato kaita yra sudėtingas procesas, apimantis atmosferos, hidrosferos, biosferos ir kriosferos tarpusavio sąveikas, kurios lemia ilgalaikius pokyčius Žemės klimato sistemoje. Šie pokyčiai yra susiję su globaliniu atšilimu, kuris jau daro poveikį įvairiems sektoriams ir ekosistemoms, įskaitant žemės ūkį, miškus, vandenynus, jūrų ekosistemas, pakrančių infrastruktūrą, energijos tiekimą ir paklausą, taip pat žmonių sveikatą ir biologinę įvairovę [2]. 1.1 paveiksle pateikiamas vidutinės oro temperatūros pokytis nuo 1900 metų iki 2025 metų, pagal NASA GISS/GISSTEMP duomenis matomas apie 1,8 °C vidutinės pasaulinės temperatūros padidėjimas lyginant su 20 amžiaus pradžia.



1.1 pav. Vidutinė pasaulinė metinė oro temperatūra 1900–2025 metais [3]

Pagrindinės šiltnamio efektą sukeliančios dujos (ŠESD) apima anglies dioksidą (CO_2), metaną (CH_4) ir azoto oksidą (N_2O). Šios dujos yra svarbios klimato kaitos atžvilgiu, nes jos sulaiko saulės šilumą ir prisideda prie Žemės temperatūros kilimo [4]. CH_4 laikomas antra pagal reikšmę šiltnamio efektą sukeliančia duja po anglies dioksido (CO_2). Nors jo koncentracija atmosferoje yra mažesnė, jo poveikis klimato šiltėjimui yra gerokai stipresnis – vertinant 100 metų laikotarpį, CH_4 visuotinio atšilimo potencialas yra apie 28 kartus didesnis nei CO_2 [5]. Tačiau moksliniai ir politiniai vertinimai rodo, kad vien anglies dioksido emisijų mažinimas nėra pakankamas siekiant pasiekti Europos Sąjungos klimato tikslus. Nors CO_2 sudaro didžiausią ŠESD dalį, kitos dujos, ypač CH_4 , išlieka reikšmingu klimato kaitos veiksniumi. Europos Komisija pažymi, kad, siekiant iki 2030 m. sumažinti bendrą ŠESD emisijų kiekį bent 55 %, būtina didinti pastangas mažinant CH_4 emisijas, kadangi CH_4 sudaro didžiausią dalį kitų nei CO_2 šiltnamio efektą sukeliančių dujų [6]. Be to, CH_4 emisijų mažinimas gali turėti greitesnį poveikį klimato kaitos švelninimui dėl trumpesnio jo gyvavimo atmosferoje laikotarpio.

Atsižvelgiant į tai, CH_4 emisijų mažinimas tampa svarbia klimato politikos kryptimi tiek Europos Sąjungos, tiek nacionaliniu lygmeniu. Šiame skyriuje bus analizuojami pagrindiniai Europos Sąjungos ir Lietuvos strateginiai dokumentai, kuriuose numatyti įsipareigojimai CH_4 emisijų mažinimo srityje, ypatingą dėmesį skiriant energetikos sektoriui, kuriam taip pat priskiriamos apdirbamosios pramonės įmonės.

1.1. Pagrindiniai ŠESD ir CH₄ mažinimo tikslai Europos Sąjungoje ir Lietuvoje

Europos Sąjungoje CH₄ emisijų mažinimas yra svarbi klimato politikos dalis, siejama su bendrais ŠESD mažinimo tikslais ir perėjimu prie klimatui neutralios ekonomikos iki 2050 metų. Energetikos sąjungos ir klimato politikos veikslių valdymo reglamente Europos Komisija yra įpareigota rengti strateginius CH₄ mažinimo planus, o Europos žaliojo kurso komunikate pabrėžiama būtinybė spręsti CH₄ emisijų klausimą, ypač energetikos sektoriuje [7, 8]. Prognozuojama, kad taikant esamas politikos priemones iki 2030 m. CH₄ emisijos galėtų sumažėti apie 29 %, tačiau siekiant bendro 55 % ŠESD mažinimo tikslo, būtina pasiekti didesnę apie 35–37 % CH₄ emisijų sumažėjimą, palyginti su 2005 m. lygiu [6, 9]. Pagal pasaulinį susitarimą dėl pasaulinių metano emisijų (angl. Global Methane Pledge), kurį Lietuva planuoja pasirašyti, siekiama iki 2030 m. sumažinti pasaulinio metano išmetimą visuose sektoriuose bent 30 %, lyginant su 2020 m.

CH₄ išlieka svarbiausia iš kitų nei CO₂ šiltnamio efektą sukeliančių dujų, sudarydamas apie 60 % jų emisijų, todėl jo mažinimas yra esminė klimato politikos dalis. Nors Europos Sąjungoje nėra atskiros, tik metanui skirtos politikos, jo emisijų mažinimas įgyvendinamas per bendrus teisės aktus, tokius kaip Pastangų pasidalijimo reglamentas, kuris nustato privalomus ŠESD mažinimo tikslus nacionaliniu lygiu [6]. Tai rodo, kad CH₄ mažinimas yra integruotas į platesnę klimato politikos sistemą, o ne vystomas kaip savarankiška kryptis.

Analizuojant emisijų struktūrą Europos Sąjungos mastu, didžiausią antropogeninės kilmės CH₄ dalį sudaro maždaug 53 % emisijų iš žemės ūkio, 26 % iš atliekų ir 19 % iš energetikos sektoriaus [6]. Šis pasiskirstymas rodo, kad nors energetikos sektorius nėra didžiausias emisijų šaltinis, jis išlieka strategiškai svarbus dėl didelio techninio mažinimo potencialo ir galimybės greitai įgyvendinti emisijų mažinimo priemones.

Svarbus vaidmuo Europos žaliojo kurso kontekste tenka energijos vartojimo efektyvumui, kuris įvardijamas kaip vienas iš pagrindinių principų pereinant prie klimatui neutralios ekonomikos. Europos Komisija pabrėžia, kad pirmenybė turi būti teikiama – energijos vartojimo efektyvumo didinimui, siekiant mažinti bendrą energijos paklausą ir optimizuoti energijos vartojimą visuose sektoriuose. Taip pat akcentuojama būtinybė modernizuoti energetikos infrastruktūrą, plėtoti atsinaujinančius energijos išteklius bei skatinti inovatyvių technologijų diegimą, ypač pramonės sektoriuje [8].

Efektyvesnis energijos naudojimas ir energetikos sistemos dekarbonizacija leidžia ne tik mažinti anglies dioksido emisijas, bet ir netiesiogiai prisideda prie CH₄ emisijų mažinimo, kadangi sumažėja iškastinio kuro poreikis ir su jo tiekimo grandine susiję nuotėkiai. Ši sąsaja ypač svarbi energetikos ir apdirbamosios pramonės kontekste, kur energijos vartojimo optimizavimas gali turėti reikšmingą poveikį bendram šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekiui.

Klimato kaitos tikslai vietiniu lygiu nustatomi Lietuvos nacionalinėje klimato kaitos valdymo darbotvarkėje. Darbotvarkėje numatoma, kad šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimas turi būti įgyvendinamas kompleksiskai, apimant visus pagrindinius ekonomikos sektorius ir užtikrinant perėjimą prie klimatui neutralios ekonomikos iki 2050 metų. Dokumente pabrėžiama, kad emisijų mažinimas turi būti derinamas su energijos vartojimo efektyvumo didinimu, atsinaujinančių energijos išteklių plėtra bei tvaresniu išteklių naudojimu [10]. Nors CH₄ nėra išskiriamas kaip atskira prioritetinga kryptis, jo mažinimas integruojamas per sektorių politiką, ypač žemės ūkio, atliekų

tvarkymo ir energetikos srityse, kuriose numatytos priemonės siekiant mažinti biologinės kilmės emisijas, gerinti atliekų tvarkymo sistemas ir optimizuoti energijos gamybos bei vartojimo procesus.

Svarbus vaidmuo tenka ir pramonės sektoriui, kuriame akcentuojamas efektyvesnis energijos vartojimas, technologinių procesų modernizavimas bei perėjimas prie mažesnio emisijų intensyvumo energijos šaltinių [10]. Didinant energijos vartojimo efektyvumą pramonėje mažinamas ne tik bendras energijos poreikis, bet ir su energijos gamyba susijusios netiesioginės šiltnamio efektą sukeliančių dujų, įskaitant metaną, emisijos. Tokiu būdu CH₄ emisijų mažinimas Lietuvoje yra suvokiamas kaip platesnės klimato kaitos valdymo politikos dalis, orientuota į sisteminius pokyčius, energetinį efektyvumą ir ilgalaikį poveikį visai ekonomikai.

Energijos vartojimo efektyvumo didinimas Europos Sąjungoje yra numatytas Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje (ES) 2023/1791 Dėl energijos vartojimo efektyvumo, kuria iš dalies keičiamas Reglamentas (ES) 2023/955. 1.1 lentelėje pateikti Europos Sąjungos nustatyti galutinės energijos suvartojimo mažinimo tikslai iki 2031 metų, kurie lyginami su 2016–2018 m. vidutiniu energijos suvartojimo lygiu [11].

1.1 lentelė. Energijos vartojimo efektyvumo didinimas ES

Laikotarpis	Sutaupymo procentas lyginant su 2016–2018 metų vidurkiu
2021–2023 m.	≥0,8 %
2024–2025 m.	≥1,3 %
2026–2027 m.	≥1,5 %
2028–2029 m.	≥1,9 %

Labai panašūs galutinio suvartojimo sutaupymo procentai kiekvienais metais numatyti ir Lietuvos Respublikos energijos vartojimo efektyvumo didinimo įstatyme, kuriame papildomai nurodoma, kad 2030 metais metinis Lietuvos pirminės energijos suvartojimas būtų ne didesnis kaip 63,3 TWh, metinis galutinės energijos suvartojimas ne didesnis kaip 51,0 TWh ir suminis energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių sutaupyta galutinės energijos kiekis – ne mažesnis kaip 39,3 TWh [12].

Energijos vartojimo efektyvumas pramonėje yra svarbus konkurencingumo veiksnys, ypač gamybos sektoriuje, kuris suvartoja didelę dalį pasaulinės energijos ir sukelia reikšmingas šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Tyrimai rodo, kad organizaciniai ir ekonominiai veiksniai yra pagrindiniai skatinamieji, energijos efektyvumo didinimo, veiksniai įmonių lygmeniu, o politikos priemonės ir rinkos veiksniai vertinami mažiau svarbiais iš įmonių perspektyvos [13]. Energijos vartojimo efektyvumo didinimas pramonės įmonėse dažnai siejamas su švaresnės gamybos koncepcijos taikymu, kuri apima technologinių sprendimų diegimą ir valdymo strategijų tobulinimą. Tyrimai rodo, kad ekonominis efektyvumas ir energijos vartojimo intensyvumas yra glaudžiai susiję su investicijomis į mokslinius tyrimus ir plėtrą. Tokios investicijos skatina pramonės restruktūrizavimą, kurio metu energijos intensyvios pramonės šakos keičiasi į pažangesnes, mažesnes energijos sąnaudų turinčias, tačiau didesnę pridėtinę vertę kuriančias gamybos sritis, taip prisidedant prie energijos taupymo ir tvarios plėtros [14]. Energijos efektyvumo galimybės pramonėje bus apžvelgiamos 1.3 poskyryje.

1.2. Metano emisijos Lietuvoje ir jos šaltiniai energetikos sektoriuje

Šiame poskyryje CH₄ emisijų susidarymo analizė Lietuvoje grindžiama nacionalinės ŠESD inventorizacijos duomenimis, pateiktais Lietuvos 2025 metų nacionalinėje ŠESD inventorizacijos ataskaitoje, apimančiais 1990–2023 m. laikotarpį. Susisteminta informacija pateikta 1.2 lentelėje ir 1.2 paveiksle. Šie duomenys leidžia įvertinti ilgalaikes emisijų kitimo tendencijas bei nustatyti pagrindinius sektorius, darančius įtaką CH₄ susidarymui šalyje [15].

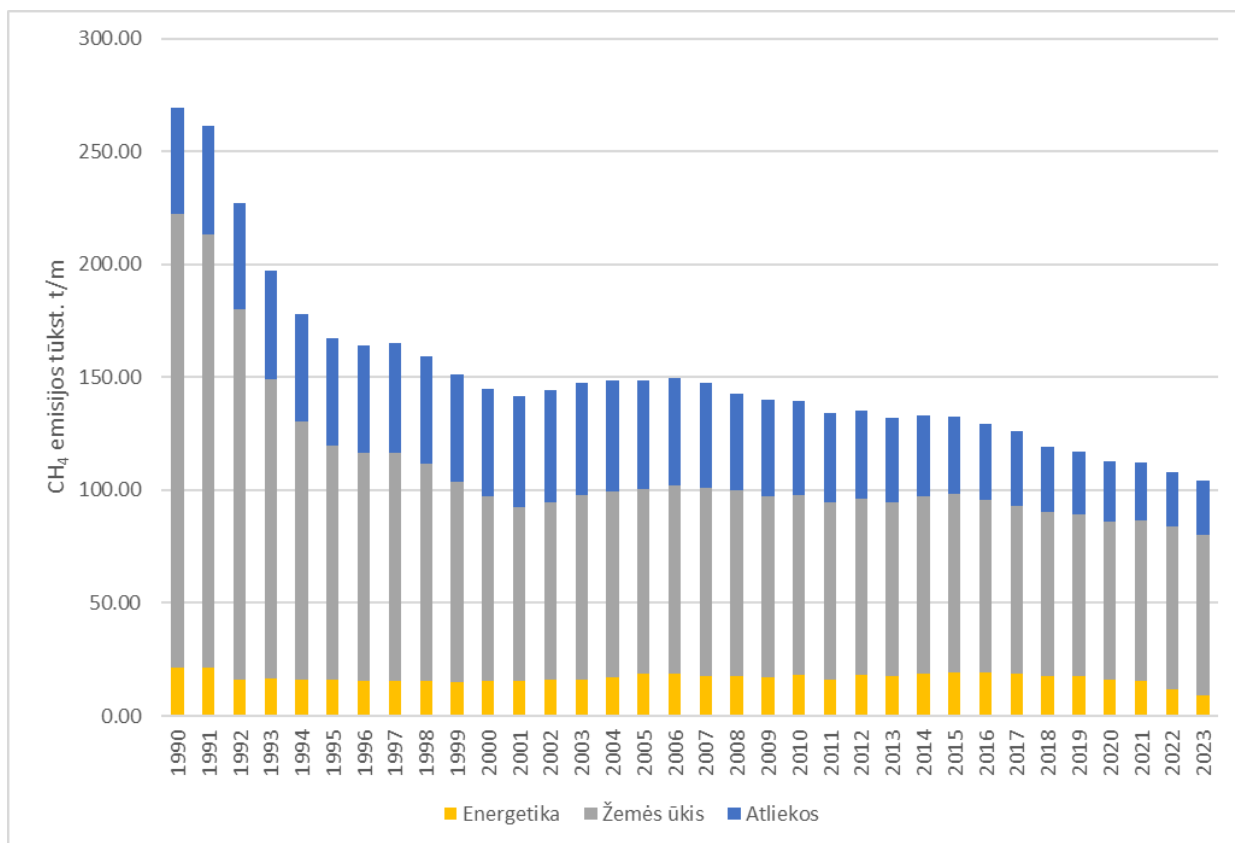
1.2 lentelė. Metano emisijų pokytis Lietuvoje 1990–2023 metais pagal ŠESD susidarymo sektorius [15]

Metai	Energetika	Pramonės procesai ir produktų naudojimas	Žemės ūkis	*ŽNŽNKM	Atliekos	Iš viso neįskaitant *ŽNŽNKM	Iš viso įskaitant *ŽNŽNKM
	tūkst. tonų CH ₄						
1990	21,26	0,21	201,07	0,21	46,95	269,48	269,69
1993	16,35	0,01	132,68	0,24	48,09	197,13	197,38
1996	15,67	0,04	100,69	0,24	47,72	164,12	164,37
1999	15,05	0,00	88,38	0,24	47,73	151,16	151,40
2002	15,92	0,07	78,86	0,30	49,76	144,61	144,91
2005	18,66	0,09	82,02	0,13	48,12	148,89	149,02
2008	17,69	0,13	82,13	0,15	42,93	142,87	143,02
2011	15,95	0,00	78,66	0,19	39,49	134,10	134,28
2012	18,27	0,00	77,94	0,13	38,85	135,05	135,18
2013	17,81	0,00	76,59	0,12	37,82	132,22	132,35
2014	18,83	0,00	78,18	0,20	36,03	133,03	133,24
2015	19,38	0,00	78,87	0,14	34,29	132,54	132,68
2016	19,13	0,00	76,34	0,12	33,66	129,13	129,25
2017	18,82	0,00	74,17	0,10	33,36	126,36	126,46
2018	17,38	0,00	72,76	0,11	29,15	119,29	119,40
2019	17,83	0,00	71,29	0,13	27,81	116,93	117,07
2020	15,90	0,00	70,08	0,10	27,03	113,02	113,12
2021	15,68	0,00	70,72	0,09	25,73	112,14	112,23
2022	11,90	0,00	72,02	0,10	24,18	108,10	108,20
2023	8,89	0,00	71,17	0,10	24,15	104,21	104,31
2023/1990, %	-58,16	-	-64,60	-54,23	-48,56	-61,33	-61,32

*ŽNŽNKM – Žemės naudojimo, žemės naudojimo keitimo ir miškininkystės sektorius.

Vertinant visą nagrinėjamą laikotarpį, matyti, kad CH₄ emisijos Lietuvoje reikšmingai sumažėjo – nuo maždaug 269 tūkst. t CH₄ 1990 m. iki apie 104 tūkst. t CH₄ 2023 m., t. y. daugiau nei 60 % [15]. Šis mažėjimas nebuvo tolygus, o pasižymėjo skirtingais intensyvumo etapais (žr. 1.2 paveikslą). 1990–2000 m. laikotarpiu fiksuojamas didžiausias CH₄ emisijų sumažėjimas – emisijos sumažėjo beveik perpus, nuo ~269 tūkst. t iki ~151 tūkst. t CH₄. Šis pokytis daugiausia susijęs su žemės ūkio sektoriaus emisijų sumažėjimu (žr. 1.2 lentelę). 2000–2010 m. laikotarpiu CH₄ emisijų mažėjimas

sulėtėjo, o bendras jų kiekis stabilizavosi ties maždaug 140–150 tūkst. t CH₄ riba [15]. 2010–2020 m. laikotarpiu stebimas nuoseklus, tačiau santykinai lėtas emisijų mažėjimas – nuo maždaug 134 tūkst. t CH₄ iki 113 tūkst. t CH₄. Šiame etape ryškiausiai mažėjo atliekų sektoriaus emisijos (žr. 1.2 lentelę), 2020–2023 m. laikotarpiu išryškėja spartesnis emisijų mažėjimas, ypač energetikos sektoriuje, kur emisijos sumažėjo nuo 15,9 tūkst. CH₄ t iki 8,9 tūkst. t CH₄ [15]. Kaip matyti iš 1.2 lentelės ir 1.2 paveikslo, šis pokytis yra vienas ryškiausių pastaraisiais metais, rodantis didelį šio sektoriaus jautrumą pokyčiams ir potencialą emisijų mažinimui.



1.2 pav. Metano emisijų pokytis ir pagrindiniai emisijų sukėlėjai Lietuvoje 1990–2023 metais [15]

Analizuojant emisijų struktūrą pagal sektorius, nustatyta, kad didžiausią CH₄ emisijų dalį Lietuvoje sudaro žemės ūkio sektorius, kuris 2020 m. generavo apie 62% visų CH₄ emisijų [15]. Šis sektorius išlieka dominuojantis visą nagrinėjamą laikotarpį (žr. 1.2 paveikslą). Atliekų sektorius užima antrą vietą, o jo emisijos daugiausia susijusios su sąvartynuose šalinamomis atliekomis. Tuo tarpu energetikos sektorius sudaro santykinai nedidelę dalį – apie 14 % visų CH₄ emisijų [15].

Analizuojant atskirai tik energetikos sektoriaus CH₄ sukėlėjus, 2020 metais pagrindinės tiesioginės CH₄ emisijos susidarė dėl kuro deginimo – 5,85 tūkst. tonų CH₄, iš jų 4,38 tūkst. tonų CH₄ priklauso 1.A.4 kategorijos sektoriui, kuriame pagrindinę dalį sudaro energijos suvartojimas namų ūkyje (žr. 1.3 lentelę). Energijos gamybos 1.A.1 kategorijos sektorius 2020 metais sugeneravo 0,98 tūkst. tonų CH₄, didžioji dalis sugeneruota gaminant elektros ir šilumos energiją. Pramonės ir statybos 1.A.2 kategorijos sektorius 2020 metais sugeneravo 0,21 tūkst. tonų CH₄. CH₄ emisijos Lietuvos energetikos sektoriuje susidaro ne tik dėl kuro deginimo (1.A), taip pat dėl CH₄ nuotėkių gamtinių dujų nuotėkių paskirstymo, perdavimo ir saugojimo tinkluose (1.B.2.b kategorija), nedideliais kiekiais naftos žvalgyboje, gavyboje, transportavime, rafinavime ir sandėliavime (1.B.2. a

kategorija), dar mažiau – dėl naftos produktų išleidime / pašalinime gavyboje bei naftos produktų deginime fakeluose (1.B.2. c kategorija). 2020 metais dėl 2.B.2 kategorijų veiklų susidarė 10,06 tūkst. tonų CH₄ [15].

36,77 % CH₄ emisijų energetikos sektoriuje susidaro dėl kuro deginimo kurą deginančiuose įrenginiuose (1.A) ir 63,23 % dėl nenumatytų kuro išlėkimų (nuostolių, nuotėkių ir kt.) (2.B.2). Vertinant ilgesnio laikotarpio tendencijas 1990–2023 m., energetikos sektoriaus CH₄ emisijos Lietuvoje mažėjo, tačiau šis mažėjimas nėra tolygus visoms veikloms. Tiesioginio kuro deginimo (1.A) emisijos sumažėjo nuo 10,65 iki 4,96 tūkst. tonų CH₄, t. y. daugiau nei per pusę (–53,45 %), o transporto sektoriuje kritimas dar ryškesnis (–81,47 %), kas rodo technologinę pažangą ir kuro struktūros pokyčius. Tuo tarpu energijos gamybos sektoriuje (1.A.1) stebimas priešingas procesas – emisijos išaugo nuo 0,40 iki 1,10 tūkst. tonų CH₄ (+176,65 %). Pramonės ir statybos sektorius (1.A.2), kuris yra esminis šio darbo kontekste, išlieka santykinai mažos apimties emisijų šaltiniu, tačiau jo dinamika rodo nestabilų, o ne kryptingai mažėjantį pokytį: emisijos sumažėjo tik nežymiai – nuo 0,25 iki 0,23 tūkst. tonų CH₄ (–6,33 %), o tarpiniu laikotarpiu po 2000 m. yra pastebimas CH₄ emisijų didėjimas. Tai rodo, kad skirtingai nei kituose energetikos kategorijose, pramonėje nebuvo įgyvendinta pakankamai efektyvių CH₄ mažinimo priemonių arba jų poveikis buvo kompensuojamas augančiais gamybos mastais. Papildomai pažymėtina, kad nenumatytų kuro išlėkimų (1.B) emisijos per tą patį laikotarpį sumažėjo nuo 10,60 iki 3,94 tūkst. tonų CH₄ (–62,88 %), tačiau vis dar išlieka reikšmingu šaltiniu.

