



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Žaliojo vandenilio gamybos ekonominė analizė

Baigiamasis magistro projektas

Ieva Rakauskienė

Projekto autorė

Prof. Inga Konstantinavičiūtė

Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Žaliojo vandenilio gamybos ekonominė analizė

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Ieva Rakauskienė

Projekto autorė

Prof. Inga Konstantinavičiūtė

Vadovė

Asist. Artūras Baronas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Ieva Rakauskienė

Žaliojo vandenilio gamybos ekonominė analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autorius 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.

Ieva Rakauskienė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Rakauskienė, Ieva. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominė analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Inga Konstantinavičiūtė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir studijų krypčių grupė: energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: žaliasis vandenilis, elektrolizė, LCOH, ekonominis vertinimas, elektros energijos kaina, PEM elektrolizeris, PPA, elektros birža, jautrumo analizė, energetikos ekonomika.

Kaunas, 2026. 55 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe analizuojamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominis efektyvumas, ypatingą dėmesį skiriant elektros energijos kainos ir elektrolizerio veikimo režimo įtakai gamybos kaštams. Tyrimo aktualumą lemia didėjantis poreikis mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas bei ieškoti tvarių energijos sprendimų, leidžiančių užtikrinti klimato kaitos švelninimo tikslų įgyvendinimą.

Tyrimo objektas – žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas. Darbo tikslas – įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį efektyvumą, taikant svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) metodiką. Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai: išanalizuoti žaliojo vandenilio gamybos technologijas ir jų plėtros kontekstą, parengti ekonominio vertinimo metodiką bei atlikti praktinį vertinimą, įvertinant pagrindinių parametru įtaką rezultatams.

Tyrime taikomi metodai apima ekonominį modeliavimą, LCOH skaičiavimą bei jautrumo analizę, leidžiančią įvertinti elektros energijos kainos, elektrolizerio veikimo režimo ir kitų veiksnių įtaką gamybos kaštams.

Gauti rezultatai rodo, kad žaliojo vandenilio gamybos kaštai labiausiai priklauso nuo elektros energijos kainos, o LCOH reikšmės reikšmingai kinta priklausomai nuo pasirinktų scenarijų. Nustatyta, kad ekonomiškai konkurencingas lygis gali būti pasiektas esant žemoms elektros energijos kainoms ir optimizuotam elektrolizerio veikimui. Taip pat nustatyta, kad papildomos pajamos iš dalyvavimo elektros rinkose gali pagerinti projekto ekonominį efektyvumą.

Tyrimo rezultatai leidžia daryti išvadą, kad žaliojo vandenilio gamyba gali tapti ekonomiškai pagrįsta tik esant palankioms elektros rinkos sąlygoms ir taikant lankstų gamybos modelį, o technologijų plėtra ir elektros rinkos transformacija sudaro prielaidas šios technologijos konkurencingumo augimui ateityje.

Rakauskienė, Ieva. Economic Analysis of Green Hydrogen Production. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Inga Konstantinavičiūtė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and study field group: Energy Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: green hydrogen, electrolysis, LCOH, economic assessment, electricity price, PEM electrolyzer, PPA, electricity exchange, sensitivity analysis, energy economics.

Kaunas, 2026. 55 p.

Summary

This master's thesis analyzes the economic efficiency of green hydrogen production, with a particular focus on the impact of electricity prices and electrolyzer operating regimes on production costs. The relevance of the study is determined by the increasing need to reduce greenhouse gas emissions and to develop sustainable energy solutions that support climate change mitigation goals.

The object of the research is the economic evaluation of green hydrogen production. The aim of the thesis is to assess the economic efficiency of green hydrogen production using the Levelized Cost of Hydrogen (LCOH) methodology. To achieve this aim, the following objectives are set: to analyze green hydrogen production technologies and their development context, to develop an economic evaluation methodology, and to perform a practical assessment evaluating the impact of key parameters on the results.

The methods applied in the study include economic modeling, LCOH calculation, and sensitivity analysis, which allow the evaluation of the impact of electricity prices, electrolyzer operation, and other factors on hydrogen production costs.

The results show that the cost of green hydrogen production is highly dependent on electricity prices, and LCOH values vary significantly depending on the selected scenarios. It is determined that economic competitiveness can be achieved under conditions of low electricity prices and optimized electrolyzer operation. Additionally, participation in electricity markets may provide additional revenue streams and improve the overall economic performance of the project.