1.3 lentelė. Metano emisijos išsiskyrimo šaltiniai ir tendencijos Lietuvos energetikos sektoriuje 1990–2023 metais

Energetikos sektoriaus kategorijos	1990	2000	2010	2020	2022	2023	2023/1990 %
	tūkst. tonų CH ₄						
A. Kuro deginimas	10,65	7,56	8,62	5,85	5,48	4,96	–53,45
1.A.1 Energijos gamyba	0,40	0,18	0,43	0,98	1,08	1,10	176,65
1.A.2. Pramonė ir statyba	0,25	0,08	0,16	0,21	0,22	0,23	–6,33
1.A.3. Transportas	1,60	0,69	0,45	0,28	0,27	0,30	–81,47
1.A.4. Kiti sektoriai	8,41	6,60	7,59	4,38	3,91	3,32	–60,45
1.A.5. Karinė aviacija	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–
B. Nenumatyti kuro išlėkimai	10,60	7,73	9,58	10,06	6,42	3,94	–62,88
1.B.2. Nafta ir gamtinės dujos ir kiti išmesti ŠESD energijos gamyboje	10,60	7,73	9,58	10,06	6,42	3,94	–62,88

Siekiant įvertinti pagrindinių CH₄ sukėliklių energetikos sektoriuje tendencijas reikia įvertinti sektoriuje sunaudojamo kuro tendencijas. Integruoto požiūrio į metano išmetimų mažinimą Rumunijoje, Lenkijoje ir Lietuvoje techninėje ataskaitoje yra pateikiamos deginamo kuro energetikos sektoriuje pagal kategorijas tendencijos (žr. 1.4 lentelė) [16]. Analizuojant deginamo kuro sąnaudų pokyčius stacionariuose KDĮ energetikos sektoriuje matyti reikšmingi skirtumai tarp atskirų energetikos sektoriaus kategorijų ir kuro rūšių. Nors bendros iškastinio kuro sąnaudos nuo 1990 m. mažėjo, pramonės ir statybos kategorija (1.A.2) išlieka viena svarbiausių gamtinių dujų vartotojų energetikos sektoriuje. 2020 m. šioje kategorijoje sunaudota 12,15 tūkst. TJ gamtinių dujų, o tai

sudarė apie 28 % visų energetikos sektoriuje sunaudotų gamtinių dujų stacionariuose KDI. Pagal 2025 metų Lietuvos nacionalinės inventORIZACIJOS ataskaitos III priedą Lietuvoje 2020 metais buvo importuotą 99,751 tūkst. TJ gamtinių dujų, apdirbamoji pramonė suvartojo 11,439 tūkst. TJ gamtinių dujų [15]. Apdirbamosios pramonės ir galutinis suvartojimas sudarė 11,46 % nuo importuoto dujų kiekio, pagal tai galima paskaičiuoti, kad dėl apdirbamosios pramonės veiklos Lietuvoje 2020 metais susidarė papildomai 1,152 tūkst. t. CH₄ emisijų dėl nuotėkių skirstymo tinkluose.

1.4 lentelė. Stacionarių KDI, energetikos sektoriuje veiklos duomenys – CH₄ sukėlikliai, 1990, 2020, 2022 ir 2023 m. [16]

Deginamas kuras 1.A sektoriuje stacionariuose KDI	Kuro sąnaudos, tūkst. TJ/m.				Pokytis, palyginti su 20220 m. (+) sumažėjo / (-) padidėjo	
	1990	2020	2022	2023	2022 m.	2023 m.
Deginamas kuras						
Biokuras (1.A.1)	0,53	29,70	32,04	33,77	-7,9	-13,7
Biokuras (1.A.2)	0,50	5,31	5,33	5,87	-0,4	-10,7
Biokuras (1.A.4)	10,89	21,59	20,77	20,01	3,8	7,3
Išviso:	11,92	56,60	58,14	59,65	-2,7	-5,4
Gamtinės dujos (1.A.1)	105,13	20,24	9,11	8,64	55,0	57,3
Gamtinės dujos (1.A.2)	37,05	12,15	11,17	10,45	8,1	14,0
Gamtinės dujos (1.A.4)	25,01	11,05	12,13	12,30	-9,7	-11,3
Išviso:	167,19	43,44	32,41	31,38	25,4	27,8
Naftos produktai (1.A.1)	99,80	17,08	22,09	24,71	-29,4	-44,7
Naftos produktai (1.A.2)	50,24	1,64	1,89	2,14	-15,3	-31,0
Deginamas kuras	1990	2020	2022	2023	2022 m.	2023 m.
Naftos produktai (1.A.4)	37,25	4,68	5,48	5,88	-17,1	-25,7
Išviso:	187,29	23,39	29,44	32,73	-25,9	-39,9
Akmens anglis (1.A.1)	1,83	0,06	0,05	0,04	3,6	35,7
Akmens anglis (1.A.2)	1,81	3,71	4,47	3,00	-20,6	19,2
Akmens anglis (1.A.4)	29,09	1,87	2,06	1,10	-10,3	41,2
Išviso:	32,73	5,63	6,59	4,13	-16,9	26,6
Durpės (1.A.1)	0,11	0,14	0,12	0,08	14	44,8
Durpės (1.A.2)	0,17	0,004	0,001	0,000	75	100,0
Durpės (1.A.4)	0,26	0,6	0,84	0,56	-38,4	7,6
Išviso:	0,54	0,75	0,96	0,64	-27,8	15,2
Kitas iškastinis kuras (1.A.1)	0	2,38	3,59	2,42	-51,0	-1,7
Kitas iškastinis kuras (1.A.2)	0	0,07	0,11	0,52	-61,2	-679,1
Išviso:	0	2,45	3,70	2,94	-52,1	-20,3
Išviso kuro sąnaudos 1.A.1, 1.A.2, 1. A.4 sektoriuose, t.t.	399,67	132,26	131,25	131,48	0,8	0,6
Iškastinio kuro:	387,75	75,7	73,1	71,8	3,4	5,1
Biokuro:	11,92	56,6	58,1	59,6	-2,7	-5,4

Vertinant ilgalaikes tendencijas matyti, kad gamtinių dujų sąnaudos pramonės kategorijoje sumažėjo nuo 37,05 tūkst. TJ 1990 m. iki 10,45 tūkst. TJ 2023 m., t. y. apie 72 %. Vis dėlto mažėjimo tempas buvo mažesnis nei kai kuriuose kituose kategorijose, todėl pramonė ir toliau išlaiko reikšmingą priklausomybę nuo gamtinių dujų. Tuo pačiu laikotarpiu biokuro naudojimas pramonėje padidėjo nuo 0,50 iki 5,87 tūkst. TJ, kas rodo dalinį perėjimą prie atsinaujinančių energijos išteklių. Nepaisant to, biokuro dalis vis dar išlieka ženkliai mažesnė nei gamtinių dujų, todėl pramonės sektorius turi didelį potencialą tolimesniam iškastinio kuro mažinimui.

Apibendrinant galima teigti, kad pramonės kategorija (1.A.2) išlieka vienu svarbiausių energijos vartotojų ir vienu pagrindinių gamtinių dujų naudotojų energetikos sektoriuje. Nors ilgalaikėje perspektyvoje stebimas iškastinio kuro vartojimo mažėjimas bei biokuro naudojimo augimas, gamtinės dujos vis dar sudaro reikšmingą pramonės energijos balanso dalį. Dėl šios priežasties būtent pramonės sektoriuje slypi didelis potencialas mažinti CH₄ ir kitų ŠESD emisijas diegiant energinio efektyvumo priemones, atliekamos šilumos panaudojimo sistemas bei alternatyvius energijos šaltinius.

1.3. Energetinių išteklių ir CH₄ mažinimo galimybės pramonėje

Energijos išteklių problema apima kelis svarbius aspektus, susijusius su energijos paklausos augimu, iškastinio kuro išteklių išnaudojimu ir nepakankamomis valdymo politikomis tiek regioniniu, tiek pasauliniu mastu. Istoriniai energijos poreikio didėjimai ir neefektyvus energijos valdymas kelia iššūkius, susijusius su energijos išteklių prieinamumu, aplinkosaugos pasekmėmis bei socialinėmis ir ekonominėmis pasekmėmis [17]. Atsižvelgiant į šiuos iššūkius, vis didesnis dėmesys skiriamas energijos vartojimo efektyvinimui pramonės sektoriuje, diegiant švaresnės gamybos principus ir pažangias technologijas. Reikšmingas energijos taupymo potencialas gali būti pasiektas taikant integruotus sprendimus, apimančius technologijų modernizavimą, procesų optimizavimą bei atliekų ir energijos srautų valdymą. Nustatyta, kad švaresnės gamybos priemonių taikymas leidžia sumažinti energijos ir žaliavų sąnaudas, kartu mažinant taršą ir didinant gamybos efektyvumą, o didžiausias poveikis pasiekiamas įgyvendinant kompleksinius sprendimus, o ne pavienes priemones [18]. Švaresnės gamybos principai orientuoti į tvarų pramonės vystymąsi, siekiant sumažinti žaliavų ir energijos suvartojimą bei aplinkos taršą. Šie principai apima medžiagų ir energijos srautų uždaro ciklo kūrimą visoje gamybos grandinėje, taip mažinant atliekų kiekį ir skatinant efektyvesnę išteklių naudojimą [19].

Švaresnės gamybos priemonės gali būti skirstomos į kelias pagrindines kategorijas, apimančias tiek technologinius, tiek organizacinius sprendimus. Viena svarbiausių kryptų yra proceso optimizavimas, kai diegiami efektyvesni procesų valdymo metodai ir tobulinamos esamos kontrolės sistemos. Taip pat reikšmingą vaidmenį atlieka technologijų keitimas, kai esami gamybos procesai pakeičiami pažangesniais sprendimais, bei įrangos modernizavimas, leidžiantis sumažinti energijos ir išteklių sąnaudas. Kita svarbi priemonių grupė susijusi su medžiagų ir gaminių pakeitimu, kai naudojamos mažiau toksiškos, atsinaujinančios ar efektyvesnės žaliavos, taip pat koreguojamos galutinio produkto savybės ar sudėtis. Be technologinių sprendimų, svarbios ir organizacinės priemonės, tokios kaip gerosios ūkininkavimo praktikos taikymas bei vadybos tobulinimas, apimantis darbo procedūrų gerinimą, įrangos naudojimo instrukcijų atnaujinimą, procesų duomenų kaupimą ir veiksmingumo vertinimą. Papildomai svarbus yra atliekų susidarymo mažinimas ir jų antrinis panaudojimas įmonėje, kai atliekos grąžinamos į gamybos procesą arba panaudojamos toje pačioje sistemoje, taip didinant išteklių naudojimo efektyvumą [20, 21].

Mokslinės literatūros analizės metu buvo analizuojami švaresnės gamybos metodų taikymo atvejai ir faktiniai energijos taupymo rezultatai, kurie pateikiami 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. Taršos prevencijos metodų taikymas energijos vartojimo efektyvumo didinimo projektuose

Tyrimas	Taikomi prevencijos metodai	Pasiekti rezultatai
Švaresnės gamybos taikymo trąšų gamyboje skatinimas: atvejo analizė [22]	Geras ūkininkavimas (įrangos išjungimas prastovų metu, katilo darbo valdymas). Įrangos pakeitimas (mažesnės galios varikliai, oro tiekimo sistemų atnaujinimas). Proceso optimizavimas (degimo proceso gerinimas, garo nuostolių mažinimas).	Elektros energijos ir kuro sąnaudų sumažėjimas iki 25 %.
Maisto pramonės įmonių šiluminės energijos intensyvumo mažinimas taikant ŠG metodus [23]	Proceso optimizavimas (automatinės oro valdymo sistemos įdiegimas). Įrangos pakeitimas (kondensacinio dūmų ekonomizerio įdiegimas)	Šiluminės energijos gamybos efektyvumo padidėjimas 14,4 %, gamtinių dujų sąnaudų sumažėjimas 15,8 %.
Energijos efektyvumo didinimas ir CO ₂ emisijų mažinimo galimybės cemento pramonėje Kinijoje [24]	Įrangos pakeitimas (aukšto efektyvumo varikliai, ventiliatoriai, malūnai). Technologijos pakeitimas (vertikalūs ritininiai malūnai, klinkerio aušinimo modernizavimas). Proceso optimizavimas (energijos valdymo ir procesų kontrolės sistemos).	Bendras elektros energijos sutaupymas iki ~247 TWh sektoriaus mastu.
Emisijų mažinimo ir energijos efektyvumo didinimo galimybės lankstaus pakavimo gamyboje [25]	Technologijos pakeitimas (modernizuota ventiliacinė sistema).	Energijos sąnaudų sumažėjimas lanksčios pakuotės gamyboje iki 21,5 %.
Išteklių efektyvumo didinimo galimybės azoto trąšų gamyboje, taikant švaresnės gamybos ir pramoninės simbiozės principus [26]	Įrangos pakeitimas / modernizavimas (naujo KDĮ įdiegimas). Įėjimų pakeitimas (biodujų naudojimas garo gamyboje vietoj gamtinių dujų). Proceso optimizavimas (degimo proceso optimizavimas, naudojant DKE; garo nuostolių mažinimas tiekimo tinkluose; automatinio reguliavimo sistemų atnaujinimas, optimizavimas).	Energijos sąnaudos azoto trąšų gamyboje sumažėja apie 1GJ/t.
Aplinkosauginis popieriaus ir kartono pramonės vertinimas Jordanijoje – švaresnės gamybos koncepcija [27]	Atliekų antrinis panaudojimas (pluošto gražinimas į gamybą, dumblo panaudojimas kaip kuras). Technologijos pakeitimas (nuotekų valymo įrenginių modernizavimas, flotacijos sistemos tobulinimas). Proceso optimizavimas (vandens srautų atskyrimas, garo kondensato panaudojimas). Geras ūkininkavimas (žaliavų sandėliavimo gerinimas, transporto optimizavimas).	Vandens ir žaliavų sąnaudų sumažinimas iki 396 000 m ³ , kuro sąnaudų sumažėjimas >10 %.
Poveikio aplinkai mažinimas metalo apdirbamojoje pramonėje [28]	Įrangos pakeitimas (mažesnes elektros sąnaudas naudojančios įrangos diegimas).	Elektros energijos suvartojimas mažėja 30%.
Tvarių vystymusi pagrįsta švaresnė gamyba Kinijos šilumos energijos gamybos sektoriuje [29]	Geras ūkininkavimas (sustiprintas energijos vartojimo valdymas).	Vidutinis šiluminės energijos (termofikacinio vandens) gamybos efektyvumas padidėjo 12,5 %, sumažinant kuro sąnaudas elektrinės veikloje

1.3.1. Skaitmeninių technologijų taikymas šilumos energijos gamybos procesų optimizavimui

Skaitmeninių technologijų taikymas šilumos energijos gamybos procesų optimizavimui apima tiek technologinę, tiek sistemine gamybos vietos optimizaciją. Išskiriami du pagrindiniai žingsniai energijos poreikio mažinimui [30]:

- technologinė optimizacija, kurią sudaro efektyvių technologijų diegimas, didinantis procesų efektyvumą;
- sistemos optimizavimas, apimantis visos gamybos vietos šilumos integraciją.

Skaitmeninis dvynys (angl. – digital twin) vis plačiau pradedamas taikyti šilumos gamybos sistemų darbo optimizavimui, ypač siekiant pagerinti procesų valdymą, kokybės kontrolę ir sprendimų priėmimą. Ši technologija leidžia sukurti fizinės sistemos skaitmeninį modelį, kuris gali būti naudojamas sistemos veikimo prognozavimui, optimizavimui ir priežiūrai. Skaitmeninio dvynio taikymas leidžia analizuoti įvairius sistemos parametrus ir jų tarpusavio sąveikas, taip gerinant šilumos gamybos efektyvumą ir sumažinti eksploatacines išlaidas [31]. Taip pat skaitmeninis dvynys gali būti naudingas integruojant pažangias analitikos, dirbtinio intelekto ir daiktų interneto technologijas, kurios leidžia optimizuoti šilumos gamybos procesus, gerinti energijos panaudojimo efektyvumą ir mažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro [32].

Jing Xu ir kt. atlikto mokslinio tyrimo metu nustatyta, kad skaitmeninio dvynio diegimas gali duoti apčiuopiamą energetinį efektą. Cirkuliuojančio verdančio sluoksnio (CFB) katile buvo sukurtas duomenimis grįstas skaitmeninis dvynys, kuris, analizuodamas istorinius ir realaus laiko duomenis, nustatė optimalius oro srautų, slėgių, deguonies kiekio parametrų režimus skirtingomis eksploataavimo sąlygomis. Sistema taip pat gebėjo automatiškai identifikuoti kuro tipą ir pagal tai adaptuoti optimalius darbo parametrus. Įdiegus šį sprendimą pramoninėmis sąlygomis, katilo naudingumo koeficientas padidėjo nuo 84,41 % iki 85,96 %, per tris dienas buvo sutaupyta apie 151 GJ energijos, o garo gamyba padidėjo beveik 60 t, kas rodo tiesioginį skaitmeninio dvynio poveikį proceso efektyvumui [33].

Tokie rezultatai patvirtina, kad skaitmeninis dvynys nėra tik analizės ar vizualizacijos įrankis, bet veikianti sprendimų priėmimo sistema, leidžianti realiu laiku optimizuoti šilumos gamybos procesus.

1.3.2. Atliekamos šilumos panaudojimo galimybės pramonėje

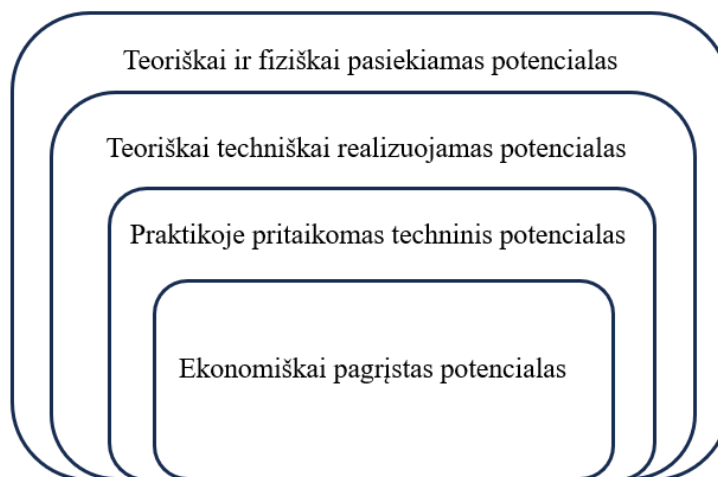
Energijos vartojimo efektyvumo didinimas yra vienas iš pagrindinių būdų sumažinti neigiamą poveikį aplinkai visame pramonės sektoriuje. Efektyvesnis energijos vartojimas gali prisidėti ne tik prie poveikio aplinkai mažinimo, bet ir turėti teigiamą įtaką iš ekonominės pusės. Pasak Deka, energijos efektyvumo didinimas, moksliniai tyrimai ir technologinės inovacijos prisideda prie ekologinio pėdsako mažinimo. Tyrimai Europos Sąjungos šalyse rodo, kad energijos efektyvumas ir atsinaujinanti energija mažina ekologinį pėdsaką, o efektyvus kapitalas, apimantis ir iškastinį kurą, gali būti neigiamas veiksnys aplinkos kokybei, todėl būtina pereiti prie švaresnių kuro rūšių ir technologijų [34].

Atliekamos šilumos panaudojimas pramonėje yra svarbi energijos taupymo ir efektyvumo priemonė, leidžianti sumažinti išmetamų teršalų kiekį ir pagerinti procesų efektyvumą. Atliekama šiluma dažniausiai yra skysta arba dujinė išeinanti srovė, kurios temperatūra ir charakteristikos priklauso nuo pramonės šakos. Šios šilumos panaudojimo galimybės apima elektros gamybą, šildymą, vėsinimą,

drėgmės šalinimą ir šilumos kaupimą, o technologijos parenkamos atsižvelgiant į atliekamos šilumos temperatūrą ir šaltinį [35].

Pagal Panayiotou ir kt. atliekamos šilumos panaudojimo potencialo vertinimas paprastai atliekamas etapais, išskiriant kelis potencialo lygius (1.3 pav.) [36]:

- Teoriškai ir fiziškai pasiekiamas potencialas;
- Teoriškai techniškai realizuojamas potencialas;
- Praktikoje pritaikomas techninis potencialas;
- Ekonomiškai pagrįstas (įgyvendinamas) potencialas.

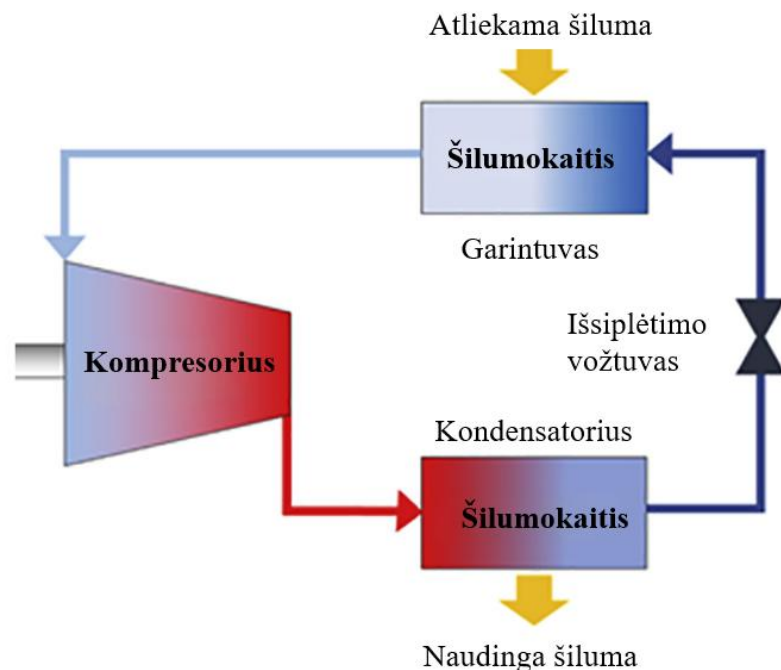


1.3 pav. Atliekamos šilumos potencialas

Atliekamos šilumos panaudojimo galimybės taip pat priklauso nuo šilumos temperatūrinio lygio, nes nuo jo tiesiogiai priklauso galimų technologijų pasirinkimas ir energijos panaudojimo efektyvumas. Pagal temperatūrą atliekama šiluma dažniausiai skirstoma į žemos temperatūros (<100 °C), vidutinės temperatūros (100–299 °C) ir aukštos temperatūros (≥300 °C) kategorijas [36].

Viena iš galimybių panaudoti vidutinės temperatūros atliekamą šilumą yra kondensaciniai dūmų ekonomizeriai. Šių įrenginių veikimo principas paremtas dūmų sraute esančių vandens garų fizikinėmis savybėmis – vandens garai, pereidami iš garinės būsenos į skystą (kondensuodamiesi), atiduoda didelį kiekį latentinės šilumos. Kondensaciniame dūmų ekonomizeryje karšti dūmai iš katilo yra aušinami šilumokaičio paviršiuje cirkuliuojančiu šaltu vandeniu, kol jų temperatūra nukrenta žemiau rasos taško. Sistemoje dūmai teka per šilumokaitį, o vanduo cirkuliuoja priešpriešiniu arba kryžminiu srautu, todėl užtikrinamas efektyvus šilumos perdavimas. Šilumos mainai vyksta ne tik dėl temperatūrų skirtumo, bet ir dėl masės pernašos – vandens garai difunduoja iš dūmų į skysčio–garo sąsają ir kondensuojasi, todėl bendras perduodamos šilumos kiekis yra didesnis nei įprastuose nekondensaciniuose šilumokaičiuose. Atvėsinti dūmai, kurių temperatūra gali būti sumažinta nuo ~120–150 °C iki ~40–50 °C, pašalinami į kaminą, o susidaręs kondensatas surenkamas ir pašalinamas iš sistemos. Tuo pačiu metu pašildytas vanduo gali būti naudojamas technologiniams poreikiams ar šilumos tinkluose, taip sumažinant pirminio kuro poreikį. Praktikoje tokie įrenginiai leidžia susigrąžinti iki 10–15 % dūmuose prarandamos šilumos ir atitinkamai padidinti katilo naudingumo koeficientą [37, 38].

Žemos temperatūros atliekamos šilumos panaudojimui viena iš galimų technologijų – šilumos siurbliai. Tai yra termodinaminiai energijos transformavimo įrenginiai, leidžiantys panaudoti aplinkoje arba technologiniuose procesuose esančią žemos temperatūros šilumą ir ją perduoti aukštesnės temperatūros poreikiams. Ši technologija gali naudoti įvairius šilumos šaltinius, pavyzdžiui: orą, vandenį, gruntą ar pramoninių procesų metu susidarantią atliekamą šilumą. Veikimo metu sistemoje cirkuliuojantis šaltnešis sugeria aplinkos arba proceso šilumą, o suspaudimo proceso metu jo temperatūra padidinama iki lygio, tinkamo šildymui ar technologiniams poreikiams. Vėliau sukaupta šiluminė energija perduodama kitai terpei per šilumokaitį. Principinė šilumos siurblio veikimo schema pavaizduota 1.4 pav. Pramonės sektoriuje šilumos siurbliai plačiai taikomi energinio efektyvumo didinimui ir atliekamos šilumos panaudojimui. Jie ypač efektyvūs tais atvejais, kai susidaro žemos temperatūros šilumos srautai, kurie tiesiogiai negalėtų būti panaudoti technologiniuose procesuose [39].



1.4 pav. Šilumos siurblio schema atliekamos šilumos panaudojimui [39]

2. Metano emisijų šaltinių identifikavimo ir mažinimo galimybių Lietuvoje pramonėje vertinimo metodika: tyrimo etapai ir siūlymai apdirbamajai pramonei

Tyrimo tikslas – Lietuvos pramonės įmonėse (energetikos sektoriaus objektuose) nustatyti pagrindinius CH₄ emisijų šaltinius ir pasiūlyti metodiką, kuri padėtų identifikuoti ir įvertinti įmonės daroma poveikį klimato kaitai dėl CH₄ bei tinkamai parinkti tvarios pramonės plėtros priemones šį poveikį sumažinti (toliau darbe vadinama – CH₄ emisijų ir jų mažinimo galimybių identifikavimo ir vertinimo metodika).

Eksperimentui (detalesniam vertinimui, CH₄ emisijų ir jų mažinimo galimybių identifikavimo ir vertinimo metodikos aprobavimui) pasirinkta UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ – produktų iš surimio gamybos įmonė (toliau – PKP), kurioje be pagrindinės gamybos eksploatuojamas energetikos objektas – kurą (kietąjį biokurą ir gamtines dujas) deginantys įrenginys (KDI). Gaminama šiluminė energija (garas) naudojama ne tik PKP tikslams, didžioji dalis tiekama kitoms šalia veikiančioms UAB „Vičiūnai Group“ įmonėms.

Tyrimui pasirinktas 2020 metų laikotarpis.

Šis objektas priskiriamas prie Energetikos sektoriaus objektų – 1.A Kuro deginimas pramonės kategorijoje (1.A.2) (žr. 1.4 ir 1.3 lenteles).

Baigiamasis projektas vykdomas 4 skirtingais etapais – literatūros apžvalga ir analizė, CH₄ emisijų ir jų mažinimo galimybių identifikavimo ir vertinimo metodikos kūrimas, švaresnės gamybos galimybių vertinimas analizuojamame objekte ir teikiamos rekomendacijos Lietuvos apdirbamajai pramonei. Detalesni CH₄ mažinimo ir energijos efektyvumo didinimo tyrimo etapai pavaizduoti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Tyrimo etapai, naudojami moksliniai metodai ir tikėtini rezultatai

Taikomi moksliniai metodai	Tyrimo etapai	Rezultatai
1 etapas		
Aplinkos apsaugos strateginių dokumentų analizė Mokslinės literatūros analizė Statistinių duomenų analizė Lietuvos nacionalinio ŠESD inventorizacijos dokumento analizė	Metano emisijų ir energijos vartojimo intensyvumo statistinių duomenų analizė Lietuvoje Strateginių dokumentų analizė Metano emisijų ir energijos efektyvumo didinimo apdirbamojoje pramonėje galimybių analizė	Įvertintas nagrinėjamos temos aktualumas, identifikuotos pagrindinės problemos ir suformuluoti analizės tikslai Nustatytos pagrindinės energijos vartojimo efektyvumo didinimo bei metano emisijų mažinimo galimybės
2 etapas		
IPCC 2006 metodika Kuro-energijos balanso metodas	CH ₄ vertinimo metodikos apdirbamosios pramonės įmonėms kūrimas	Apdirbamosios pramonės įmonėms pasiūlyta CH ₄ ir mažinimo galimybių vertinimo metodiką
3 etapas		
Aplinkosaugos ir energetinis auditas pasirinktoje įmonėje Sukurtos metodikos aprobavimas pasirinktoje įmonėje Švaresnės gamybos įdiegimo pramonės įmonėje metodika	PKP pirminis aplinkosauginis vertinimas Tiesioginio ir netiesioginio (1 ir 2 lygiu) poveikio klimato kaitai įvertinimas naudojantis sukurta metodika Metano mažinimo ir prevencijos	ŠESD ir CH ₄ emisijų įvertinimas Įvertintas energijos išteklių vartojimo intensyvumas įmonės lygmeniu Pateikti inovacijų pasiūlymai Atlikta siūlomų inovacijų

Taikomi moksliniai metodai	Tyrimo etapai	Rezultatai
balansas, metano emisijų įvertinimas pagal IPCC 2006 metodiką, ŠG įvykdumumo analizė, lyginamoji analizė, aplinkosauginio veiksmingumo įvertinimas)	pasiūlytų inovacijų įvykdumumo analizė Metano mažinimo veiksmingumo vertinimas VAP mažinimo veiksmingumo vertinimas	įgyvendinimo analizė
4 etapas		
Lyginamoji analizė Rezultatų apibendrinimas	Įvykdumumo analizės rezultatų pritaikymo galimybių vertinimas kitoms apdirbamosios pramonės įmonėms Rekomendacijų parengimas kitoms apdirbamosios pramonės įmonėms metano emisijų mažinimo srityje	Parengtos ir pateiktos rekomendacijos apdirbamosios pramonės įmonėms metano emisijų mažinimo srityje

Pirmajame etape siekiama pagrįsti tyrimo aktualumą ir nustatyti pagrindinę problematiką Lietuvos lygmeniu. Tikslui pasiekti atliekama mokslinės literatūros, teisės aktų ir statistinių duomenų apžvalga ir analizė. Analizės metu nustatomi pagrindiniai Lietuvos išipareigojimai CH₄ emisijų mažinimo srityje. Analizuojami ŠESD, CH₄ susidarymo, energijos efektyvumo ir kiti statistiniai duomenys tarp Lietuvos apdirbamosios pramonės įmonių. Apžvelgiamos mokslinės literatūros publikacijos siekiant nustatyti CH₄ emisijų mažinimo, energijos efektyvumo didinimo galimybes apdirbamojoje pramonėje.

Antrajame etape kuriama CH₄ emisijų vertinimo metodika, skirta apdirbamosios pramonės įmonėms. Metodikos pagrindui naudojamos IPCC rekomendacijos ir gairės, kurios pritaikomos konkrečiam pramonės sektoriaus kontekstui. Šiame etape nustatomi pagrindiniai CH₄ emisijų šaltiniai įmonės lygmeniu, parenkami tinkami emisijų apskaičiavimo metodai bei apibrėžiami reikalingi duomenys jų taikymui. Taip pat formuojama vertinimo struktūra, leidžianti įvertinti tiek tiesiogines (Scope 1), tiek netiesiogines (Scope 2 ir iš dalies Scope 3) emisijas. Sukurta metodika pritaikoma taip, kad būtų tinkama praktiniam naudojimui įmonėse, užtikrinant duomenų prieinamumą ir galimybę vertinti emisijų mažinimo priemonių efektyvumą.

Trečiajame etape atliekamas esamos situacijos įvertinimas įmonėje. Įvertinimas atliekamas atliekant aplinkosauginį auditą, analizuojant gamybos procesus. Įmonėje duomenys renkami už 2020 metus. Duomenų surinkimui naudojama įmonėje įdiegta monitoringo sistema pagal aplinkos vadybos standartą ISO 14001, analizuojamos įmonės teikiamos aplinkosaugos ataskaitos ir TIPK leidimas. Pagal surinktus duomenis sudaromas pagrindinių medžiagų ir energijos srautų balansas. Įidentifikuojamos pagrindinės aplinkos apsaugos problemos ir pateikiami siūlymai gerinimui. Atliekamas siūlomų sprendimo būdų aplinkosauginis, ekonominis ir įgyvendinamumo vertinimas.

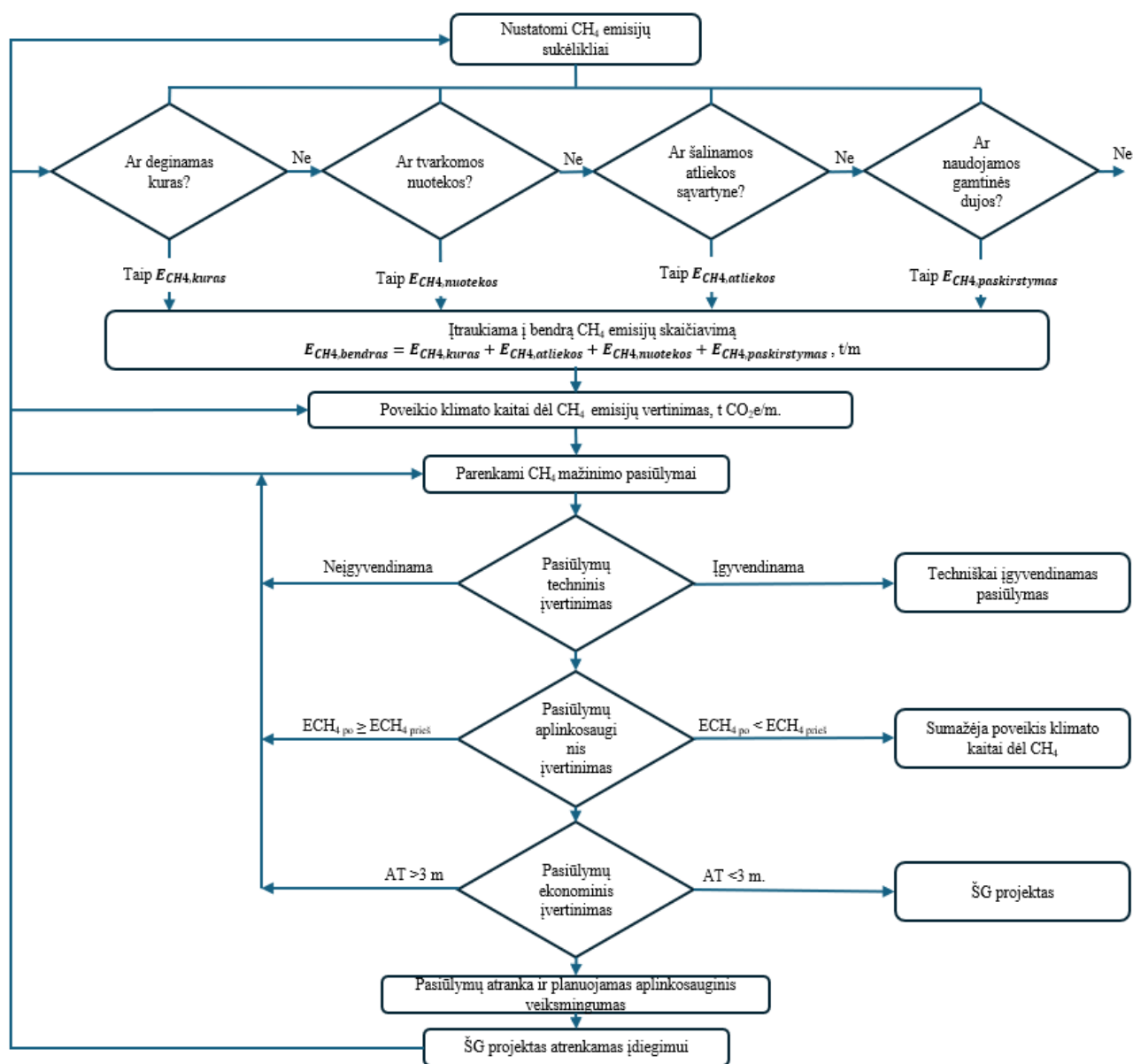
Ketvirtajame etape įvertinus visus tyrimo metu gautus rezultatus teikiamos rekomendacijos Lietuvos maisto pramonei dėl CH₄ emisijų mažinimo ir energijos efektyvumo didinimo galimybių.

2.1. Metano išmetimų įvertinimas pramonės įmonėse

CH₄ emisijų vertinimo ir mažinimo priemonių atranka bus atliekama pagal paruoštą metodiką, algoritmo schema pateikiama 2.1 paveiksle. CH₄ išmetimų įvertinimas pramonės įmonėse atliekamas naudojant IPCC 2006 metų gaires, pagal kurias išmetimai apskaičiuojami veiklos duomenis

dauginant iš atitinkamų emisijos koeficientų. Į vertinimą įtraukiami tie CH₄ šaltiniai, kurie aktualūs pramonės įmonei [40]:

- Kuro deginimas – stacionariuose (katilinės, garo katilai, technologinės krosnys, džiovyklos ir kt.) ir mobiliuose (krautuvai, traktoriai, įmonės transportas, sunkvežimiai ir kt.) kurą deginančiuose įrenginiuose deginamas kuras.
- Nuotekų tvarkymas – nuotekų tvarkymas anaerobiniu būdu įmonės teritorijoje.
- Atliekų tvarkymas – kietųjų atliekų šalinimas sąvartyne, taikomas atliekų tvarkymo įmonėms.
- Gamtinių dujų nuotėkiai skirstymo tinkluose – gamtinių dujų nuotėkiai, susidarantys transportuojant gamtines dujas iki pramonės objekto.



2.1 pav. Metano emisijų vertinimo ir mažinimo priemonių atrankos metodinė schema

Įvertinus CH₄ emisijų šaltinius apskaičiuojamas bendras CH₄ emisijų kiekis pagal metodikoje pateikiama 1 formulę. Atliekamas susidarančių emisijų vertinimas, nustatant didžiausią poveikį darančius procesus bei prioritetines sritis emisijų mažinimui. Remiantis Švaresnės gamybos principais, parenkamos potencialios CH₄ emisijų mažinimo priemonės, orientuotos į energijos vartojimo efektyvumo didinimą, kuro ir žaliavų sąnaudų mažinimą, technologinių procesų

optimizavimą, atliekamos šilumos panaudojimą, nuostolių mažinimą bei mažesnę poveikį aplinkai turinčių technologijų diegimą.

Parinktomis priemonėms atliekama įgyvendinimo analizė, kurios metu vertinamas technologinis pritaikomumas, galimybės integruoti priemones į esamus gamybos procesus bei reikalingi techniniai pakeitimai. Priemonės, kurių įgyvendinimas techniškai ar organizaciškai nėra galimas, atmetamos arba koreguojamos, o jų vietoje nagrinėjamos alternatyvios emisijų mažinimo galimybės.

Įgyvendinamoms priemonėms atliekamas aplinkosauginis vertinimas, nustatant galimą CH₄ emisijų sumažėjimą, energijos išteklių sutaupymą bei kitų aplinkosauginių rodiklių pokytį. Tais atvejais, kai siūlomos priemonės neužtikrina reikšmingo CH₄ emisijų sumažinimo, grįžtama prie alternatyvių priemonių parinkimo etapo.

Priemonėms, kuriomis pasiekiamas CH₄ emisijų sumažinimas, atliekamas ekonominis vertinimas, įvertinant investicijų poreikį, eksploatacinių sąnaudų pokytį bei investicijų atsiperkamumo laikotarpį. Priemonės, kurių atsiperkamumo laikotarpis neviršija 4 metų, laikomos tinkamomis ŠG projektui įgyvendinti. Tuo tarpu priemonės, kurių atsiperkamumas viršija nustatytą ribą, vertinamos pakartotinai arba keičiamos kitomis technologinėmis alternatyvomis.

Tokiu būdu siūloma jau klasikinę Lietuvos pramonei suprantamą Švaresnės gamybos diegimo pramonės įmonėse metodiką [Staniškis et al, 2010] integruoti į CH₄ emisijų ir jų mažinimo galimybių identifikavimo ir vertinimo metodiką.

Metano emisijų apskaičiavimas pramonės įmonėse:

$$E_{CH_4,bendras} = E_{CH_4,tiesioginis} + E_{CH_4,netiesioginis} \quad (1)$$

$$E_{CH_4,tiesioginis} = E_{CH_4,kuras} + E_{CH_4,atliekos} + E_{CH_4,nuotekos} \quad (2)$$

- $E_{CH_4,kuras}$ – metano emisija iš kuro deginimo įrenginio, kuri vertinama pagal formulę sudaryta remiantis metodika, pateikta IPCC 2006 m. Nacionalinių šiltnamio efektą sukeliančių dujų inventoriaus gairių (Angl. – IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) [40] (toliau – IPCC 2006) 2 skyriaus „Energetika“, pagal kurią emisijos apskaičiuojamos kaip veiklos duomenų ir emisijos koeficiento sandauga:

$$E_{CH_4,kuras} = \sum_i (M_i \times Q_z \times EF_{CH_4}) \times 10^{-3} \quad (3)$$

čia M_i – sunaudoto kuro (degalų) masė, t/m arba tūkst. m³/m., 2.2 lentelė;

Q_z – sunaudoto kuro šilumingumo (žemutinė) vertė, TJ/t, 2.2 lentelė;

EF_{CH_4} – IPCC 2006 2 skyriuje „Energetika“ pateikti emisijų faktoriai, kg/TJ (antrame paragrafe „Stacionarus deginimas“ (Angl. – Chapter 2 „Stationary combustion“) ir 3-me paragrafe „Mobilus deginimas“ (Angl. – Chapter 3 „Mobile combustion“).

2.2 lentelė. Lietuvoje deginamo kuro žemutinės kuro žemutinės šilumingumo vertės ir CH₄ emisijų faktoriai 2020 metais [15]

Šaltinis, deginamas kuras	Įrenginys	Žemutinė šilumingumo vertė	EF _{CH₄} , kg/TJ
Gamtinės dujos	Stacionarūs KDĮ	0,034577, TJ/1000 m ³	1

Kietasis biokuras	Stacionarūs KDĮ	0,0156, TJ/t	30
Dyzelinis kuras	Mobilūs šaltiniai	0,04291, TJ/t	3,9
LPG		0,04579, TJ/t	62
Benzinas		0,04391, TJ/t	25

Kiekvienais metais informacija apie deginamo kuro žemutines šilumingumo vertes ir Lietuvos energetikos sektoriaus sukėlikliams taikomus CH₄ emisijų faktorius pateikiama galutinėje nacionalinėje ŠESD inventorizavimo ataskaitoje, kuri atviraai publikuojama ir demonstruojama aplinkos apsaugos agentūros internetinėje svetainėje (žr. veiklos sritys – „Šiltnamio efektą sukeliančios dujos“).

Pavyzdžiui, pramonės įmonės katilinėje sudeginta 20 000 t kietojo biokuro; metano emisija dėl šio kuro deginimo:

$$E_{CH_4,biokuras} = 20\,000 \text{ t/m.} \times 0,0156 \text{ TJ/t} \times 30 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 9,36 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

Pavyzdžiui, pramonės įmonės krautuvų (*ne kelių transportas*) vidaus degimo varikiuose per metus sunaudota 5 t dyzelinio kuro; metano emisija dėl šio kuro deginimo:

$$E_{CH_4,dyzelinas} = 5 \text{ t/m.} \times 0,04291 \text{ TJ/t} \times 4,15 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0009 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

Pavyzdžiui, pramonės įmonėje sunkiasvorio transporto vidaus degimo varikiuose per metus sunaudota 20 t dyzelinio kuro; metano emisija dėl šio kuro deginimo:

$$E_{CH_4,dyzelinas} = 20 \text{ t/m.} \times 0,04291 \text{ TJ/t} \times 3,9 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0033 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

- $E_{CH_4,atliekos}$ – metano emisija dėl kietųjų atliekų šalinimo sąvartyuose, kuri vertinama pagal formulę, sudaryta remiantis metodika, pateikta IPCC 2006 [40]. 5 skyriuje „Atliekos“, pagrįsta organinės anglies kiekio atliekose (DOC) ir jos skaidymo anaerobinėmis sąlygomis vertinimu:

$$E_{CH_4,atliekos} = W \times DOC \times DOC_f \times F \times MCF \times \frac{16}{12} \quad (4)$$

čia W – atliekų kiekis, t/metus;

DOC – organinės anglies kiekis atliekose, t anglies/ t atliekų;

DOC_f – skaidomos organinės anglies dalis, rekomenduojama tipinė reikšmė 0,5;

F – metano dalis sąvartyne biodujose, tipinė reikšmė 0,5;

MCF – metano korekcijos faktorius pagal IPCC 2006 metų gaires, 2.3 lentelė.

2.3 lentelė. MCF numatytosios vertės [40]

Sąvartyno tipas	Metano korekcijos faktoriaus (MCF) numatytoji vertė
Tvarkomas – anaerobinis	1,0
Tvarkomas – pusiau aerobinis	0,5
Netvarkomas – gilus (>5 m atliekų sluoksnis) ir (arba) aukštas gruntinio vandens lygis	0,8

Sąvartyno tipas	Metano korekcijos faktoriaus (MCF) numatytoji vertė
Netvarkomas – sekclus (<5 m atliekų sluoksnis)	0,4
Neklasifikuotas KSA sąvartynas	0,6

Pavyzdžiui, pramonės įmonė per metus į sąvartyną pašalina 20 t maisto atliekų. Taikomas DOC = 0,15, pagal IPCC 2006 gairių 5 skyriaus 2-ame paragrafe nurodyta 2.4 lentelę. MCF taikomas kaip neklasifikuojamam sąvartynui.

$$E_{CH_4,atliekos} = 20 \text{ t/m.} \times 0,15 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,6 \times 16/12 = 0,60 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

- $E_{CH_4,nuotekos}$ – metano emisija dėl biologinio nuotekų tvarkymo, kuri vertinama pagal formulę, sudaryta remiantis metodika, pateikta IPCC 2006 [40]. 5 skyriuje „Atliekos“, pagrįsta organinės taršos kiekio nuotekose (COD) ir jos skaidymo anaerobinėmis sąlygomis vertinimu:

Metano emisijų iš nuotekų formulė paremta IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Chapter 6) metodika, kurioje emisijos siejamos su nuotekose esančios organinės medžiagos kiekiu. IPCC metodas grindžiamas principu, kad metano susidarymas priklauso nuo bendros organinės apkrovos (BOD) ir jos anaerobinio skaidymo sąlygų, išreiškiamų per maksimalų metano susidarymo potencialą (B_0) ir metano korekcijos koeficientą (MCF).

$$E_{CH_4,nuotekos} = (COD - S) \times (B_0 \times MCF) - R \quad (5)$$

čia COD – bendras organinės taršos kiekis nuotekose, kg ChDS per metus;

S – pašalinta organikos dalis kaip dumblas, kg ChDS per metus;

B_0 – maksimalus metano susidarymo potencialas, tipinė reikšmė 0,25 CH₄/kg ChDS;

MCF – metano emisijų korekcijos faktorius iš IPCC 2006 metų gairių, pavyzdžiui nuotekos tvarkomos prastai kontroliuojamu aerobiniu būdu reikšmė 0,3;

R – surinktas / sudegintas metanas, kg CH₄ per metus.

Pavyzdžiui, pramonės įmonėje per metus nuotekose susidaro 50 t ChDS organinės taršos. Nuotekos tvarkomos aerobiniu būdu prastai prižiūrimoje sistemoje, todėl pagal IPCC 2006 m. gairių numatytąsias vertes taikomas MCF = 0,3. Laikoma, kad organinė tarša su dumblu nepašalinama (S = 0), o metanas nėra surenkamas ar deginamas (R = 0).

$$E_{CH_4,nuotekos} = (50 \text{ t ChDS/m.} - 0) \times (0,25 \text{ kg CH}_4/\text{kg ChDS} \times 0,3) - 0 = 3,75 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

- $E_{CH_4,paskirstymas}$ – metano emisija dėl netiesioginių gamtinių dujų nuotėkių paskirstymo tinkluose. Metano emisijų iš gamtinių dujų skirstymo formulė nėra tiesiogiai paimta iš IPCC metodikos, o sudaryta remiantis masės balanso principu, naudojant viešai skelbiamus skirstymo sistemos technologinių sąnaudų rodiklius:

$$E_{CH_4,netiesioginis} = E_{CH_4,paskirstymas} = Q_{dujos} \times R_{TS} \times f_{CH_4} \times \rho_{CH_4} \times 10^{-3} \quad (6)$$

čia Q_{dujos} – suvartotas gamtinių dujų kiekis, m³/metus;

R_{TS} – ESO gamtinių dujų skirstymo technologinių sąnaudų rodiklis procentine dalimi, pavyzdžiui 2020 metais 0,022;

f_{CH_4} – metano procentinė dalis gamtinėse dujose pagal AB “Amber Grid” teikiamus duomenis, pavyzdžiui 2020 metais 0,9517;

ρ_{CH_4} – metano tankis, kg/m^3 , pavyzdžiui Lietuvoje 2020 metais 0,7.

Pavyzdžiui, pramonės įmonė per metus suvartojo 50 000 m^3 gamtinių dujų. Metano emisija dėl gamtinių dujų paskirstymo tinklų technologinių nuostolių apskaičiuojama pagal formulę:

$$E_{CH_4, \text{paskirstymas}} = 50\,000 \text{ m}^3/\text{m} \times 0,022 \times 0,9517 \times 0,7 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-3} = 0,73 \text{ t CH}_4/\text{m}.$$

Tiesioginis poveikis klimato kaitai (*Angl. – global warming effect*) dėl metano emisijos:

$$GWE_{CH_4, \text{tiesioginis}} = 28 \times E_{CH_4, \text{kuras}} \quad (7)$$

Netiesioginis poveikis klimato kaitai dėl metano emisijos:

$$GWE_{CH_4, \text{netiesioginis}} = 28 \times E_{CH_4, \text{paskirstymas}} \quad (8)$$

2.2. Atliekant tyrimą naudojamos papildomos formulės:

Deginant kurą pagamintas šiluminės energijos kiekis [41]:

$$Q = \frac{(B \times Q_z) \times \eta}{3,6} \quad (9)$$

čia Q – pagamintas šilumos energijos kiekis, MWh.;

B – sudeginto kuro kiekis, t arba tūkst. m^3 ;

Q_z – kuro žemutinė šilumingumo vertė, GJ/t arba GJ/tūkst. m^3 ;

η – šilumos energiją gaminančio ir kurą deginančio įrenginio naudingumo koeficientas.

Oro teršalų (SO_x , NO_x , CO, KD) kiekis dėl kuro deginimo [42]:

$$E_p = (FC \times Q_z) \times EF \times 10^{-6}, \quad (10)$$

čia E_p – išmesto teršalo kiekis, t;

FC – kuro sąnaudos, t arba tūkst. nm^3 ;

Q_z – kuro žemutinė šilumingumo vertė, GJ/t arba GJ/tūkst. m^3 ;

EF – emisijų faktorius, g/GJ sudeginto kuro [42].

Santykinių aplinkos apsaugos indikatorių ($AAI_{S(t-1)}$) įvertinimas prieš inovacijos įdiegimą [41]:

$$AAI_{S(t-1)} = \frac{X_{(t-1)}}{G_{(t-1)}} \quad (11)$$

čia $AAI_{S(t-1)}$ – santykinis AAI prieš inovacijos įdiegimą per laikotarpį t (pavyzdžiui, produkcijos vienetui pagaminti sunaudojamas elektros energijos kiekis (MWh/t);

$t-1$ – ankstesnis ciklas;

$X_{(t-1)}$ – išmatuota arba apskaičiuota sąnaudų reikšmė per fiksuotą t laikotarpį;

$G_{(t-1)}$ – produkcijos kiekis, pagamintas per fiksuotą t laikotarpį prieš inovacijos įdiegimą.

Kuro kiekis reikalingas pagaminti norimą šilumos kiekį:

$$B = \frac{Q \times 3,6}{Q_z \times \eta} \quad (12)$$

čia B – sudeginto kuro kiekis, t arba tūkst. m^3 ;

Q – pagamintas šilumos energijos kiekis, MWh.;

Q_z – kuro žemutinė šilumingumo vertė, GJ/t arba GJ/tūkst. m^3 ;

η – šilumos energiją gaminančio ir kurą deginančio įrenginio naudingumo koeficientas.

Siūlomos inovacijos atsiperkamumo trukmė [41]:

$$AT = \frac{I}{S} \quad (13)$$

čia AT – atsiperkamumo trukmė metais;

I – investicijos inovacijai įgyvendinti, EUR;

S – laukiama inovacijos ekonominė nauda, EUR/m.

Šiluminės energijos suvartojimas, vandenį šildant medžiagos masę nuo t_1 iki t_2 temperatūros:

$$Q = C \times m \times (t_2 - t_1) \times 10^{-6} \quad (14)$$

čia Q = reikalingas šilumos kiekis, GJ

C – savitoji šiluma, KJ/(kg °C), pvz., vandens atveju – $\approx 4,18$ KJ/(kg °C);

m – medžiagos masė, kg, vandens atveju 1000 kg = 1 m^3 ;

$(t_2 - t_1)$ – temperatūros skirtumas, °C.

Planuojamas aplinkosauginis veiksmingumas [41]:

$$AAV_{planas} = AAI_{S(t-1)} - AAI_{S(t)} \quad (15)$$

Čia $AAI_{S(t-1)}$ – santykinis aplinkos apsaugos indikatorius iki inovacijos įdiegimo;

$AAI_{S(t)}$ – santykinis aplinkos apsaugos indikatorius po inovacijos įdiegimo.

CO₂ ir N₂O emisijos dėl kuro deginimo ir freono sąnaudų:

$$E_i = (VD \times EF_i) \times 10^{-3}, [43] \quad (16)$$

čia E_i – CO₂ arba N₂O emisijos, t/m;

VD – veiklos duomenys, kuro sąnaudos perskaičiuotos į TJ, freono sąnaudos kg arba elektros suvartojimas MWh;

EF_i – CO₂, N₂O arba freono emisijų faktorius 2.4 lentelė, (freono R407f – 1622 t CO₂e/t [44], elektros energija 420 kg CO₂e/MWh [45]).

2.4 lentelė. Lietuvoje plačiausiai deginimo kuro žemutinės šilumingumo vertės ir CO₂ nei N₂O emisijų faktoriai

Šaltinis, deginamas kuras	Įrenginys	Žemutinė šilumingumo vertė	EF _{CO2} , kg/TJ	EF _{N2O} , kg/TJ [41]
Gamtinės dujos	Stacionarūs KDI	0,034577, TJ/1000 m ³	55590 [43]	0,1
Kietasis biokuras	Stacionarūs KDI	0,0156, TJ/t	104100 [43]	4
Dyzelinis kuras	Mobilūs šaltiniai	0,04291, TJ/t	72950 [15]	3,9
LPG		0,04579, TJ/t	66440 [15]	0,2
Benzinas		0,04391, TJ/t	70030 [15]	8

Kaip jau buvo minėta, kiekvienais metais informacija apie deginamo kuro žemutinės šilumingumo vertes ir Lietuvos energetikos sektoriaus sukėlikliams taikomus ŠESD emisijų faktorius pateikiama galutinėje nacionalinėje ŠESD inventorizavimo ataskaitoje.

Poveikis klimato kaitai dėl ŠESD:

$$\text{GWE}_{\text{ŠESD}} = \text{CO}_2 + 28\text{CH}_4 + 265\text{N}_2\text{O} \quad (17)$$

3. Metano emisijų mažinimo galimybių vertinimas eksperimentui parinktoje pramonės įmonėje

Lietuvos pramonės įmonėms pasiūlyta ir antrame skyriuje aprašyta CH₄ emisijų ir jų mažinimo galimybių identifikavimo ir vertinimo metodika buvo naudota (aprobuota) eksperimentui parinktam objektui – UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ (toliau – PKP). PKP yra įsikūrusi vakariniame Plungės miesto pakraštyje adresu Birutės g. 50 Plungė ir Birutės g. 50A Plungė. PKP pagrindinė gaminama produkcija: krabų lazdelės ir produktai iš surimio (čankasai, krabų žnyplės krabų mėsa, baitai, ir kt.). PKP turi išduotą taršos integruotos prevencijos ir kontrolės leidimą (toliau – TIPK leidimas). TIPK leidimas išduotas pagal TIPK taisyklių 1 priede nurodytą 6.4.2.1 kriterijų, nes PKP gyvulinės žaliavos pajėgumai yra didesni kaip 75 tonos per dieną [46]. Be pagrindinė veiklos PKP eksploatuoja KDI, tokiu būdu prisikariama prie Lietuvos energetikos sektoriaus pagal ŠESD apskaitą.

3.1. UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ esamos veiklos aplinkos apsaugos įvertinimas: metano emisijų sukėlkliai, jų poveikis klimato kaitai, metano emisijų mažinimo galimybės

PKP gamyba vyksta 4 cechuose, nors gaminama skirtingų tipų produkcija pagrindiniai gamybos technologiniai procesai išlieka panašūs. Gamyboje pirmiausia yra paruošiama produkto emulsija į kurią įeina visi receptūroje nurodyti produktai. Paruošta emulsija siurbliu pagalba perduodama į gamybines linijas kepimo–virimo mašinas, kur gaminiai nenutrūkstamu režimu praeina visas technologines operacijas: kepimą, virimą, formavimą, pasterizavimą, atvėsinimą, supakavimą, atšaldymą arba užšaldymą. Paruošta produkcija pakuojama į kartonines dėžes ir laikoma iki realizacijos šaldymo kameroje.

Pagrindiniams gamybiniais procesams (kepimui, virimui, pasterizacijai) yra naudojama šilumos energija garo pavidalu. PKP eksploatuoja 4 kurą deginančius įrenginius (KDI). Pagrindinis KDI 10 MW kietojo kuro garo katilas Nr.049 (GK) „JARFORSEN“, kuriame deginamas kietasis kuras – smulkinta mediena. PKP taip pat eksploatuoja 3 gamtinių dujų garo katilus: GK Nr. 001 „KUIPER“ 2,1 MW, GK Nr. 048 3,13 MW „COCHRAN“ ir GK Nr. 050 9,76 MW „VIESSMAN VITOMAX 200 HS“. Pagrindiniai katilų parametrai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ garo katilų pagrindiniai parametrai

	GK Nr.049	GK Nr.001	GK Nr.048	GK Nr.050
Katilo pavadinimas	Jarforsen	Kuiper	Cochran	Viessman vitomax 200 HS
Deginamo kuro rūšis	Biokuras	Gamtinės dujos	Gamtinės dujos	Gamtinės dujos
Katilo nominali šiluminė galia, MW	10	2,1	3,13	9,76
Naudingumo koeficientas (n.k.) %	89	93	93,5	94,6

Vertinant dujinius GK bus laikoma, kad naudingumo koeficientas yra 94,6 pagal GK Nr. 050, nes šis KDI naudojamas kaip pagrindinis ir jame sudeginama apie 90 % visų gamtinių dujų.

Verta pažymėti, kad PKP šiluminę energiją tiekia ir kitoms Plungėje įsikūrusioms Vičiūnų grupės įmonėms.

Gamybinėje technologijoje tam tikriems procesams, tokiems kaip produkto atvėsimumui, atšaldymui ir užšaldymui taip pat sandėliavimui iki realizacijos yra naudojama ir šalčio energija. Šalčio energijai gaminti stacionarioje šaldymo įrangoje yra naudojamas šaldalas R-407F. Stacionarios šaldymo įrangos išsamesni duomenys pateikiami 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ stacionari šaldymo įranga

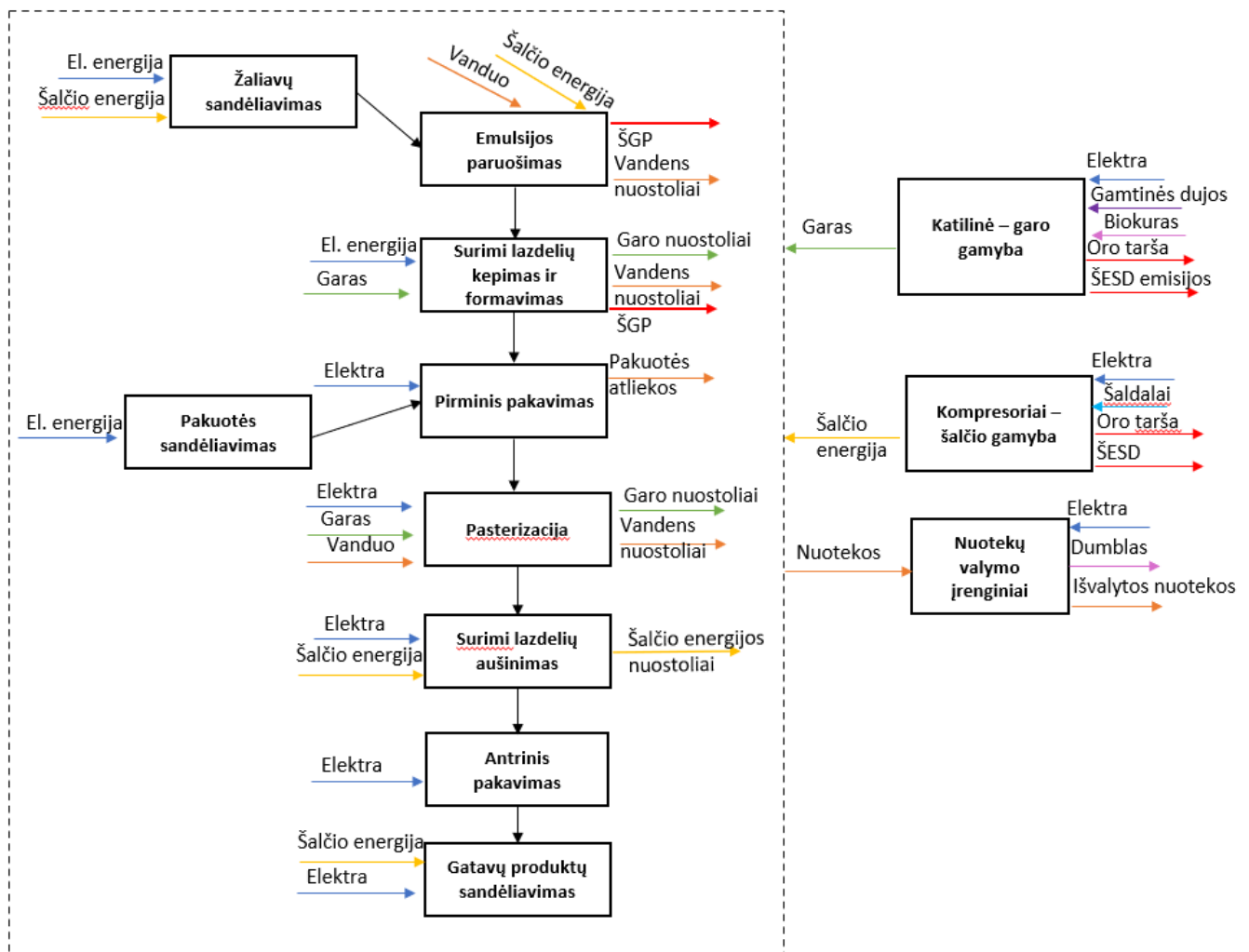
Šaldalo pavadinimas	Stacionarios šaldymo įrangos pavadinimas, modelis	Šaldymo skysčio ar dujų kiekis įrangos vienetu, kg	Įrangos kiekis, vnt.	Bendras šaldalo kiekis, kg
R407F	Bitzer VS-HSN 8571-125	1700	1	1700
R407F	Bitzer VS-HSN 7471-75	1475	2	2950
R407F	Bitzer LH 104/4DC-7.2	25	1	25
R407F	Bitzer LH124/4NC-15.2Y	20	1	20
R407F	Bitzer VS6-S6J-16.2	1000	1	1000
R407F	Airwel VLS904	44	1	44
R407F	Bitzer LH135/4H-25,2	50	1	50
R407F	Hitachi RSU -1000TFC	1200	1	1200
R407F	Bitzer VS2-S6J-16.2	150	1	150
R407F	Bitzer VS3-S6J-16.2	100	1	100
R407F	Bitzer VKS2 6G-30.2Y	550	1	550
R407F	Bitzer LH124/4FC-5.2	30	2	60
R407F	Bitzer VK2 4G-30.2Y	80	1	80
R407F	Airwell	11,4	1	11,4
R407F	Mycom F220JS	1400	1	1400
R407F	Bitzer HSN8591	250	1	250
R407F	Bitzer INDP2x4FES-4Y	80	1	80
R407F	Bitzer INDP2x4HE-18Y	100	1	100
R407F	Bitzer INDP2x4TES-9Y	150	1	150

Gamybos metu susidaranti gamybinės nuotekos yra surenkamos atskirai nuo nuotekų susidarantių buitinėse patalpose ir yra perduodamos į UAB „Vičiūnai ir partneriai“ priklausančią antrinę nuotekų valyklą. Įrenginyje nuotekos dalinai išvalomos nuo riebalų, chloridų, bendro azoto, bendro fosforo, BDS₇ ir ChDS. Dalinai išvalytos nuotekos atiduodamos į UAB „Plungės vandenys“ nuotekų tinklus. Nuotekos iš buitinių patalpų be valymo tiesiogiai atiduodamos į UAB „Plungės vandenys“ priklausančius tinklus. Paviršinės nuotekos surenkamos nuo visų asfaltuotų teritorijos plotų yra išvalomos smėliagaudėse ir naftos produktų separatoriuose ir kartu su švariomis paviršinėmis nuotekomis nuo stogų išleidžiamos į gamtinę aplinką neviršijančios DLK nustatytų paviršinių nuotekų tvarkymo reglamente.

PKP veiklos metu susidaranti atliekos galima sugrupuoti į keletą skirtingų pogrupių:

- Biologiškai skaidžios atliekos – gamybos metu susidaranti biologiškai skaidžios atliekos turėjusios sąlyti su cheminės medžiagomis (plovimo metu), kurios negali būti panaudojamos žmonių ar gyvūnų maistui gaminti yra laikomos šaldytuve iki kol bus atiduotos atliekas tvarkančiai įmonei kompostui gaminti.
- Pakuotės atliekos – pagrindinė atliekų rūšis susidaranti gamybos technologinio proceso metu. Pakuotės atliekos susidaro tiek išpakuojant žaliavas skirtas produktui gaminti tiek ir pačio produkto pirminio bei antrinio pakavimo metu. Pakuotės atliekos yra perduodamos atliekų tvarkytojams perdirbimui.

- Kitaip neapibrėžtos komunalinės atliekos – gamybos metu susidaranti atliekos, kurios turi energetinę vertę tačiau negali būti perdirbamos. Tokios atliekos atiduodamos atliekų tvarkytojui energijai išgauti.



3.1 pav Medžiagų ir energijos srautų diagrama

Aplinkosauginio audito metu duomenys buvo renkami iš skirtingų šaltinių: aplinkos vadybos sistemos ISO 14001 monitoringo programos, gaminių pakuočių atliekų informacinės sistemos (GPAIS) metinės atliekų ir pakuočių ataskaitos, metinės nuotekų tvarkymo ataskaitos, metinės oro taršos ataskaitos, metinės fluorintų dujų ir ozono sluoksnį ardančių medžiagų ataskaitos, TIPK leidimo, , oro taršos šaltinių ir iš jų išmetamų teršalų inventorizacijos ataskaitos. Atskirai buvo vertinama oro tarša iš PKP katilinės ir visos ŠESD, naudojant metodikoje pateiktas formules.

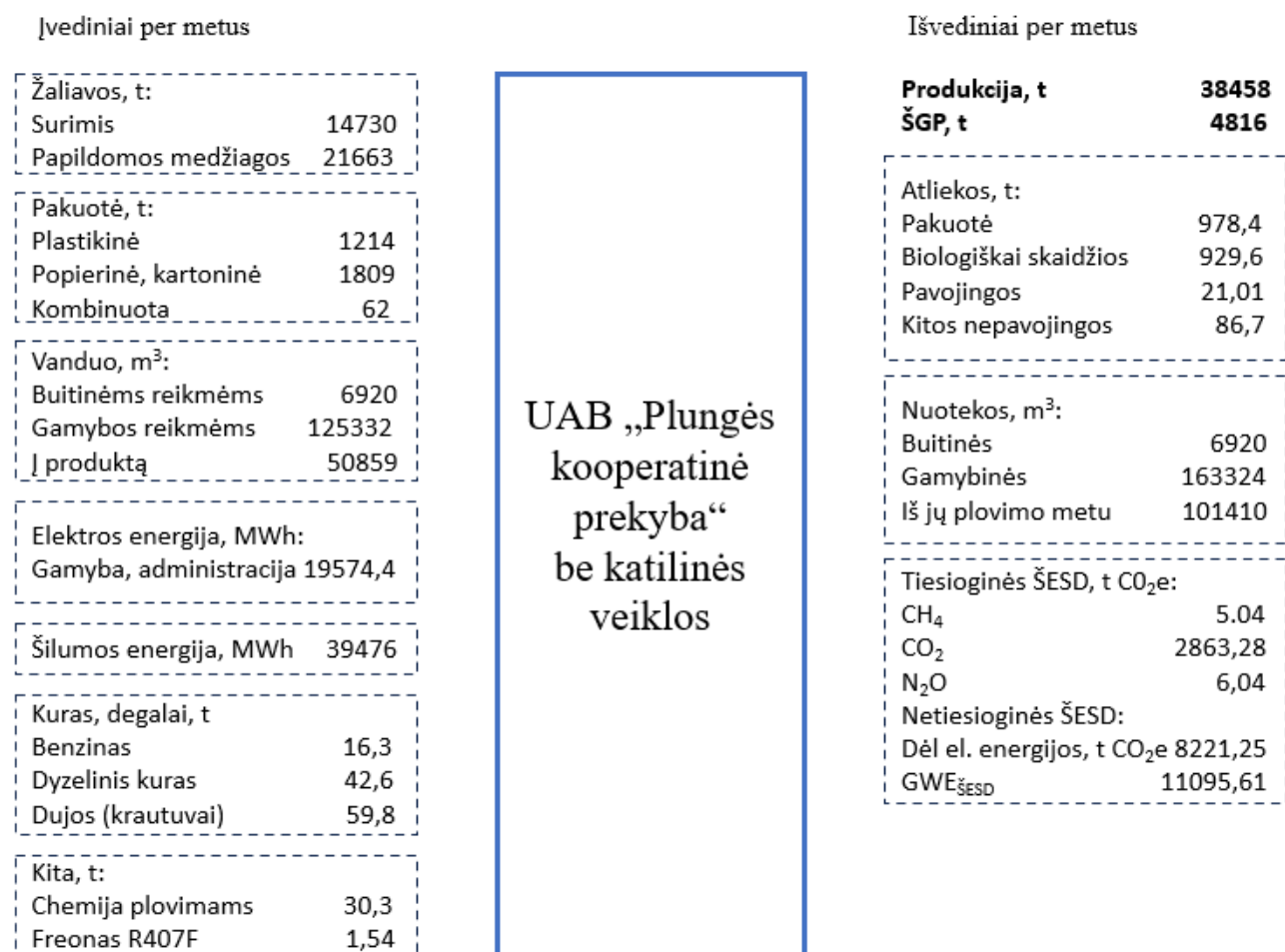
Visų medžiagų ir energijos srautų (įvedinių ir išvedinių) kiekybinio vertinimo rezultatai pateikti 3.2 ir 3.3 paveiksluose. 3.2 paveiksle pateikti tik tie srautai ir jų kiekiai, kurie susieti su PKP pagrindinės produkcijos – produktų iš surimio gamyba, PKP katilinės veiklos srautai pateikti atskirai 3.3 paveiksle. Analizė atliekama, vertinant 2020 m., kadangi CH₄ emisijų mažinimo tikslai numatomi, lyginant būtent su 2020 m.

Per 2020 metus PKP sunaudota 14 730 tonų pagrindinės įmonės žaliavos – surimio. Be surimio įmonėje naudojamos papildomos medžiagos (krakmolas, kiaušinių milteliai, druska, skoniai ir kiti

priedai), per metus sunaudota 21 663 tonų papildomų medžiagų. Per 2020 metus įmonėje buvo pagaminta 38 458 tonos produkcijos.

2020 metais įmonėje buvo suvartota 20 210,3 MWh elektros energijos. Gamybos procesams ir administracinėse patalpose buvo sunaudota 96,86 % elektros energijos ir 3.14 % katilinės veiklai.

Kuras įmonėje naudojamas transportui ir garo gamybai. Per 2020 metus kelių transportui sunaudota 16,3 t benzino, 42,6 t dyzelino ir 59,8 t gamtinių dujų.



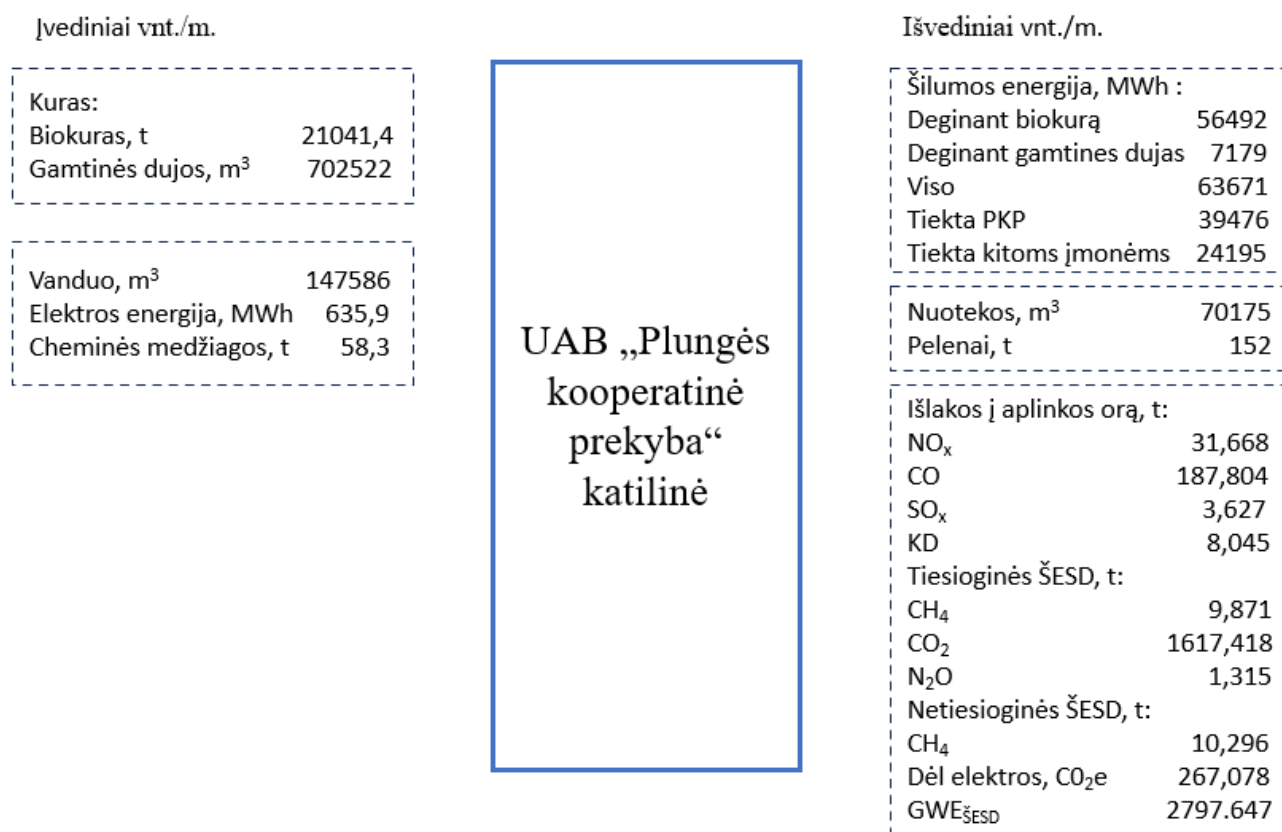
3.2 pav. PKP be katilinės veiklos pagrindiniai medžiagų ir energijos srautai, vnt./m.

Garo gamybai katilinėje per 2020 metus sudeginta 21 041,4 t kietojo biokuro ir 702 522 m³ gamtinių dujų. Deginant biokurą (grynoji šiluminė vertė 10,86 GJ/t) ir gamtines dujas (grynoji šiluminė vertė 38,89 GJ/1000 m³) pagamintas šiluminės energijos kiekis apskaičiuojamas, pagal metodikoje pateiktą 9 formulę. Deginant biokurą, pagaminta 56 492 MWh šiluminės energijos ir deginant gamtines dujas, pagaminta 7 179 MWh šiluminės energijos.

Pagal sudarytus medžiagų ir energijos srautus nustatyti pagrindiniai CH₄ emisijų sukėlkliai:

- Biokuro deginimas;
- Gamtinių dujų deginimas;
- LPG sunaudojimas;
- Benzino sunaudojimas;
- Dyzelino sunaudojimas;

- Netiesioginės emisijos dėl nuotėkių gamtinių dujų paskirstymo tinkluose.



3.3 pav. PKP katilinės veiklos pagrindiniai medžiagų ir energijos srautai, vnt./m.

Oro taršos ir ŠESD, t.t. CH₄ vertinimas

Dėl kuro deginimo atliekamiems skaičiavimams bus naudojamos Lietuvoje taikomos žemutinės kuro šilumingumo vertės pagal Lietuvos NIR iš 2.2 lentelės. Emisijų faktoriams bus naudojamos IPCC 2006 metų gairėse pateikti duomenys [40].

Išlakos (CO, NO_x, KD, SO_x) į aplinkos orą iš PKP katilinės apskaičiuojamos pagal tyrimo metodikoje pateiktą 10 formulę:

Oro teršalai kure susidaro PKP katilinėje deginant gamtines dujas:

- $E_{NO_x} = 702,522 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 74 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 1,798 \text{ t/m.};$
- $E_{CO} = 702,522 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 29 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,704 \text{ t/m.};$
- $E_{SO_x} = 702,522 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 0,67 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,016 \text{ t/m.};$
- $E_{KD} = 702,522 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 0,78 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,019 \text{ t/m.}$

Oro teršalai kure susidaro PKP katilinėje deginant kietąjį biokurą:

- $E_{NO_x} = 21041,4 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 91 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 29,870 \text{ t/m.};$
- $E_{CO} = 21041,4 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 570 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 187,100 \text{ t/m.};$
- $E_{SO_x} = 21041,4 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 11 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 3,611 \text{ t/m.};$
- $E_{KD} = 21041,4 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 163 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 53,504 \text{ t/m. (iki valymo);}$
- $KD = 53,504 \text{ t/m.} \times (1 - 0.85) = 8,026 \text{ t/m. (po valymo).}$

Kadangi 62 % pagamintos šiluminės energijos sunaudojama PKP reikmėms, vertiname, kad 62 % šių oro teršalų susidaro dėl PKP pagrindinės veiklos – produktų iš surimio gamybos: NO_x – 19,634 t/m., CO – 116,438 t/m., SO_x – 2,249 t/m., KD – 4,988 t/m.

CH₄ įmonėje tiesiogiai susidaro dėl deginamo kuro katilinėje (biokuras ir gamtinės dujos) ir deginant kurą mobiliuose taršos šaltiniuose. Netiesioginis poveikis klimato kaitai dėl CH₄ vertinamas dėl gamtinių dujų nuotėkių skirstymo tinkluose.

Tiesioginiam CH₄ susidarymui dėl kuro deginimo įmonėje apskaičiuoti naudojama tyrimo metodikoje pateikta 3 formulė:

CH₄ emisijos, kurios susidaro PKP katilinėje deginant kurą:

- $E_{CH_4, \text{gamtinės dujos}} = 702,522 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 0,034577 \text{ TJ/tūkst. nm}^3 \times 1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,024 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $E_{CH_4, \text{biokuras}} = 21041,4 \text{ t/m.} \times 0,0156 \text{ TJ/t} \times 30 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 9,847 \text{ t CH}_4/\text{m.}$

CH₄ emisijos, kurios susidaro dėl degalų deginimo PKP autotransporto vidaus degimo varikiuose:

- $E_{CH_4, \text{benzinas}} = 16,3 \text{ t/m.} \times 0,04391 \text{ TJ/t} \times 3,8 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,003 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $E_{CH_4, \text{dyzelinis kuras}} = 42,6 \text{ t/m.} \times 0,04291 \text{ TJ/t} \times 3,9 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,007 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $E_{CH_4, \text{dujos}} = 59,8 \text{ t/m.} \times 0,04579 \text{ TJ/t} \times 62 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,170 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $E_{CH_4, \text{kuras}} = 0,024 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 9,847 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 0,003 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 0,007 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 0,170 \text{ t CH}_4/\text{m.} = 10,051 \text{ t CH}_4/\text{m.}$

Įvertinti netiesiogines CH₄ emisijas dėl nuotėkių skirstymo tinkluose naudojama metodikoje pateikta 6 formulė. Pagal Ignitis grupės 2020 metų metinį pranešimą ESO gamtinių dujų skirstymo technologinių sąnaudų rodiklis 2020 metais buvo 2,2 % [47]. Pagal 2025 Lietuvos NIR duomenis CH₄ procentinė dalis gamtinėse dujose 2020 metais 95,17 %, gamtinių dujų tankis 0,7 kg/m³ [15].

$$E_{CH_4, \text{paskirstymas}} = 702522 \text{ m}^3/\text{m.} \times 0,022 \times 0,9517 \times 0,7 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-3} = 10,296 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

Bendras įrenginyje išmetamo CH₄ kiekis apskaičiuojamas sudedant tiesiogines ir netiesiogines emisijas pagal metodikoje pateiktą 1 formulę:

$$E_{CH_4, \text{bendras}} = 10,051 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 10,296 \text{ t CH}_4/\text{m.} = 20,347 \text{ t CH}_4/\text{m.}$$

Norint įvertinti CH₄ poveikį aplinkai CH₄ emisijos perskaičiuojamos į CO₂ ekvivalentą. CH₄ emisijų perskaičiavimui į CO_{2e} naudojamas 100 metų visuotinio atšilimo potencialas (GWE100 = 28), remiantis IPCC AR5 vertinimo ataskaita [48].

$$GWE_{CH_4} = 20,347 \text{ t CH}_4 \times 28 = 569,716 \text{ t CO}_{2e}.$$

Kitos ŠESD, kurios susidaro PKP dėl kuro deginimo ir šaldalų naudojimo (CO₂ ir N₂O) apskaičiuojamos pagal 16 metodikos formulę:

Dėl biokuro deginimo:

- $E_{CO_2} = 328,246 \text{ TJ/m.} \times 104100 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 34170,39 \text{ t CO}_2/\text{m.}$ (biogeninės kilmės);
- $E_{N_2O} = 328,246 \text{ TJ/m.} \times 4 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 1,313 \text{ t N}_2\text{O}/\text{m.}$

Dėl gamtinių dujų deginimo:

- $E_{CO_2} = 24,291 \text{ TJ/m.} \times 55590 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 1350,34 \text{ t CO}_2/\text{m.};$

$$- E_{N_2O} = 24,291 \text{ TJ/m.} \times 0,1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0024 \text{ t N}_2\text{O/m.}$$

Dėl benzino deginimo:

$$- E_{CO_2} = 0,7157 \text{ TJ/m.} \times 70030 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 50,12 \text{ t CO}_2\text{/m.};$$

$$- E_{N_2O} = 0,7157 \text{ TJ/m.} \times 8 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0057 \text{ t N}_2\text{O/m.}$$

Dėl dyzelino deginimo:

$$- E_{CO_2} = 1,8277 \text{ TJ/m.} \times 72950 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 133,35 \text{ t CO}_2\text{/m.};$$

$$- E_{N_2O} = 1,8277 \text{ TJ/m.} \times 3,9 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0071 \text{ t N}_2\text{O/m.}$$

Dėl LPG deginimo:

$$- E_{CO_2} = 2,7372 \text{ TJ/m.} \times 66440 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 181,93 \text{ t CO}_2\text{/m.};$$

$$- E_{N_2O} = 2,7372 \text{ TJ/m.} \times 4 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,01 \text{ t N}_2\text{O/m.}$$

Dėl freono R407f naudojimo:

$$E_{CO_2e,R407F} = 1540 \text{ kg/m.} \times 1622 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} \times 10^{-3} = 2497,88 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Dėl elektros energijos vartojimo gamybinėse ir administracijos patalpose:

$$E_{CO_2e,elektra} = 19574,4 \text{ MWh} \times 420 \text{ kg CO}_2\text{e/MWh} \times 10^{-3} = 8,221 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Dėl elektros energijos vartojimo katilinėje:

$$E_{CO_2e,elektra} = 635,9 \text{ MWh} \times 420 \text{ kg CO}_2\text{e/MWh} \times 10^{-3} = 267,078 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Bendras įrenginio poveikis klimato kaitai, neįskaitant biogeninės kilmės CO₂, apskaičiuojamas pagal 17 metodikos formulę:

$$- GWE_{\text{ŠESD}} = 4213,62 \text{ t CO}_2 + 28 \times 20,347 \text{ t CH}_4 + 265 \times 1,338 \text{ t N}_2\text{O} = 5137,906 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Kai buvo minėta, PKP tiesioginei veiklai priskiriama 62 % visų ŠESD, kurie susidaro dėl katilinės veiklos:

$$- E_{CO_2} = 22022,8526 \text{ t/m.}, \text{ iš biogeninės kilmės} - 21185,642 \text{ t/m.}$$

$$- E_{N_2O} = 0,8155 \text{ t/m.}$$

$$- E_{CH_4} = 6,12 \text{ t/m.}$$

$$- GWE_{\text{ŠESD}} = 837,2108 \text{ t CO}_2 + 28 \times 6,12 \text{ t CH}_4 + 265 \times 0,8155 \text{ t N}_2\text{O} = 1224,678 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

$$- \text{Netiesioginis poveikis dėl elektros energijos sąnaudų katilinėje: } 165,588 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Išsamiam esamo įrenginio ir planuojamų pasiūlymų aplinkosauginio veiksmingumo įvertinimui yra lyginami santykiniai aplinkos apsaugos indikatoriai (AAI_s), kurie apskaičiuojami pagal metodikoje pateiktą 11 formulę. Rezultatai pateikti 3.3 ir 3.4 lentelėse.

3.3 lentelė. PKP veiklos pagrindiniai aplinkos apsaugos indikatoriai, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms

Proceso įvediniai ir išvediniai	Matavimo vienetas	AAI, vnt./m.	¹ AAIs, vnt./G
Įvediniai			
Žaliavos	t	36393	0,946
Vanduo	m ³	274614,32	7,14
Elektros energija	MWh	19968,32	0,519

Proceso įvediniai ir išvediniai	Matavimo vienetas	AAI, vnt./m.	¹ AAIs, vnt./G
Gamtinės dujos (62 %)	m ³	435563,64	11.326
Kietasis biokuras (62 %)	t	13045,668	0.339
Freonas (R407f)	kg	1540	0,040
Išvediniai			
Atliekos	t	2168	0,056
ŠGP	t	4816	0,125
Nuotekos	m ³	213752,5	5,558
Oro tarša (CO, NO _x , KD, SO _x)	t	143,22	0,004
Tiesioginės ŠESD:			
CH ₄	kg	6300,02	0,164
CO ₂	t	3866,10	0,101
N ₂ O	kg	811,79	0,021
Netiesioginės ŠESD:			
Dėl nuotėkių skirstymo tinkluose	kg CH ₄	6383,52	0,166
Dėl elektros energijos	t CO _{2e}	8386,69	0,218
GWE _{CH₄}	kg CO _{2e}	355139,12	9,234
GWE _{ŠESD}	t CO _{2e}	12817,29	0,333

¹Pastaba: gamybos apimtys analizuojamu laikotarpiu siekė 38458 t/m.

3.4 lentelė. PKP katilinės pagrindiniai aplinkos apsaugos indikatoriai

Proceso įvediniai ir išvediniai	Matavimo vienetas	AAI, vnt./m.	¹ AAIs, vnt./G
Įvediniai			
Biokuras	t	21041	0.330
Gamtinės dujos	m ³	702522	11.034
Elektros energija	MWh	636	0.010
Vanduo	m ³	147586	2.318
Cheminiai priedai	kg	58300	0.916
Išvediniai			
Pelenai	t	152	0.002
Nuotekos	m ³	70175	1.102
Oro tarša (CO, NO _x , KD, SO _x)	t	231	0.004
Tiesioginės ŠESD:			
CH ₄	kg	9871	0,155
CO ₂	t	1617,42	0,025
N ₂ O	kg	1315	0,021
Netiesioginės ŠESD:			
CH ₄ dėl gamtinių dujų nuotėkių	kg	10296	0,162
Dėl elektros energijos	t CO _{2e}	267,08	0,004
GWE _{CH₄}	kg CO _{2e}	564676	8.869
GWE _{ŠESD}	t CO _{2e}	2797,65	0,044

¹**Pastaba:** šiluminės energijos gamybos apimtys PKP katilinėje analizuojamu laikotarpiu siekė – 63671 MWh/m.

Analizuojant PKP aplinkos apsaugos indikatorius atskirai be katilinės ir tik katilinės veiklą, matyti, kad didžiausias poveikis CH₄ emisijų susidarymui yra susijęs būtent su energijos gamybos procesu. Vertinant bendrus PKP rodiklius, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms, vienai tonai produkcijos pagaminti suvartojama 0,519 MWh elektros energijos, 7,14 m³ vandens, sudeginama 0,339 t kietojo biokuro ir 11,326 m³ gamtinių dujų bei patiriama 0,04 kg freono nuostolių. Taip pat vienai tonai produkcijos pagaminti susidaro 5,558 m³ nuotekų, 0,056 t atliekų ir 0,125 t šalutinių gyvūninių produktų. Dėl gamybos veiklos vertinant tiesiogines ir netiesiogines CH₄ emisijas, poveikis klimato kaitai vienai tonai produkcijos pagaminti siekė 9,085 kg CO₂e.

PKP katilinės AAI_s analizė rodo, kad energijos gamybos procese vienai MWh šilumos energijos pagaminti sunaudojama 0,33 t biokuro, 11,034 m³ gamtinių dujų ir 0,01 MWh elektros energijos. Šie energijos ištekliai tiesiogiai susiję su šiltnamio efektą sukeliančių dujų, ypač CH₄, susidarymu. Didžiausias CH₄ emisijų kiekis nustatytas būtent katilinės veikloje. Tiesioginės CH₄ emisijos sudarė 9 871 kg per metus, o netiesioginės emisijos, susijusios su gamtinių dujų nuotėkiais paskirstymo tinkluose, papildomai siekė 10 296 kg. Katilinės veikloje susidarančios CH₄ emisijos sudarė apie 99 % nuo visų įmonės CH₄ emisijų arba 0,162 kg CH₄/MWh šilumos energijos pagaminti. Bendras katilinės sukeltas poveikis klimato kaitai sudarė 2 797,65 t CO₂e per metus arba 0,044 t CO₂e/MWh šilumos energijos pagaminti.

Rezultatai rodo, kad pagrindinis CH₄ emisijų šaltinis PKP veikloje yra kuro deginimas garo katilinėje. Reikšmingiausią įtaką daro kietojo biokuro deginimo procesas (97,97 % nuo visų tiesioginių CH₄). Bet dėl gamtinių dujų deginimo atsiranda netiesioginis poveikis – dėl jų nuotėkių tiekimo ir skirstymo tinkluose (50,60 % nuo visų PKP tiesioginių ir netiesioginių CH₄). Todėl CH₄ emisijų mažinimo priemonės pirmiausia turėtų būti orientuotos į katilinės efektyvumo didinimą, kuro sąnaudų mažinimą ir energijos gamybos procesų optimizavimą.

Siekiant sumažinti nustatytas CH₄ emisijas, siūlomos kelios tikslinės priemonės:

- Pirmoji priemonė – dūmų kondensacinio ekonomizerio (DKE) įrengimas biokuro katilinėje, leidžiantis susigrąžinti dalį šilumos iš dūmų ir padidinti katilo naudingumo koeficientą. Tai tiesiogiai mažintų kuro poreikį tam pačiam šilumos kiekiui pagaminti, o kartu ir su degimo procesu susijusias CH₄ emisijas.
- Antroji priemonė – atliekamos šilumos susigrąžinimas iš nuotekų, panaudojant šilumos siurblius „vanduo – vanduo“. Ši priemonė mažintų šilumos gamybos poreikį, dėl to sumažėtų gamtinių dujų suvartojimas ir su jų tiekimu bei deginimu susijusios netiesioginės CH₄ emisijos.
- Trečioji priemonė – skaitmeninio dvynio (angl. – digital twin) įdiegimas katilinių valdymui. Tai leistų realiu laiku optimizuoti degimo procesus, apkrovų paskirstymą ir energijos gamybos režimus. Taip sumažėtų nepilno degimo atvejų skaičius, perteklinis kuro naudojimas ir sisteminis neefektyvumas, kurie lemia papildomas CH₄ emisijas.
- Gamyboje naudojamo vandens pašildymui iki 50 °C vietoje garo naudoti siūlomomis priemonėmis atgautą atliekamąją šilumos energiją.

3.2. Dūmų kondensacinio ekonomizerio įdiegimo PKP katilinėje įvykdomumo analizė

PKP biokuro katilinė šilumos gamybai naudoja 21 041,4 t biokuro per metus, o katilo naudingumo koeficientas siekia 89 %. Esant tokiam efektyvumui, dalis šiluminės energijos prarandama su dūmais, ypač dėl juose esančių vandens garų latentinių šilumos nuostolių, kurie nėra išnaudojami esamoje sistemoje. Tai lemia didesnes kuro sąnaudas tam pačiam šilumos kiekiui pagaminti ir netiesiogiai didina su kuro deginimu susijusias CH₄ emisijas.

Techninis vertinimas

Siekiant padidinti energijos gamybos efektyvumą, siūloma įrengti kondensacinį dūmų ekonomizerį (KDE). Vertinant tai, kad vidutinė PKP biokuro katilo išeinančių dūmų temperatūra svyruoja tarp 150–160 °C, tai sudaro idealias galimybes išnaudoti KDE atliekamos šilumos panaudojimui. Dabartinis biokuro katilo „Jarforsen“ naudingumo koeficientas siekia 89 %, KDE padidinti katilo naudingumo koeficientą 10–15 %. Teoriškai manoma, kad įrenginio įdiegimas katilui leistų pasiekti iki 99–100 % efektyvumą. Tokiu būdu būtų sumažinamas biokuro poreikis tam pačiam kiekiui šilumos energijos pagaminti, mažinami energijos nuostoliai bei su degimo procesu susijusios emisijos, įskaitant metaną.

PKP šiuo metu karšto vandens paruošimui gamybinėms reikmėms tiesiogiai naudoja katilinėje generuojamą garą. Pagal vidinę įmonės apskaitą 125 332 m³ karšto vandens paruošti yra sunaudojama 6 437,363 MWh šiluminės energijos. KDE surinkta šiluma galėtų būti panaudojama įrangos ir cechų plovimo vandenų paruošimui ir katilinės papildymo vandens temperatūros pakėlimui nuo 12 iki 50 °C. Karšto vandens gamybos reikmėms temperatūros pakėlimui nuo 12 iki 50 °C reikalingas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal metodikos 14 formulę:

$$Q = 4,18 \text{ KJ/(kg } ^\circ\text{C)} \times 125332000 \text{ kg} \times (50 \text{ } ^\circ\text{C} - 12 \text{ } ^\circ\text{C}) \times 10^{-6} = 19907,734 \text{ GJ/m.} \approx 5529,926 \text{ MWh/m.}$$

Gaminant karštą vandenį nenaudojant garo būtų galima sutaupyti 907,437 MWh šilumos energijos. Naudojant iš KDE atgaunamą šilumos energiją 115 535 m³ (9797 m³ žr. 3.3 sk.) karšto vandens paruošimui per metus būtų galima sutaupyti 836,504 MWh šilumos energijos per metus, kurios nereikės gaminti naudojant gamtines dujas.

Aplinkosauginis įvertinimas

3.5 lentelėje atvaizduojamos sąnaudos prieš ir po inovacijos įdiegimo bei apskaičiuojamas sutaupymas įdiegus inovaciją. Reikiamo biokuro kiekiui įvertinti norint pagaminti 56 492 MWh šilumos energijos, jeigu KDĮ naudingumo koeficientas iki 99 %, apskaičiuojamas pagal metodikos 12 formulę:

$$B = 56492 \text{ MWh} \times 3,6 / (10,86 \text{ GJ/t} \times 0,99) = 18\,915,78 \text{ t/m.}$$

Įgyvendinus projektą, šiluminės energijos gamybos apimtis išlieka nepakitusi ir siekia 56 492 MWh per metus, tačiau pasiekiami reikšmingi pokyčiai kuro ir energijos naudojimo bei aplinkosauginių rodiklių srityje. Dėl didesnio įrenginių naudingumo koeficiento sumažėja biokuro poreikis – nuo 21 041,4 t per metus iki 18 915,78 t per metus, tai atitinka apie 9 211 MWh mažesnę energijos kiekį.

Oro teršalų sumažėjimas dėl deginamo biokuro kiekio sumažėjimo vertinamas pagal 10 metodikos formulę:

- $E_{NO_x} = 18915,78 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 91 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 26,845 \text{ t/m.};$
- $E_{CO} = 18915,78 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 570 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 168,050 \text{ t/m.};$
- $E_{SO_x} = 18915,78 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 11 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 3,247 \text{ t/m.};$
- $E_{KD} = 18915,78 \text{ t/m.} \times 15,6 \text{ GJ/t} \times 163 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 48,101 \text{ t/m. (iki valymo);}$
- $KD = 48,101 \text{ t/m.} \times (1 - 0,85) = 7,215 \text{ t/m. (po valymo).}$

CH₄ išmetimai į aplinkos dėl biokuro deginimo apskaičiuojami pagal 3 metodikos formulę:

- $E_{CH_4, \text{ biokuras}} = 18915,78 \text{ t/m.} \times 0,0156 \text{ TJ/t} \times 30 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 8,853 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $GWE_{CH_4} = 8,853 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 247,88 \text{ t CO}_2\text{e.}$

CO₂ ir N₂O emisijos dėl biokuro deginimo įrenginyje apskaičiuojamos pagal 16 metodikos formulę:

- $E_{CO_2} = 295,09 \text{ TJ/m.} \times 104100 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 30718,47 \text{ t CO}_2/\text{m. (biogeninės kilmės);}$
- $E_{N_2O} = 295,09 \text{ TJ/m.} \times 4 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 1,18 \text{ t N}_2\text{O/m.}$

Netiesioginės CO₂ emisijos dėl elektros vartojimo katilinėje apskaičiuojamos pagal metodikos 16 formulę:

$$E_{CO_2, \text{ elektra}} = (814,94 \text{ MWh} \times 420 \text{ kg CO}_2\text{e/MWh}) \times 10^{-3} = 342,27 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Bendras įrenginio poveikis klimato kaitai, neįskaitant biogeninės kilmės CO₂, apskaičiuojamas pagal 17 metodikos formulę:

$$GWE_{\text{šESD}} = 342,27 \text{ CO}_2 + 28 \times 8,853 \text{ CH}_4/\text{m} + 265 \times 1,18 \text{ N}_2\text{O/m.} = 902,85 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

3.5 lentelė. Kondensacinio dūmų ekonomizaizerio įdiegimo aplinkosauginis ir ekonominis vertinimas

Įvediniai ir išvediniai	Vnt.	Absoliutūs aplinkosaugos indikatoriai (AAI)		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)		
		Prieš projekto įdiegimą	Po projekto įdiegimo			
		Vnt./m.	Vnt./m.	Vnt./m.	*EUR/vnt.	EUR/m.
Šiluminės energijos gamyba deginant kietąjį biokurą	MWh	56492	56492	0	-	-
Elektros energijos sąnaudos	MWh	635,90	814,94	-179,04	107,00	-19 157,28
Katilo n.k.	%	89	99	10	-	-
Biokuras	t	21041,4	18915,78	2125,62	108,00	229 556,96
Papildomos cheminės medžiagos	t	0	2,39	-2,39	3 400,00	-8 126,00
Pelenai	t	152	136,64	15,36	0,00	0,00
Išlakos į aplinkos orą:	t					
CO		187,1	168,05	19,05		
NO _x		29,87	26,85	3,02		
KD		8,026	7,22	0,806		
SO _x		3,61	3,247	0,363		

Įvediniai ir išvediniai	Vnt.	Absoliutūs aplinkosaugos indikatoriai (AAI)		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)		
		Prieš projekto įdiegimą	Po projekto įdiegimo			
		Vnt./m.	Vnt./m.	Vnt./m.	*EUR/vnt.	EUR/m.
Tiesioginės ŠESD: CH ₄ CO ₂ (biogeninės kilmės) N ₂ O	t	9,85 34170,39 1,31	8,85 30718,47 1,18	0,99 3451,92 0,13	–	–
Netiesioginės ŠESD dėl elektros	t CO ₂ e	267,08	342,27	-75,20		
GWE dėl CH ₄ GWE _{ŠESD}	t CO ₂ e	275,72 889,95	247,88 902,85	27,84 -12,90	–	–
Planuojama sutaupyti, įdiegus inovaciją, EUR/m.:						202 273,68

Pastaba: *2025 m. kainos, Eur be PVM

Karšto vandens ruošimui naudojant atgaunamą šilumos energiją bus galima negaminti 836,5 MWh šilumos energijos gamtinių dujų katilinėje. Aplinkosauginio vertinimo rezultatai dėl šilumos energijos sutaupymo pavaizduoti 3.6 lentelėje. Gamtinių dujų kiekis reikalingas pagaminti 836,5 MWh šiluminės energijos apskaičiuojamas naudojant 12 formulę:

$$B = (836,5 \text{ MWh} \times 3,6) / (34,557 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 0,946) = 90,12 \text{ tūkst. m}^3$$

Dėl sumažinamo gamtinių dujų naudojimo bus pagerinami aplinkosauginiai rodikliai. Oro teršalų išmetimai po inovacijos įdiegimo apskaičiuojami naudojant metodikoje nurodytą 10 formulę:

- $E_{\text{NO}_x} = 612,402 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 74 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 1,567 \text{ t/m.};$
- $E_{\text{CO}} = 612,402 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 29 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,614 \text{ t/m.};$
- $E_{\text{SO}_x} = 612,402 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 0,67 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,014 \text{ t/m.};$
- $E_{\text{KD}} = 612,402 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. nm}^3 \times 0,78 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,017 \text{ t/m.}$

Tiesioginiai CH₄ išmetimai į aplinkos orą dėl sumažinamo gamtinių dujų naudojimo apskaičiuojami pagal 3 metodikos formulę:

- $E_{\text{CH}_4, \text{ gamtinės dujos}} = 612,402 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 0,034577 \text{ TJ/tūkst. nm}^3 \times 1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,021 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $\text{GWE}_{\text{CH}_4} = 0,021 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 0,588 \text{ t CO}_2\text{e.}$

Dėl sumažinamo deginamo gamtinių dujų kiekio sumažės ir netiesioginės CH₄ emisijos dėl nuotėkių skirstymo tinkluose. Netiesioginių CH₄ emisijų kiekis skirstymo tinkluose apskaičiuojamas pagal 6 metodikos formulę:

- $E_{\text{CH}_4, \text{ paskirstymas}} = 612402 \text{ m}^3/\text{m.} \times 0,022 \times 0,9517 \times 0,7 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-3} = 8,98 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $\text{GWE}_{\text{CH}_4} = 8,98 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 251,44 \text{ t CO}_2\text{e.}$

Bendras tiesioginių ir netiesioginių CH₄ emisijų kiekis dėl dujinės katilinės veiklos apskaičiuojamas pagal metodikoje pateiktą 1 formulę:

- $E_{CH_4, bendras} = 0,021 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 8,98 \text{ t CH}_4/\text{m.} = 9,001 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $GWE_{CH_4} = 9,001 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 252,028 \text{ t CO}_2\text{e.}$

CO₂ ir N₂O emisijos susidarantys dėl gamtinių dujų deginimo įrenginyje apskaičiuojamos pagal 16 metodikos formulę:

- $E_{CO_2} = 21,175 \text{ TJ}/\text{m.} \times 55590 \text{ kg}/\text{TJ} \times 10^{-3} = 1177,62 \text{ t CO}_2/\text{m.};$
- $E_{N_2O} = 21,175 \text{ TJ}/\text{m.} \times 0,1 \text{ kg}/\text{TJ} \times 10^{-3} = 0,0021 \text{ t N}_2\text{O}/\text{m.}$

Bendras įrenginio poveikis klimato kaitai apskaičiuojamas pagal 17 metodikos formulę:

$$GWE_{\text{ŠESD}} = 1177,62 \text{ CO}_2 + 28 \times 9,001 \text{ t CH}_4/\text{m} + 265 \times 0,0021 \text{ t N}_2\text{O}/\text{m.} + 267,08 \text{ t CO}_2\text{e} = 1697,285 \text{ t CO}_2\text{e}/\text{m.}$$

3.6 lentelė. Dujinės katilinės, po gamtinių dujų sąnaudų sumažėjimo, aplinkosauginis ir ekonominis vertinimas

Įvediniai ir išvediniai	Vnt.	Absoliutūs aplinkosaugos indikatoriai (AAI)		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)		
		Prieš projekto įdiegimą	Po projekto įdiegimo			
		Vnt./m.	Vnt./m.	Vnt./m.	*EUR/vnt.	EUR/m.
Šiluminės energijos gamyba deginant gamtines dujas	MWh	7179	6342,5	836,5	–	–
Gamtinės dujos	m ³	702522	612402	90120	–	–
	MWh	6747,583	5881,998	865,58	53,00	45875,98
Elektros energija	MWh	635,9	635,9	0	107,00	0,00
Išlankos į aplinkos orą:	t				–	–
CO		0,704	0,614	0,09		
NO _x		1,798	1,567	0,231		
KD		0,019	0,017	0,002		
SO _x		0,016	0,014	0,002		
Tiesioginės ŠESD:					–	–
CH ₄	t	0,024	0,021	0,003		
CO ₂	t	1350,34	1172,62	177,72		
N ₂ O	kg	2,4	2,1	0,3		
Netiesioginės ŠESD:					–	–
CH ₄ dėl dujų nuotėkių	t	10,296	8,98	1,316		
dėl elektros energijos	t CO ₂ e	267,08	267,08	0		
GWE dėl CH ₄	t CO ₂ e	288,96	252,08	36,88	–	–
GWE _{ŠESD}		1907,01	1697,29	209,72		
Planuojama sutaupyti, EUR/m.:						45875,98

Pastaba: *2025 m. kainos, Eur be PVM

Ekonominis vertinimas

Bendras planuojamas sutaupymas po KDE įdiegimo vertinant ir sumažinamą gamtinių dujų suvartojimą – 248 159,66 EUR/m. Projekto įdiegimo planuojamos investicijos atvaizduotos 3.7 lentelėje. Bendras investicijų dydis – 800 000 EUR.

Siūlomos inovacijos atsipirkimo trukmė apskaičiuojama pagal tyrimo metodikoje pateiktą 13 formulę:

$$AT = 870000 \text{ EUR} / 248159,66 \text{ EUR/m.} = 3,22 \text{ metai}$$

3.7 lentelė. Kondensacinio dūmų ekonomizaizerio inovacijos numatomos investicijos

Įranga, darbai, paslaugos	Dimensija	Vnt.	EUR
Kondensacinis dūmų ekonomizaizeris	Vnt.	1	800 000,00
Kondensato surinkimo ir neutralizavimo sistema	Vnt.	1	
Šilumos panaudojimo sistema	Vnt.	1	
Automatikos ir valdymo sistema	Vnt.	1	
Projektavimas, planavimas ir dokumentacijos paruošimas	Vnt.	1	
Montavimo sistema	Vnt.	1	
Montavimo ir paleidimo–derinimo darbai	Vnt.	1	

Atsižvelgiant į tai, kad investicijų atsiperkamumas artimas 3 metams, projektas vertinamas kaip švaresnės gamybos [41].

3.3. Šiluminės energijos regeneravimo iš nuotekų įvykdomumo įvertinimas

Atliekant Įrenginio aplinkosauginį auditą nustatyta, kad 2020 metais Įrenginyje susidarė 163 324 m³ gamybinių nuotekų. Skaičiuojant, kad Įrenginys dirba 24 valandas per parą ir 361 dieną per metus išskaičiuojama, kad vidutinis nuotekų debitas 5,24 litrų per sekundę. Kadangi gamybinės nuotekos didžiąją dalimi susidaro gamybinių patalpų plovimo metu, nuotekos turi pakankamai aukštą temperatūrą, vidutiniškai 15–20 °C. Kaip priemonę regeneruoti bent dalį nuotekose esančios atliekamos šiluminės energijos, siūlomas kompanijos SHARC sukurtas nuotekų šilumos siurblys prekinio pavadinimu PIRANHA T15. PIRANHA T15 yra integruotas vanduo – vanduo tipo šilumos siurblys, skirtas šilumos energijos atgavimui iš nuotekų ir jos panaudojimui karšto vandens ruošimui bei šildymo poreikiams. Įrenginys tiesiogiai naudoja nuotekas kaip žemos temperatūros šilumos šaltinį, iš kurio šiluma perduodama į šaldymo kontūrą ir vėliau pakeliama iki naudingo temperatūrinio lygio. Įrenginys suprojektuotas kaip kompaktiška, autonominė sistema, kurioje integruoti pagrindiniai šilumos siurblio komponentai, todėl nereikalingas papildomas nuotekų smulkinimas ar išankstinis filtravimas. Nuotekų šilumos siurblio techniniai parametrai ir principinė schema pateikiami 3.8 lentelėje ir 3.4 paveiksluose [48].

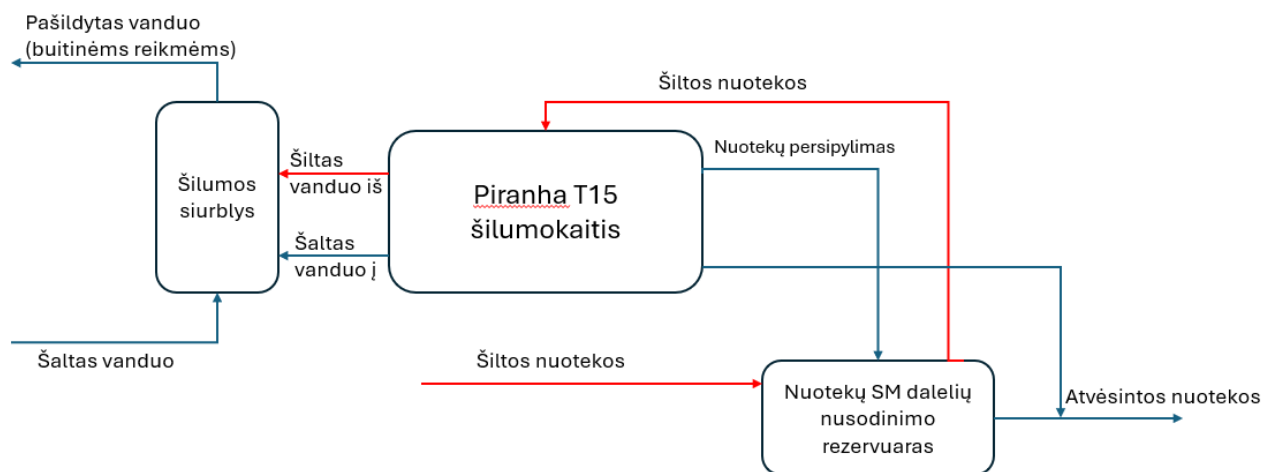
3.8 lentelė. Piranha T15 nuotekų šilumos siurblio techniniai parametrai

Parametras	Dimensija	Reikšmė
Priimamas nuotekų srautas	l/s	6,3
Pagaminamas karštas vanduo	l/s	2,3
Projektinė šildymo galia	kW	52,5

Parametras	Dimensija	Reikšmė
Šaldalo kiekis	kg	11,79
Šilumos siurblio COP	–	3–4

Jeigu įrenginys dirbtų 361 dieną per metus, 24 val./parą, jis sugeneruotų iki 455 MWh/m. šiluminės energijos, kurios neberekėtų gaminti dujinėje katilinėje. Šiluminė energija būtų galima panaudoti pakelti gamybinių patalpų plovimams naudojamo vandens temperatūrą nuo 12 iki 50 °C. Paruošiamo vandens kiekis apskaičiuojamas pagal metodikoje pateiktą 14 formulę:

$$m = (455 \text{ MWh/m} \times 3,6) / (4,18 \text{ KJ/kg } ^\circ\text{C}) \times (50 \text{ } ^\circ\text{C} - 12 \text{ } ^\circ\text{C}) \times 10^{-6} = 9797 \text{ m}^3$$



3.4 pav. Piranha T15 principinė schema

Regeneruojant atliekamą šilumą bus galima pašildyti 9 796.65 m³ vandens naudojamo patalpų plovimui. Pagal apskaičiuotą 3.2 skyriuje vertę galima išskaičiuoti, kad naudojant šilumos siurblių vandens pašildymui vietoje garo bus pašalinamas poreikis gaminti papildomus 71 MWh šilumos energijos. Gamtinių dujų kiekis reikalingas pagaminti 526 MWh šiluminės energijos apskaičiuojamas naudojant 12 formulę:

$$B = (526 \text{ MWh} \times 3,6) / (34,557 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 0,946) = 57,92 \text{ tūkst. m}^3$$

Nuotekų šilumos siurblio įdiegimas leistų sumažinti gamtinių dujų sunaudojimą 57 920 m³ arba 556,31 MWh. Aplinkosauginis ir ekonominis vertinimas pateikiamas 3.9 lentelėje.

Šilumos siurblio elektros energijos sąnaudos pagaminti (regeneruoti) 455 MWh/m. šiluminės energijos, esant COP = 4: 455 MWh_{šil.} / 4 = 113,75 MWh_{el.}

Įdiegus inovaciją tikimasi ne tik gamtinių dujų naudojimo sumažinimo, bet ir pagerinti aplinkosauginius rodiklius. Po inovacijos įdiegimo susidariusių oro teršalų kiekis apskaičiuojamas naudojant metodikoje nurodytą 10 formulę:

- E_{NO_x} = 644,602 tūkst. m³/m. × 34,577 GJ/tūkst. nm³ × 74 g/GJ × 10⁻⁶ = 1,649 t/m.;
- E_{CO} = 644,602 tūkst. m³/m. × 34,577 GJ/tūkst. nm³ × 29 g/GJ × 10⁻⁶ = 0,646 t/m.;
- E_{SO_x} = 644,602 tūkst. m³/m. × 34,577 GJ/tūkst. nm³ × 0,67 g/GJ × 10⁻⁶ = 0,015 t/m.;
- E_{KD} = 644,602 tūkst. m³/m. × 34,577 GJ/tūkst. nm³ × 0,78 g/GJ × 10⁻⁶ = 0,017 t/m.

Tiesioginiai CH₄ išmetimai į aplinkos orą po inovacijos įdiegimo apskaičiuojami pagal 3 metodikos formulę:

- $E_{CH_4, \text{ gamtinės dujos}} = 644,602 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 0,034577 \text{ TJ/tūkst. nm}^3 \times 1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,022 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $GWE_{CH_4} = 0,022 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 0,616 \text{ t CO}_2\text{e.}$

Dėl sumažinamo deginamo gamtinių dujų kiekio sumažės ir netiesioginės CH₄ emisijos dėl nuotėkių skirstymo tinkluose. Netiesioginių CH₄ emisijų kiekis skirstymo tinkluose po inovacijos įdiegimo apskaičiuojamas pagal 6 metodikos formulę:

- $E_{CH_4, \text{ paskirstymas}} = 644602 \text{ m}^3/\text{m.} \times 0,022 \times 0,9517 \times 0,7 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-3} = 9,447 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $GWE_{CH_4} = 9,447 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 264,516 \text{ t CO}_2\text{e.}$

3.9 lentelė. Nuotekų šilumos siurblio aplinkosauginio ir ekonominio vertinimo rezultatai

Įvediniai ir išvediniai	Vnt.	Absoliutūs aplinkosaugos indikatoriai (AAI)		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)			
		Prieš projekto įdiegimą	Po projekto įdiegimo				
		Vnt./m.	Vnt./m.	Vnt./m.	EUR/vnt.	EUR/m.	
Šiluminės energijos gamyba deginant gamtines dujas	MWh	7179	6653	526	-	-	
Šiluminė energija atgauta iš nuotekų	MWh	0	455	-455	-	-	
Elektros energijos sąnaudos šilumos gamybai ¹	MWh	635,90	749,65	-113,75	107,00	-12 171,25	
Gamtinės dujos	tūkst. m ³	702,522	644,602	57,92	-	-	
	MWh	6747,583	6191,273	556,31	53,00	29484,43	
Išlakos į aplinkos orą	t				-	-	
	CO	0,704	0,646	0,058			
	NOx	1,798	1,649	0,149			
	KD	0,019	0,017	0,002			
	SOx	0,016	0,015	0,001			
Tiesioginės ŠESD:					-	-	
	CH ₄	t	0,024	0,022	0,002		
	CO ₂	t	1350,34	1239,59	110,75		
	N ₂ O	kg	2,4	2,2	0,2		
Netiesioginės ŠESD:					-	-	
	CH ₄ dėl dujų nuotėkių dėl elektros vartojimo	t	10,296	9,447	0,849		
		t CO ₂ e	267,08	314,85	-47,78		
GWE _{CH₄}	t CO ₂ e	288,96	265,132	23,828	-	-	
GWE _{ŠESD}		1907,01	1820,158	86,856			
Planuojama sutaupyti, įdiegus inovaciją, EUR/m.						17 313,18	

Pastaba: *2025 m. kainos, Eur be PVM

Bendras tiesioginių ir netiesioginių CH₄ emisijų kiekis dėl dujinės katilinės veiklos po inovacijos įdiegimo apskaičiuojamas pagal metodikoje pateiktą 1 formulę:

- $E_{CH_4, bendras} = 0,022 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 9,447 \text{ t CH}_4/\text{m.} = 9,469 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $GWE_{CH_4} = 9,469 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 265,132 \text{ t CO}_2\text{e.}$

CO₂ ir N₂O emisijos susidarantys dėl gamtinių dujų deginimo įrenginyje apskaičiuojamos pagal 16 metodikos formulę:

- $E_{CO_2} = 22,288 \text{ TJ/m.} \times 55590 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 1239,59 \text{ t CO}_2/\text{m.};$
- $E_{N_2O} = 22,288 \text{ TJ/m.} \times 0,1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0022 \text{ t N}_2\text{O/m.}$

Netiesioginės CO₂ emisijos dėl elektros vartojimo katilinėje apskaičiuojamos pagal metodikos 16 formulę:

$$E_{CO_2e, elektra} = (749,65 \text{ MWh} \times 420 \text{ kg CO}_2\text{e/MWh}) \times 10^{-3} = 314,85 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Bendras įrenginio poveikis klimato kaitai, neįskaitant biogeninės kilmės CO₂, apskaičiuojamas pagal 17 metodikos formulę:

$$GWE_{\text{ESD}} = 1239,59 \text{ CO}_2 + 28 \times 9,469 \text{ t CH}_4/\text{m} + 265 \times 0,0022 \text{ t N}_2\text{O/m.} + 314,85 \text{ t CO}_2\text{e} = 1820,16 \text{ t CO}_2\text{e/m.}$$

Investicijos į PIRANHA T15 tipo sprendimą gali svyruoti apie 70 000–120 000 EUR, priklausomai nuo projekto sudėtingumo. Tolimesniuose skaičiavimuose taikoma konservatyvi 70 000 € investicija. Projekto įdiegimo planuojamos investicijos atvaizduotos 3.10 lentelėje.

3.10 lentelė. Nuotekų šilumos siurblio numatomos investicijos

Įranga, darbai, paslaugos	Dimensija	Vnt.	EUR
Nuotekų šilumos siurblys Piranha T15	Vnt.	1	70 000,00
Montavimo ir paleidimo darbai	Vnt.	1	

Siūlomos inovacijos atsipirkimo trukmė apskaičiuojama pagal tyrimo metodikoje pateiktą 13 formulę:

$$AT = 70000 \text{ EUR} / 17313,18 \text{ EUR/m.} = 4,04 \text{ metai.}$$

Atsižvelgiant į tai, kad investicijų atsipirkimo trukmė daugiau negu 3 metai, inovacija negali būti vertinama kaip ŠG projektas tačiau vertinant, kad investicijos suma neviršija 100 000 EUR siūloma inovaciją diegti. Pažymėtina, kad galutinis ekonominis efektas yra jautrus elektros energijos ir gamtinių dujų kainų pokyčiams. Inovacijos rizika būtų ženkliai mažinama, jeigu įmonė pati gamintų elektros energiją iš AEI.

3.4. Skaitmeninio dvynio įdiegimo katilinių valdymui įvykdomumo įvertinimas

PKP biokuro katilinės eksploatacija daugiausia grindžiama operatorių patirtimi ir ribotu realaus laiko parametrų išnaudojimu, todėl katilo darbas ne visada vykdomas optimaliomis sąlygomis. Net esant 89 % naudingumo koeficientui, išlieka reikšmingas potencialas efektyvumui didinti per tikslesnį degimo proceso valdymą, kuro ir oro santykio optimizavimą bei apkrovos svyravimų mažinimą. Skaitmeninio dvynio technologijos diegimas leistų sukurti virtualų katilo modelį, kuris, remdamasis realaus laiko duomenimis, nuolat analizuotų sistemos veikimą, prognozuotų darbo režimų pokyčius ir identifikuotų neefektyvumo zonas.

Techninis vertinimas

Skaitmeninio dvynio įdiegimo techninis vertinimas grindžiamas esamos katilinės valdymo praktikos ir siūlomo sprendimo funkcinių galimybių palyginimu. Esamu režimu biokuro katilo darbas valdomas remiantis SCADA sistemoje pateikiamais momentiniais technologiniais parametrais, tokiais kaip deguonies koncentracija dūmuose, dūmų temperatūra, garo slėgis ar tinklo temperatūra. Operatoriai, vadovaudamiesi šiais rodikliais ir sukaupta patirtimi, koreguoja kuro padavimą, pirminio ir antrinio oro kiekius bei trauką. Toks valdymo principas yra iš esmės reaktyvus, nes sprendimai priimami reaguojant į jau įvykusius parametrų pokyčius, o ne prognozuojant proceso eigą, todėl ne visada užtikrinamas optimalus oro ir kuro santykis, didėja šilumos nuostoliai su dūmais, o katilo darbas gali svyruoti nuo optimalaus režimo.

Skaitmeninio dvynio koncepcija energetikos įrenginiuose apibrėžiama kaip realaus proceso duomenų ir fizikiniais principais pagrįstų modelių integracija, leidžianti realiu laiku atkurti ir prognozuoti įrenginio veikimą. Tokiose sistemose naudojami tiek istoriniai, tiek realaus laiko proceso duomenys, kurie apdorojami taikant filtravimo, agregavimo ir slenkančio laiko lango metodus, leidžiančius nuolat atnaujinti modelio būseną ir vertinti proceso kitimo tendencijas. Be to, pažangiuose sprendimuose taikomi duomenimis grįsti metodai, tokie kaip Bayes'o principu paremti modeliai ar surogatiniai modeliai, leidžiantys prognozuoti sistemos elgseną ir nustatyti optimalius darbo parametrus, atsižvelgiant į proceso neapibrėžtumą [49]. Tokiu būdu skaitmeninis dvynys sudaro prielaidas pereiti nuo reaktyvaus valdymo prie proaktyvaus, kai sprendimai priimami remiantis ne tik esama būsena, bet ir prognozuojama proceso raida.

Siūloma įdiegti inovacija taikant pramoninį UAB „Energy advice“ sprendimą – „DWEEN Boiler“ skaitmeninį dvynį paremta ES – SAS platforma, kuris bus integruotas su esama katilinės SCADA sistema ir naudos jos generuojamus duomenis tolimesnei analizei. Techniniu požiūriu sprendimas veiks kaip papildomas analizės sluoksnis, kuriame realaus laiko duomenys apie kuro padavimą, oro srautus, dūmų temperatūrą, deguonies koncentraciją ir šilumos gamybos parametrus bus nuolat renkami, filtruojami ir transformuojami į išvestinius rodiklius. Remiantis šiais duomenimis, platformoje bus kuriamas katilo skaitmeninis modelis, pagrįstas masės ir energijos balanso principais, leidžiantis apskaičiuoti tokius rodiklius kaip katilo naudingumo koeficientas, oro pertekliaus koeficientas bei šilumos nuostoliai, kurie įprastai nėra tiesiogiai matuojami eksploatacijos metu.

Remiantis modelio rezultatais, sistema identifikuos nuokrypius nuo optimalaus degimo proceso ir nustatys parametrų korekcijas, reikalingas efektyvumui didinti. Praktikoje tai reikš, kad skaitmeninis dvynys teiks rekomendacijas dėl kuro padavimo, pirminio ir antrinio oro paskirstymo bei traukos reguliavimo, siekiant sumažinti perteklinį oro kiekį, sumažinti dūmų temperatūrą ir užtikrinti pilnesnį degimą. Remiantis tiek komercinių sprendimų, tiek mokslinės literatūros duomenimis, skaitmeninio dvynio taikymas biokuro katiluose gali padidinti efektyvumą maždaug 1,5–4,5 % ribose. „Energy advice“ siūlomas skaitmeninis dvynys nurodo galinti padidinti katilo efektyvumą 2–5 %. Siekiant išvengti rezultatų pervertinimo, tolesniuose skaičiavimuose taikoma konservatyvi 2 % efektyvumo padidėjimo prielaida.

Vertinant techninį įgyvendinamumą, tokio sprendimo diegimas yra pagrįstas, kadangi reikiami proceso duomenys jau yra generuojami esamoje katilinės valdymo sistemoje. Pagrindiniai iššūkiai bus susiję su duomenų kokybe, matavimo prietaisų tikslumu bei biokuro savybių variacija, kuri gali turėti įtakos modelio tikslumui.

Aplinkosauginis įvertinimas

Įdiegus „DWEEN Boiler“ skaitmeninį dvynį galima tikėtis 2 % biokuro katilo efektyvumo padidėjimo nuo 89 % iki 91 %. Atliekamiems skaičiavimams bus taikoma prielaida, kad įdiegus skaitmeninį dvynį efektyviau pagaminta šilumos energijos kiekį nedidinant biokuro suvartojimo bus galima sumažinti sunaudojamų gamtinių dujų kiekį dujinėje katilinėje. Po inovacijos įdiegimo pagaminamos šilumos energijos kiekis apskaičiuojamas pagal metodikos 9 formulę:

$$Q = 21041,4 \text{ t/m.} \times 10,86 \text{ GJ/t} \times 0,91 / 3,6 = 57762 \text{ MWh/m.}$$

Įdiegus skaitmeninį dvynį papildomai biokuro katilinėje būtų pagaminama 1 270 MWh/m. šilumos energijos. Reikalingas gamtinių dujų kiekis pagaminti sutaupomą šiluminės energijos kiekį apskaičiuojamas pagal metodikos 9 formulę:

$$B = 1270 \text{ MWh} \times 3,6 / (38,89 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 0,946) = 124,276 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.}$$

3.11 lentelėje atvaizduojamos sąnaudos prieš ir po projekto įdiegimo ir apskaičiuojamas sutaupymas. Įgyvendinus projektą, šiluminės energijos gamybos pajėgumas biokuro katilinėje padidėja 1 270 MWh/m. nedidėjant sudeginamo biokuro kiekiui. Efektyviau pagaminant šilumos energiją biokuro katilinėje išvengiama 124,276 tūkst. m³/m. gamtinių dujų suvartojimo dujinėje katilinėje. Dėl šios priežasties pasiekiami sumažinimai kuro ir energijos naudojimo bei aplinkosauginių rodiklių srityje.

Oro teršalų sumažėjimas dėl sunaudojamo gamtinių dujų kiekio sumažėjimo vertinamas pagal metodikos 10 formulę:

- $E_{\text{NO}_x} = 578,246 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 74 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 1,480 \text{ t/m.};$
- $E_{\text{CO}} = 578,246 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 29 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,580 \text{ t/m.};$
- $E_{\text{SO}_x} = 578,246 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 0,67 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,013 \text{ t/m.};$
- $E_{\text{KD}} = 578,246 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 34,577 \text{ GJ/tūkst. m}^3 \times 0,78 \text{ g/GJ} \times 10^{-6} = 0,016 \text{ t/m.}$

Tiesioginiai CH₄ išmetimai į aplinkos orą po inovacijos įdiegimo apskaičiuojami pagal 3 metodikos formulę:

- $E_{\text{CH}_4, \text{ gamtinės dujos}} = 578,246 \text{ tūkst. m}^3/\text{m.} \times 0,034577 \text{ TJ/tūkst. m}^3 \times 1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,02 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $\text{GWE}_{\text{CH}_4} = 0,022 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 0,56 \text{ t CO}_2\text{e}/\text{m.}$

Dėl sumažinamo deginamo gamtinių dujų kiekio sumažės ir netiesioginės CH₄ emisijos dėl nuotėkių skirstymo tinkluose. Netiesioginių CH₄ emisijų kiekis skirstymo tinkluose po inovacijos įdiegimo apskaičiuojamas pagal 6 metodikos formulę:

- $E_{\text{CH}_4, \text{ paskirstymas}} = 578246 \text{ m}^3/\text{m.} \times 0,022 \times 0,9517 \times 0,7 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-3} = 8,475 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $\text{GWE}_{\text{CH}_4} = 8,475 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 237,3 \text{ t CO}_2\text{e}.$

Bendras tiesioginių ir netiesioginių CH₄ emisijų kiekis dėl dujinės katilinės veiklos po inovacijos įdiegimo apskaičiuojamas pagal metodikoje pateiktą 1 formulę:

- $E_{\text{CH}_4, \text{ bendras}} = 0,02 \text{ t CH}_4/\text{m.} + 8,475 \text{ t CH}_4/\text{m.} = 8,495 \text{ t CH}_4/\text{m.};$
- $\text{GWE}_{\text{CH}_4} = 8,495 \text{ t CH}_4/\text{m} \times 28 = 237,86 \text{ t CO}_2\text{e}/\text{m.}$

CO₂ ir N₂O emisijos susidarancios dėl gamtinių dujų deginimo įrenginyje apskaičiuojamos pagal 16 metodikos formulę:

- $E_{\text{CO}_2} = 19,99 \text{ TJ/m.} \times 55590 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 1111,244 \text{ t CO}_2/\text{m.};$

$$- E_{N_2O} = 19,99 \text{ TJ/m.} \times 0,1 \text{ kg/TJ} \times 10^{-3} = 0,0020 \text{ t N}_2\text{O/m.}$$

3.11 lentelė. Skaitmeninio dvynio biokuro katilinėje įdiegimo aplinkosauginio vertinimo rezultatas

Įvediniai ir išvediniai	Vnt.	Absoliutūs aplinkosaugos indikatoriai (AAI)		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)
		Prieš projekto įdiegimą	Po projekto įdiegimo	
		Vnt./m.	Vnt./m.	Vnt./m.
Šilumos energijos gamyba naudojant biokurą	MWh	56492	57762	-1270
Katilo n.k	%	89	91	-
Šilumos energijos gamyba naudojant gamtines dujas	MWh	7179	5909	1270
Elektros energija	MWh	635,90	635,90	0
Biokuras	t	21041,4	21041,4	0
Gamtinės dujos	tūkst. m ³	702,522	578,246	124,276
	MWh	6747,58	5553,94	1193,66
Išlakos į aplinkos orą	t			
CO		187,804	187,68	0,124
NO _x		31,668	31,350	0,318
KD		8,045	8,042	0,003
SO _x		3,627	3,624	0,003
Tiesioginės ŠESD:	t			
CH ₄		9,871	9,867	0,004
CO ₂		1350,34	1111,24	239,10
N ₂ O		1,315	1,315	0
Netiesioginės ŠESD:				
CH ₄ dėl dujų nuotėkių	t	10,296	8,475	1,821
Dėl elektros vartojimo	t CO ₂ e	267,08	267,08	0
GWE _{CH4}	t CO ₂ e	564,676	513,576	51,1
GWE _{ŠESD}		2530,571	2240,371	290,2

Ekonominis vertinimas

Po inovacijos įdiegimo planuojami sutaupymai ir reikalingos investicijos pavaizduotos 3.12 ir 3.13 lentelėje. Skaitmeninio dvynio įdiegimui planuojamas bendras investicijų dydis 20 700 EUR.

3.12 lentelė. Skaitmeninio dvynio biokuro katilinėje įdiegimo aplinkosauginis vertinimas

Įvediniai ir išvediniai	Prieš projekto įdiegimą		Po projekto įdiegimo		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)	
	Vnt./m.	EUR./m.	Vnt./m.	EUR./m.	Vnt./m.	EUR./m.
Šiluminės energijos gamyba iš biokuro, MWh	56492	0	57762	0	-1270	0

Įvediniai ir išvediniai	Prieš projekto įdiegimą		Po projekto įdiegimo		Sutaupoma / sumažėja (+) // padidėja (-)	
	Vnt./m.	EUR./m.	Vnt./m.	EUR./m.	Vnt./m.	EUR/m.
Elektros energija, MWh	635,9	47 692,50	635,9	47 692,50	0	0
Biokuras, t	21041,4	3 240 376,00	21041,4	3 240 376,00	0	0
Šiluminės energijos gamyba deginant gamtines dujas, MWh	7179	0	5909	0	1270	0
Gamtinės dujos, MWh	6747,59	357 622,27	5553,94	294 358,82	1193,65	63 263,45
*Skaitmeninio dvynio mėnesinis mokestis	0	0	12	14 856,00	-12	-14 856
Planuojama sutaupyti, įdiegus inovaciją, EUR/m.:						48 407,45

***Pastaba:** Skaitmeninio dvynio mokestis – 1238,00 Eur/mėn.

3.13 lentelė. Skaitmeninio dvynio įdiegimo numatomos investicijos

Įranga, darbai, paslaugos	Dimensija	Vnt.	EUR
Duomenų nuskaitymas nuo esamo katilo valdymo sistemos	Vnt.	1	19 900,00
DWEEN Boiler įdiegimas	Vnt.	1	
Testavimo, paleidimo darbai	Vnt.	1	
Naudojimosi instrukcijos parengimas	Vnt.	1	
Personalo mokymai	Dienos	1	800,00
Bendra suma be PVM			20 700,00

Biokuro katilinėje skaitmenio dvynio investicijos atsipirkimo trukmė apskaičiuojama pagal tyrimo metodikoje pateiktą 13 formulę:

$$AT = 20\,700,00 \text{ EUR} / 48\,407,45 \text{ EUR/m.} = 0,43 \text{ m.}$$

Atsižvelgiant į tai, kad investicijų atsipirkimo trukmė mažiau negu 3 metai, inovacija vertinama kaip ŠG projektas [41].

3.5. Aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas įdiegus inovacijas

Norint objektyviai ateityje įvertinti po ŠG inovacijų įdiegimo pasiektą aplinkosauginį efektą, būtina analizuoti AAIs ir bendrą aplinkosauginį veiksmingumą. PKP pagrindinių medžiagų ir energijos srautai visos įmonės lygmenyje po inovacijų įdiegimo pateikti 3.14 lentelėje.

3.14 lentelė. PKP pagrindiniai medžiagų ir energijos srautai po inovacijų įdiegimo

Analizuojami srautai	Vnt.	Prieš projektų įdiegimą	Po projektų įdiegimo	Sutaupoma (sumažėja) (+) / Padidėja (-)
		Vnt./m	Vnt./m	Vnt./m
Elektros energija iš tinklo	MWh	20210,3	20503,09	-292,79
Biokuras	t	21041,4	18915,78	2125,62
Gamtinės dujos	m ³	702522	430206	272316

Analizuojami srautai	Vnt.	Prieš projektų įdiegimą	Po projektų įdiegimo	Sutaupoma (sumažėja) (+) / Padidėja (-)
		Vnt./m	Vnt./m	Vnt./m
Oro teršalai (CO, NO _x , KD, SO _x)	kg	231100	206878	24222
Tiesioginės CH ₄	kg	10051	9052	999
Netiesioginės CH ₄	kg	10296	6310	3986
GWE _{CH4} (vertinant 1 ir 2 lygiais)	t CO _{2e}	569,72	430,07	139,58
Tiesioginės CO ₂	t	4480,70	3953,13	527,57
N ₂ O	t	1,34	1,21	0,13
Netiesioginės CO ₂ (dėl elektros energijos sąnaudų)	t	8488,33	8611,31	-122,98
GWE _{ŠESD} (vertinant 1 ir 2 lygiais)	t CO _{2e}	13893,85	13315,16	578,69

Įgyvendinus visas numatytas priemones visos įmonės lygmenyje matoma, kad biokuro sunaudojimas kasmet sumažėja 2 125,62 t, gamtinių dujų sunaudojimas sumažėja 272,316 tūkst. m³. Dėl mažėjančio sudeginamo kuro kiekio išlakos į aplinkos orą sumažėja 24,222 t, tiesioginės CH₄ emisijos 0,999 t, netiesioginės CH₄ emisijos 3,986 t. Poveikis klimato kaitai dėl CH₄ sumažėja 139,58 t CO_{2e} arba 24,5% , bendras poveikis klimato kaitai dėl visų ŠESD sumažėja 578,69 t CO_{2e} arba 4,2 %.

Siekiant pateikti pasiūlymus visoms pramonėms įmonėms tikslingiausia skaičiuoti aplinkosauginio veiksmingumo pokytį PKP gamybos lygmenyje, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms. Po inovacijų įdiegimo bendras PKP šiluminės energijos poreikis sumažėja nuo 39476 MWh/m iki 38568,6 MWh/m tai sudarytu 61,9 % nuo visos šiluminės energijos pagaminamos PKP katilinėje. Aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas PKP gamybos lygmenyje, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms pateikiamas 3.15 lentelėje. Aplinkos apsaugos indikatoriai apskaičiuojami pagal metodikoje nurodytą 11 formulę.

3.15 lentelė. PKP aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas gamybos lygmenyje, papildomai vertinant PKP katilinėje pagamintą šiluminę energiją tik PKP gamybos reikmėms, po inovacijų įdiegimo

Srautai siūlomų priemonių įėjime ir išėjime	Vnt.	Aplinkos apsaugos indikatoriai ir aplinkosauginio veiksmingumo įvertinimas					
		Prieš projektų įdiegimą		Po projektų įdiegimo		Sutaupoma (sumažėja) (+) / Padidėja (-)	AAV padidėjimas (+) / Sumažėjimas (-)
		Vnt./m	Vnt./G (AAI)	Vnt./m	Vnt./G (AAI)	Vnt./m	¹ Vnt./G
Elektros energija iš tinklo	MWh	19968,32	0,519	20149,56	0,524	-181,24	-0,005
Kietasis biokuras	t	13045,67	0,339	10920,05	0,284	2125,62	0,055
Gamtinės dujos	m ³	435563,64	11,326	266942,12	6,941	168621,52	4,385
Oro teršalai (CO, NO _x , KD, SO _x)	t	143,22	0,0037	128,23	0,0033	14,99	0,0004

Srautai siūlomų priemonių įėjime ir išėjime	Vnt.	Aplinkos apsaugos indikatoriai ir aplinkosauginio veiksmingumo įvertinimas					
		Prieš projektų įdiegimą		Po projektų įdiegimo		Sutaupoma (+) / Padidėja (-)	AAV padidėjimas (+) / Sumažėjimas (-)
		Vnt./m	Vnt./G (AAIs)	Vnt./m	Vnt./G (AAIs)	Vnt./m	¹ Vnt./G
GWE _{ESD}	t CO ₂ e	12817,29	0,333	12462,06	0,324	355,23	0,009
Tiesioginės CH ₄ (vertinant 1 ir 2 lygiais)	kg	6300,02	0,164	5681,64	0,148	618,38	0,016
Netiesioginės CH ₄	kg	6177,60	0,161	3710,27	0,096	2467,33	0,064
GWE _{CH4} (vertinant 1 ir 2 lygiais)	kg CO ₂ e	349373,36	9,085	262973,34	6,838	86400,02	2,247

¹**Pastaba:** skaičiuojama, kad gamybos apimtys 38458 t/m.

Įgyvendinus visas numatytas priemones nustatyta, kad bendras PKP aplinkosauginis veiksmingumas, vertinant tik PKP reikmėms pagamintą šiluminę energiją, visose aplinkosaugos srityse pagerėjo, išskyrus elektros energijos suvartojimą. Elektros energijos suvartojimas iš tinklo po projektų įdiegimo padidėjo nuo 19968,32 iki 20149,56 MWh/m., arba 0,519 iki 0,524 MWh/t G. Tuo tarpu absoliutus gamtinių dujų sunaudojimas sumažėjo 91771,61 m³/m. arba nuo 11,326 iki 8,939 m³/t G, biokuro sunaudojimas sumažėjo 2125,62 t/m. arba nuo 0,339 iki 0,284 t/t G. Įdiegus siūlomas priemones taip pat sumažėja oro teršalų emisijos. CO, NO_x, KD ir SO_x emisijų kiekis sumažėjo 14993,42 kg/m. arba nuo 3,724 iki 3,334 kg/t G. Tiesioginės CH₄ emisijos sumažėjo 618,38 kg/m., arba 9,82 %, o netiesioginės CH₄ emisijos – 2467,33 kg/m. arba 39.94 %. Vertinant bendrai CH₄ poveikį klimato kaitai sumažėjo 86400,02 kg CO₂e/m., arba 2,247 kg CO₂e/t G. Po inovacijų įdiegimo poveikis klimato kaitai dėl CH₄ emisijų sumažėja 24,73 %.

Vis dėlto po inovacijų įdiegimo CH₄ emisijos nėra visiškai eliminuojamos, nes dalis jų toliau susidaro tiesiogiai dėl degalų sąnaudų, gamtinių dujų ir kietojo biokuro deginimo. Be to, analizuojamame objekte nepavyko pasiekti strateginiuose dokumentuose ir darbo hipotezėje išskeltus uždavinius – sumažinti CH₄ bent 30 %. Šioje vietoje būtina paminėti, kad techniškai galima dar daugiau atsisakyti deginimo procesų bei gaminti šiluminę energiją, pvz., regeneruojant aplinkos šilumą (šilumos siurblius „oras – vanduo“), bet šie sprendimai kol kas nėra naudingi ekonominiu požiūriu, taip pat aplinkosauginiu, jeigu naudojama elektros energija tiekiami nei iš AEI.

Netiesioginiu CH₄ šaltiniu išlieka nuotėkiai susidarantys gamtinių dujų tiekimo ir skirstymo tinkluose. Todėl, siekiant dar labiau sumažinti CH₄ poveikį klimato kaitai, pirmiausia turėtų būti toliau mažinamas gamtinių dujų poreikis, didinant šilumos gamybos efektyvumą, plečiant atliekinės šilumos panaudojimą ir palaipsniui keičiant iškastinį kurą mažesnio poveikio energijos šaltiniais.

4. CH₄ mažinimo rekomendacijos Lietuvos pramonės įmonėms

Lietuvos pramonės įmonėse turi būti imamasi sisteminių priemonių ŠESD emisijoms mažinti, orientuojantis ne tik į bendrą energijos vartojimo mažinimą, bet ir į CH₄ emisijų prevenciją visoje energijos tiekimo ir vartojimo grandinėje. Nors Lietuvos pramonės sektoriuje CH₄ emisijos sudaro santykinai nedidelę bendrų ŠESD emisijų dalį, atlikta analizė parodė, kad reikšminga CH₄ emisijų dalis susidaro dėl gamtinių dujų naudojimo šilumos energijos gamybai, o būtent dėl nuotėkių gamtinių dujų perdavimo ir skirstymo tinkluose. Todėl energijos vartojimo efektyvumo didinimas pramonėje turi būti vertinamas ne tik kaip energijos taupymo ar ekonominės naudos priemonė, bet ir kaip svarbi klimato kaitos švelninimo kryptis.

Atlikta mokslinės literatūros, teisės aktų, strateginių dokumentų ir pasirinktos įmonės analizė parodė, kad pagrindinės Lietuvos pramonės problemos, susijusios su CH₄ ir kitų ŠESD emisijų susidarymu, išlieka dėl didelio šiluminės energijos vartojimo intensyvumo, priklausomybės nuo iškastinio kuro, neefektyvaus atliekamos šilumos panaudojimo bei riboto pažangių procesų valdymo technologijų taikymo. Daugelyje įmonių technologiniai procesai vis dar grindžiami reaktyviu energijos valdymu, kai energijos vartojimo optimizavimas atliekamas tik reaguojant į jau atsiradusius proceso pokyčius ar energijos nuostolius. Tokia praktika didina deginamo kuro sąnaudas, energijos nuostolius ir tiesiogiai arba netiesiogiai prisideda prie didesnių CH₄ emisijų.

Pagal gautus darbo rezultatus Lietuvos pramonės įmonėms rekomenduojama:

- Mažinti sunaudojamo kuro poreikį, didinant energijos gamybos efektyvumą. Kadangi energijos gamybos efektyvumo didinimas yra vienas efektyviausių būdų mažinti CH₄ emisijas. Tyrimo metu nustatyta, kad DKE diegimas biokuro katilinėse leidžia reikšmingai padidinti katilo naudingumo koeficientą ir reikšmingai sumažinti kuro sąnaudas bei kartu mažinti su degimo procesais susijusias emisijas. Praktinis vertinimas įmonės lygmenyje parodė, kad įdiegus DKE galima sumažinti biokuro sąnaudas 10,12 % ir CH₄ emisijas 11,3 %.
- Ieškoti atliekamos šilumos panaudojimo galimybių. Maisto pramonėje reikšmingi šilumos kiekiai prarandami su gamybinėmis nuotekomis, su ištraukiamuoju oru iš šaldymo ir ventiliacijos sistemų. Tyrimo metu nustatyta, kad šilumos siurblių taikymas leidžia regeneruoti žemos temperatūros atliekamą šilumą iš nuotekų ir sumažinti kuro suvartojimą šilumos energijos gamybai. Analizuojamu atveju nuotekų šilumos siurblio įdiegimas leido susigražinti 455 MWh šilumos energijos, kuri bus panaudojama karšto vandens (50 °C) pašildymui plovimo procesams. Tokiu būdu sumažės gamtinių dujų suvartojimas 50,11 tūkst. m³/m. ir CH₄ emisijos 4,18 %. Vis dėlto tokių sistemų ekonominis efektyvumas labai priklauso nuo elektros energijos kainos ir įmonės galimybių naudoti elektros energiją iš AEI. Dėl šios priežasties rekomenduojama atliekamos šilumos panaudojimo sprendimus vertinti kompleksiskai kartu su saulės elektrinių, energijos kaupimo ar kitų AEI technologijų diegimu.
- Įvertinti pažangių skaitmeninių technologijų taikymo galimybes šilumos energijos gamybos procesuose. Skaitmeninio dvynio technologija leidžia realiu laiku optimizuoti degimo procesus, mažinti perteklinį oro kiekį, stabilizuoti katilo darbą ir sumažinti energijos nuostolius. Praktiniai vertinimai parodė, kad net ir santykinai nedidelis katilo efektyvumo padidėjimas padėjo sumažinti gamtinių dujų suvartojimą 124,276 tūkst. m³/m., CH₄ emisijos dėl skaitmeninio dvynio įdiegimo sumažėjo 8,97 %. Svarbu pažymėti, kad tokio tipo sprendimai dažniausiai pasižymi trumpu atsiperkamumo laikotarpiu, todėl gali būti vertinami kaip vienos perspektyviausių priemonių pramonės energetinio efektyvumo didinimui.

- Ieškoti galimybių mažinti gamtinių dujų sunaudojimą. Tyrimo rezultatai rodo, kad net jeigu iki 87 % šiluminės energijos pramonės įmonės katilinėje gaminama, deginant kietąjį biokurą, vertinant poveikį klimato kaitai dėl CH₄ 1 ir 2 lygiais, 49–51 % įtakos sudaro netiesioginis poveikis dėl rezervinio kuro – gamtinių dujų naudojimo, vertinant jų nuotėkį skirstymo ir tiekimo tinkluose.

Tyrimo metu analizuojamoje įmonėje įdiegimas visų siūlomų priemonių leistų sumažinti poveikį klimato kaitai dėl tiesioginių ir netiesioginių CH₄ emisijų 24,73 % t.y. nuo 9,085 kg CO₂e/t G iki 6,838 kg CO₂e/t G.

Pagal atliktą statistinių duomenų analizę nustatyta, kad Lietuvoje 2020 metais dėl pramonės KDI, kurie pagal ŠESD apskaitą priskirti energetikos sektoriui 1.A.2 kategorijai, veiklos buvo sugeneruota 0,21 tūkst. t tiesioginių CH₄ emisijų. Taip pat įvertinta, kad dėl pramonės KDI sudegintų gamtinių dujų netiesiogiai susidarė 1,152 tūkst. t CH₄ emisijų (dėl jų nuotėkų tiekimo ir paskirstymo tinkluose). Bendras poveikis klimato kaitai dėl Lietuvos pramonės (1.A.2) vertinant 1 ir 2 lygiu 2020 m. sudarė 38,136 tūkst. t CO₂e. Darbe analizuotų tvarios plėtros pasiūlymų įdiegimas pramonės lygmenyje leistų sumažinti CH₄ emisijas 0,337 t per metus arba, vertinant poveikį klimato kaitai, 9.436 tūkst. t CO₂e per metus.

Apibendrinant galima teigti, kad CH₄ emisijų mažinimas Lietuvos apdirbamosios pramonės įmonėse turi būti grindžiamas ne pavienėmis technologinėmis priemonėmis, o integruotu požiūriu į energijos ir išteklių valdymą. Didžiausias poveikis gali būti pasiektas derinant energinio efektyvumo didinimą, švaresnės gamybos principų taikymą, pažangias skaitmenines technologijas, alternatyvių energijos šaltinių naudojimą ir pramoninės simbiozės galimybes. Tokios priemonės leidžia ne tik mažinti poveikį klimato kaitai ir CH₄ emisijas, bet ir didinti įmonių konkurencingumą, mažinti energijos sąnaudas bei gerinti ilgalaikį pramonės sektoriaus tvarumą.

Išvados

1. Lietuvos energetikos sektorius (1.A ir 1.B.2 kategorijos pagal ŠESD apskaitą) 2020 m. sugeneravo 15,91 tūkst. t CH₄, įsk. 36,8% – dėl kuro deginimo. Kitos sektoriui priskirtos CH₄ emisijos susidarė dėl kuro (naftos produktų, gamtinių dujų) gavybos, transportavimo (tiekimu) ir paskirstymo metu susidarantių nuotėkių. 2020 m. pramonės įmonių katilinėse (1.A.2 kategorijoje) sudeginta apie 22,9 tūkst. TJ kuro, įsk. virš 53 % – gamtinių dujų, sugeneruota 0,21 tūkst. t CH₄, įsk. 71,4 % dėl biokuro deginimo. Atsižvelgiant į pasaulinį susitarimą iki 2030 m. sumažinti CH₄ emisijas bent 30 %, palyginti su 2020 m., kurią ketina pasirašyti ir Lietuva, nustatyta, kad viena svarbiausių CH₄ mažinimo kryptų pramonės sektoriuje yra energijos vartojimo efektyvumo (EVE) didinimas ir perėjimas prie emisijų mažesnio intensyvumo energijos šaltinių.
2. Darbe pasiūlyta CH₄ emisijų ir jų mažinimo galimybių identifikavimo bei vertinimo metodika skirta Lietuvos pramonės įmonėms, siekiančioms identifikuoti pagrindinius CH₄ emisijų šaltinius ir CH₄ emisijas bei suplanuoti galimybes jas sumažinti, taikant švaresnės gamybos principus. Metodikoje pramonės įmonėms siūloma vertinti ne tik tiesiogines CH₄ emisijas dėl kuro deginimo, ir/arba nuotekų tvarkymo, ir/arba atliekų šalinimo sąvartyuose (*1 lygiu, priklausomai nuo įmonės veiklos*), bei ir netiesiogines emisijas (*2 lygiu*) dėl pramonėje deginamų gamtinių dujų ir jų nuotėkių tiekimo ir paskirstymo tinkluose.
3. Naudojant pasiūlytą metodiką eksperimentui parinktoje UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ (PKP), nustatyti CH₄ emisijų šaltiniai, kurių poveikis klimato kaitai dėl CH₄ (analizuojant 1 ir 2 lygiais) 2020 m. siekė 569,7 t CO₂e, įsk. virš 50,6 % – netiesioginis poveikis dėl rezervinio kuro – gamtinių dujų, kurias sudeginant PKP katilinėje pagaminta tik apie 11% šiluminės energijos. Jeigu analizuoti energijos gamybą PKP katilinėje tik įmonės reikmėms (62%), poveikis dėl CH₄ emisijų sumažėtų iki 355 t CO₂e arba 9,24 kg CO₂e tonai gaminamos produkcijos, įsk. tiesioginį poveikį – 4,59 kg CO₂e/t.
4. Darbe pateikti švaresnės gamybos pasiūlymai, kurių įdiegimas leistų padidinti galutinės ir pirminės energijos naudojimo efektyvumą ir 24,5 % sumažinti CH₄ emisijas:
 - dėl galutinės energijos intensyvumo mažinimo, pereinant nuo garo prie karšto vandens naudojimo, regeneruojant šilumą iš nuotekų ir kondensato CH₄ emisijos sumažėtų 1,467 t/m. arba 7,2 %;
 - įdiegus dūmų kondensacinę ekonomizerį (DKE), biokuro katilo darbo efektyvumas padidėtų apie 10 %, tiesioginės CH₄ emisijos sumažėtų 0,99 t/m. arba 4,9 %;
 - šilumos siurblio įdiegimas leistų regeneruoti iš nuotekų 455 MWh atliekamos šiluminės ir sumažinti tiesiogines ir netiesiogines CH₄ emisijas 0,7 t/m. arba 3,45;
 - skaitmeninio dvynio įdiegimas biokuro katilinėje, leidžiantis 2 % efektyviau valdyti šilumos gamybos procesą, taip mažinant šilumos energijos gamybą gamtines dujas deginančiuose įrenginiuose; atitinkamai CH₄ emisijos sumažėtų dar 8,97 %.

Ekonominio įvertinimo rezultatų analizė parodė, kad bendros investicijos į darbe siūlomų inovacijų diegimą siektų apie 0,9 Mln. EUR, įdiegimas leistų kasmet taupyti iki 313,9 tūkst. EUR, t.y. inovacijų vidutinė atsipirkimo trukmė siektų apie 2,8 metų.

5. Darbe pateiktos rekomendacijos Lietuvos pramonės įmonėms dėl CH₄ emisijų prevencijos ir mažinimo, diegiant EVE didinimo projektus, taikant švaresnės gamybos principus, procesų optimizavimo ir integravimo metodus bei mažinant priklausomybę nuo iškastinio kuro. Tyrimo metu nustatyta, kad šiluminės energijos vartojimo intensyvumo mažinimo priemonių diegimas

leistų sumažinti bendras CH₄ emisijas 10,8 % vienai tonai produkcijos pagaminti, o kūrą deginančių katilų darbo optimizavimas – iki 14 %.

6. Darbo rezultatai parodė, kad taikant EVE didinimo priemones pagal švaresnės gamybos principus Lietuvos pramonės įmonėse galima sumažinti CH₄ emisijas net iki 24,5 %, bet pasiekti 30% sumažėjimą iki 2030 m. yra kol kas ambicingas siekis. Techniškai galima atsisakyti didžiosios dalies kuro deginimo ir naudoti aplinkos energiją, bet tokių projektų įdiegimas gali didinti bendrą poveikį klimato kaitai dėl ŠESD ir mažinti ekonominį efektyvumą. Todėl darbe pramonės įmonėms siūloma atliekamos ir/arba aplinkos energijos regeneravimo projektus vertinti kompleksiskai kartu su elektros energijos gamybos iš AEI technologijomis. Dėl šios priežasties reikšmingesniai CH₄ emisijų mažinimui būtinos ekonominės paramos priemonės, didinančios tvarių technologijų diegimo prieinamumą pramonės įmonėms.

Literatūros sąrašas

1. RAMOS, Saioa, ir kt. Cleaner production strategies for the food industry: Iš: GALANAKIS, Charis *The Interaction of Food Industry and Environment*: Academic Press, 2020, pp. 1–34. ISBN 9780128164495.
2. FRIELER, Katja, et al. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming - simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geoscientific Model Development*, 2017, 10 (12), 4321–4345. ISSN 1991-959X.
3. GISTEMP Team, 2026: *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4*. NASA Goddard Institute for Space Studies.. Prieiga per internetą: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. [Žiūrėta 2026-03-21].
4. GOWRISANKAR, Arulprakash, et al. Greenhouse Gas Emissions: A Rapid Submerge of the World. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 2022, 32 (6). 061104-1-061104-19. ISSN 1054-1500.
5. FORSTER, Peter ir kt. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Iš: MASSON, Delmotte, et al. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University press, 2023, pp. 923–1054. doi: 10.1017/9781009157896.009.
6. EUROPOS KOMISIJA. Komisijos komunikatas Europos parlamentui, tarybai, Europos ekonomikos ir socialinių reikalų komitetui ir regionų komitetui dėl išmetamo metano kiekio mažinimo ES strategijos, 2020 m. spalio 14 d., Nr.COM(2020) 663. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0663> [žiūrėta 2026-03-29].
7. EUROPOS PARLAMENTAS IR EUROPOS SAJUNGOS TARYBA. Reglamentas (ES) 2018/1999 dėl energetikos sąjungos ir klimato politikos veiksmų valdymo, 2018 m. gruodžio 11 d., Nr. L 328/1. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32018R1999> [žiūrėta 2026-03-29].
8. EUROPOS KOMISIJA. Komisijos komunikatas Europos žaliasis kursas, 2019 m. gruodžio 11 d., Nr. COM(2019) 640. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=celex:52019DC0640> [žiūrėta 2026-03-29].
9. EUROPOS PARLAMENTAS IR EUROPOS SAJUNGOS TARYBA. Reglamentas (ES) 2021/1119 kuriuo nustatoma poveikio klimatui neutralumo pasiekimo sistema, 2021 m. birželio 30 d., Nr. L 243/1. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119> [žiūrėta 2026-03-29].
10. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. Nutarimas dėl nacionalinės klimato kaitos valdymo darbotvarkės patvirtinimo, 2021 m. birželio 30 d. Nr. XIV–490. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/7eb37fc0db3311eb866fe2e083228059> [žiūrėta 2026-03-29].
11. EUROPOS PARLAMENTAS IR EUROPOS SAJUNGOS TARYBA. Direktyva (ES) 2018/844 kuria iš dalies keičiama Direktyva 2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo ir Direktyva 2012/27/ES dėl energijos vartojimo efektyvumo, 2018 m. gegužės 30 d., Nr. L 156/75. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844> [žiūrėta 2026-03-29].
12. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo įstatymas, 2016 m. lapkričio 3 d., Nr. XII–2702. Suvestinė redakcija nuo 2025-10-01. Prieiga per internetą: <https://e-tar.lt/portal/lt/legalAct/946da260a67b11e69ad4c8713b612d0f/asr> [žiūrėta 2026-03-29].

13. SOLNØRDAL, M.T. and L. Foss. Closing the energy efficiency gap—a systematic review of empirical articles on drivers to energy efficiency in manufacturing firms. *ENERGIES (Basel)*. 2018, 11 (3), 518. ISSN 1996-1073.
14. BOJNEC, Š. and D. Papler. Economic efficiency, energy consumption and sustainable development. *Journal of business economics and management*. 2011, 12 (2), 353–374. ISSN 1611-1699.
15. KONSTANTINAVIČIŪTĖ, Inga ir kt. *Lithuania's Greenhouse Gas Inventory Report 2025*. [interaktyvus]. Vilnius 2025 [žiūrėta 2026-03-29]. Prieiga per: https://aaa.lrv.lt/public/canonical/1746791508/3570/NID_2025.pdf
16. KLIPOVA, Irina. *Metano išmetimų mažinimas energetikos sektoriuje: "Integruotas požiūris į metano išmetimų mažinimą Rumunijoje, Lenkijoje ir Lietuvoje"* [interaktyvus] Vilnius: Darnaus vystymosi centras, 2025. [žiūrėta 2026-05-03]. Prieiga per: https://dvcentras.lt/wp-content/uploads/2025/12/Metano-mazinimas-energetikos-sektoriuje_2025-06-10_galutinis.pdf
17. SKIPKA, Kenneth J. ir Louis THEODORE. *Energy resources: Availability, management, and environmental impacts* [interaktyvus]. Boca Raton, 2014. [žiūrėta 2026-04-15] ISBN 9780429096396. Prieiga per: <https://www.taylorfrancis.com/>
18. HENS, Luc, et al. On the evolution of “cleaner production” as a concept and a practice. *Journal of cleaner production* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, vol. 172, 3323-3333 [žiūrėta 2026-04-10]. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.082
19. SCHWAGER, P. and F. MOSER. The application of chemical leasing business models in Mexico. *Environmental science and pollution research international* [interaktyvus]. Springer Nature, March 2006, vol. 13(2), 131–137 [žiūrėta 2026-04-10]. doi: 10.1065/espr2006.02.294
20. STANIŠKIS, Jurgis K., Irina KLIPOVA, Žaneta STASIŠKIENĖ. *Švaresnė gamyba: sisteminis požiūris. Monografija*. Kaunas: Technologija, 2002. ISBN 9955093129.
21. STANIŠKIS, Jurgis K., Žaneta STASIŠKIENĖ, Valdas ARBAČIAUSKAS. *Švaresnės gamybos koncepcija ir jos taikymas*. Kaunas: Technologija; 2001. ISBN 9955090189.
22. MADANHIRE, I., K. MUGWINDIRI, C. MBOHWA. Enhancing cleaner production application in fertilizer manufacturing: Case study. *Clean Techn Environ Policy* [interaktyvus]. Springer Nature, March 2015, vol. 17(3), 667–679 [žiūrėta 2026-04-10]. doi: 10.1007/s10098-014-0823-7
23. KLIPOVA, I., R. LIEŠČINSKIENĖ. Minimization of heat energy intensity in food production companies applying sustainable industrial development methods. *Environmental research, engineering and management* [interaktyvus]. Kaunas University of Technology Press Journals, October 2011, vol. 57(3), 46-56 [žiūrėta 2026-04-10]. doi:10.5755/j01.arem.57.3.400
24. HASANBEIGI, A., et al. Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China. *Energy policy* [interaktyvus]. Elsevier, June 2013, vol. 57, 287–297 [žiūrėta 2026-04-10]. doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.053
25. KLIPOVA-GALICKAJA, I. and D. KLIAUGAITĖ. VOC emission reduction and energy efficiency in the flexible packaging printing processes: analysis and implementation. *Clean technologies and environmental policy* [interaktyvus]. Springer Nature, October 2018, vol. 20(8), 1805-1818 [žiūrėta [2026-04-10]. doi: 10.1007/s10098-018-1571-x
26. KLIPOVA, I. et al. Possibilities of increasing resource efficiency in nitrogen fertilizer production. *Clean technologies and environmental policy* [interaktyvus]. Springer Nature, March 2016, vol. 18(3), 901-914 [žiūrėta [2026-04-10]. doi: 10.1007/s10098-015-1068-9

27. ABBASI, Ghaleb Y. and E. Bassim ABBASSI. Environmental assessment for paper and cardboard industry in Jordan — a cleaner production concept. *Journal of cleaner production* [interaktyvus]. Elsevier, January 2004, vol. **12**(4). 321–326 [žiūrėta 2026-04-12]. doi: 10.1016/S0959-6526(02)00047-1
28. de OLIVEIRA NETO, Geraldo C., et al. Assessment of the environmental impact and economic benefits of the adoption of cleaner production in a brazilian metal finishing industry. *Environmental technology* [interaktyvus]. Taylor & Francis, June 2020, vol. **41**(14), 1814–1828 [žiūrėta 2026-04-12]. doi: 10.1080/09593330.2018.1551426
29. WANG, H. et al. Cleaner production based on sustainable development in chinese power plants. *Environmental engineering science* [interaktyvus]. Sage Journals, June 2015, vol. **32**(6), 461–469 [žiūrėta 2026-04-12]. doi: 10.1089/ees.2014.0042
30. MUSTER-SLAWITSCH, B., C. BRUNNER, J. FLUCH. Application of an advanced pinch methodology for the food and drink production. *Wiley interdisciplinary reviews. Energy and environment* [interaktyvus]. Wiley Online Library, November 2014, vol. **3**(6), 561–574 [žiūrėta 2026-04-12]. doi: 10.1002/wene.117
31. THELEN, A., et al. A comprehensive review of digital twin—part 2: Roles of uncertainty quantification and optimization, a battery digital twin, and perspectives. *Structural and multidisciplinary optimization* [interaktyvus]. Springer Nature, January 2023, vol. **66**(1), 1-43 [žiūrėta 2026-04-15]. doi: 10.1007/s00158-022-03410-x.
32. MISHRA, Ashutosh, May EL BARACHI, Manoj KUMAR. *Transforming industry using digital twin technology* [interaktyvus]. Springer 2024 [žiūrėta 2026-04-15]. ISBN 9783031585227. Prieiga per: <https://link-springer-com.ezproxy.ktu.edu/book/10.1007/978-3-031-58523-4>
33. XU, J., et al. Data based digital twin for operational performance optimization in CFB boilers. *Energy (Oxford)* [interaktyvus]. Elsevier, October 2024, vol. 306, 132532 [žiūrėta 2026-04-15]. doi: 10.1016/j.energy.2024.132532
34. DEKA, Abraham. Juxtaposing the role of effective capital, energy efficiency and technological innovations on environmental sustainability in the EU countries. *Management of Environmental Quality: An International Journal* [interaktyvus]. Science direct, March 2026, vol. **37**(2), 259–276 [žiūrėta 2026-04-15]. doi: 10.1108/MEQ-08-2024-0351
35. TUREK, V., et al. Industrial waste heat utilization in the European Union - an engineering-centric review. *Energies (Basel)* [interaktyvus]. EBSCOhost, May 2024, vol. **17**(9), 2084 [žiūrėta 2026-04-15]. doi: 10.3390/en17092084
36. PANAYIOTOU, Gregoris P., et al. Preliminary assessment of waste heat potential in major european industries. *Energy procedia* [interaktyvus]. Elsevier, January 2017, vol. 123, 335–345 [žiūrėta 2026-04-15]. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.263
37. ILIEV I., A. TERZIEV, H. BELOEV. Condensing economizers for large scale steam boilers. *International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy & Rural Development* [interaktyvus]. EBSCOhost, 2020, vol. 180, 1–13 [žiūrėta 2026-04-17]. doi: 10.1051/e3sconf/202018001004
38. TERHAN, M. and K. COMAKLI. Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas. *Applied thermal engineering* [interaktyvus]. Elsevier, May 2016, vol. 100, 1007–1015 [žiūrėta 2026-04-17]. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.122

39. JOUHARA, H., et al. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal science and engineering progress* [interaktyvus]. Elsevier, June 2018, vol. 6, 268–289 [žiūrėta 2026-04-18]. doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017
40. EGGLESTON, Simon et al. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [interaktyvus]. IGES, Japan, 2006 [žiūrėta 2026-04-28]. ISBN: 4-88788-032-4. Prieiga per: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
41. STANIŠKIS, Jurgis K. ir kt. *Darniosios inovacijos Lietuvos pramonėje: Kūrimas ir diegimas : Mokslo monografija*. Kaunas: Technologija, 2010. ISBN 9789955258155.
42. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 : technical guidance to prepare national emission inventories* [interaktyvus]. Publications Office of the European Union, 2023 [žiūrėta 2026-04-28]. Prieiga per: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>
43. APLINKOS APSAUGOS AGENTŪRA. *Lietuvoje taikomos kuro grynosios šiluminės vertės ir išmetamų teršalų faktoriai*. Svetainė. Prieiga per: <https://aaa.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/siltnamio-efekta-sukeliancios-dujos-1/es-atl-prekybos-sistema/lietuvoje-taikomos-kuro-grynosios-silumines-vertes-ir-ismetamu-tersalu-faktoriai/> [žiūrėta 2026-05-10].
44. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *Duomenų apie fluorintas šiltnamio efektą sukeliančias dujas ir ozono sluoksnį ardančias medžiagas teikimo, surinkimo ir tvarkymo, šių dujų ar medžiagų turinčios įrangos ir sistemų apskaitos tvarkos aprašas*, 2010 m. sausio 7 d., Nr. D1-12. Suvestinė redakcija nuo 2021-07-03. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.363383/asr> [žiūrėta 2026-05-10].
45. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *Klimato kaitos specialiosios programos lėšų naudojimo tvarkos aprašas*, 2014 m. vasario 7 d., Nr. D1-118. Prieiga per internetą: <https://e-tar.lt/portal/lt/legalAct/e26cfa90926211e397c8b55a09dd5905> [žiūrėta 2026-05-10].
46. APLINKOS APSAUGOS AGENTŪRA. *UAB „Plungės kooperatinė prekyba“ taršos integruotos prevencijos ir kontrolės leidimas*. Svetainė. Prieiga per: <https://aaa.lrv.lt/public/canonical/1724822163/2360/Leidimas%202023.pdf>. [žiūrėta 2026-04-15].
47. IGNITIS GRUPĖ. *2020 metų metinis pranešimas*. Svetainė. Prieiga per: https://ignitisgrupe.lt/sites/default/files/public/2024-02/Ignitis_grupes_metinis_pranesimas_2020.pdf [žiūrėta 2026-04-28].
48. SCARC ENERGY. *The piranha series heating & cooling using wastewater*. Svetainė. Prieiga per: <https://www.sharcenergy.com/products/piranha-wastewater-heat-recovery-system/> [žiūrėta 2026-04-16].
49. SPINTI, Jenifer P., et al. Atikokan digital twin: Machine learning in a biomass energy system. *Applied energy* [interaktyvus]. Elsevier, March 2022, vol. 310, 118436 [žiūrėta 2026-05-02]. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118436