The findings indicate that green hydrogen production can become economically viable only under favorable electricity market conditions and with flexible production strategies, while ongoing technological development and energy market transformation create favorable conditions for increasing competitiveness in the future.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Žaliojo vandenilio gamybos technologijų ir ekonominių aspektų analizė	13
1.1. Vandenilio rūšys pagal gamybos būdą	13
1.2. Žaliojo vandenilio plėtros tarptautinės strategijos.....	14
1.3. Žaliojo vandenilio plėtros gairės Lietuvoje	16
1.4. Žaliojo vandenilio gamybos technologijos.....	16
1.5. Pasaulinė ir regioninės žaliojo vandenilio rinkos	21
1.6. Žaliojo vandenilio aplinkosauginiai aspektai	21
1.7. Žaliojo vandenilio ekonominiai aspektai ir tendencijos.....	22
1.8. Literatūros analizės apibendrinimas	23
2. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo metodika.....	24
2.1. Tyrimo pobūdis ir logika	24
2.2. Tyrimo metodai	25
2.2.1. Analitinis metodas	25
2.2.2. Lyginamasis metodas	26
2.2.3. Ekonominis modeliavimas taikant svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) rodiklį	26
2.2.4. Jautrumo analizė	27
2.3. Tyrimo duomenų šaltiniai ir jų pagrįstumas.....	27
2.4. AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomo žaliojo vandenilio projekto kontekstas ir pasirinkimo pagrindimas	28
2.5. Tyrimo eiga ir analizės etapai.....	29
2.6. Tyrimo prielaidos ir apribojimai	31
3. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas.....	33
3.1. Tyrimo duomenys ir prielaidos	33
3.1.1. Analizuojamo projekto charakteristika.....	33
3.1.2. Žaliojo vandenilio gamybos technologinis modelis	34
3.1.3. Sąnaudų struktūros detalizavimas	34
3.1.4. Pagrindinės ekonominės prielaidos	36
3.2. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas.....	39
3.2.1. Bazinio scenarijaus LCOH skaičiavimas	39
3.2.2. Elektros energijos tiekimo scenarijų palyginimas.....	41
3.2.3. Elektros energijos kainos įtaka LCOH.....	42
3.2.4. Jautrumo analizė.....	44
3.2.5. Žaliojo vandenilio realizacijos ir konkurencingumo vertinimas.....	45
3.2.6. Elektrolizės įrenginių lankstumo įtaka ekonominiam efektyvumui.....	47
Išvados.....	49
Rekomendacijos	50
Literatūros sąrašas	51

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Technologijų palyginimas [8; 10; 18]	20
2 lentelė. Nagrinėjamo objekto techniniai parametrai [43].....	34
3 lentelė. Žaliojo vandenilio infrastruktūros investicijų struktūra	35
4 lentelė. Ekonominio modelio pagrindinės prielaidos.....	38
5 lentelė. LCOH priklausomybė nuo elektros energijos kainos.....	43

Paveikslų sąrašas

1 pav. Žaliojo vandenilio technologijos schema [17]	17
2 pav. Vandens elektrolizės skirtingi metodai [21].....	18
3 pav. Technologijų brandos lygio skalė [26].....	20
4 pav. Darbo struktūra (sudaryta autoriaus).....	31
5 pav. Žaliojo vandenilio gamybos kaštų (LCOH) palyginimas pagal elektros tiekimo scenarijus (sudaryta autoriaus)	42
6 pav. LCOH priklausomybė nuo elektros energijos kainos (sudaryta autoriaus).....	43
7 pav. LCOH jautrumo analizė pagal pagrindinius parametrus (sudaryta autoriaus).....	44

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AEL – Šarminė elektrolizė (angl. *Alkaline Electrolysis*)

CAPEX – Kapitalo išlaidos (angl. *Capital Expenditures*)

CCS – Anglies dioksido surinkimas ir saugojimas (angl. *Carbon Capture and Storage*)

CEF – Europos infrastruktūros tinklų priemonė (angl. *Connecting Europe Facility*)

COP21 – Jungtinių Tautų klimato kaitos konferencija (angl. *Conference of the Parties 21*)

CO₂ – Anglies dioksidas (angl. *Carbon dioxide*)

CRF – Kapitalo atkūrimo koeficientas (angl. *Capital Recovery Factor*)

ETS – Europos Sąjungos apyvartinių taršos leidimų sistema (angl. *Emissions Trading System*)

FCEV – Vandenilio kuro elementais varomos transporto priemonės (angl. *Fuel Cell Electric Vehicle*)

IEA – Tarptautinė energetikos agentūra (angl. *International Energy Agency*)

LCOH – Svertiniai vandenilio gamybos kaštai (angl. *Levelised Cost of Hydrogen*)

OPEX – Veiklos sąnaudos (angl. *Operational Expenditures*)

PEM – Protonų mainų membrana (angl. *Proton Exchange Membrane*)

PPA – Ilgalaikė elektros energijos pirkimo sutartis (angl. *Power Purchase Agreement*)

SOEC – Kietųjų oksidų elektrolizė (angl. *Solid Oxide Electrolysis Cell*)

TRL – Technologijų brandos lygis (angl. *Technology Readiness Level*)

ŠESD – Šiltnamio efektą sukeliančios dujos

Terminai:

Žaliasis vandenilis – vandenilis, gaminamas elektrolizės būdu naudojant atsinaujinančią elektros energiją, be anglies dioksido emisijų.

Elektrolizė – cheminis procesas, kurio metu elektra skaidomas vanduo į vandenilį ir deguonį.

Vieneto savikaina (LCOH) – vidutinė vandenilio gamybos kaina per visą įrenginio eksploatavimo laikotarpį.

Atsinaujinantys energijos šaltiniai – gamtos šaltiniai, kurie atsinaujina natūraliai: saulė, vėjas, hidroenergija.

Dekarbonizacija – procesas, kurio metu mažinamos anglies dvideginio emisijos energetikos, pramonės ar transporto sektoriuose.

Kuro elementas – įrenginys, kuris tiesiogiai paverčia vandenilio cheminę energiją į elektros energiją.

Pilkojo vandenilio gamyba – vandenilio išgavimas iš iškastinio kuro, kurio metu išsiskiria anglies dioksido emisijos.

Mėlynojo vandenilio gamyba – vandenilio išgavimas iš iškastinio kuro, kai dalis anglies dioksido emisijų yra surenkama ir saugoma.

Jautrumo analizė – analizės metodas, leidžiantis įvertinti, kaip tam tikrų rodiklių pokyčiai daro įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams.

Įvadas

Visame pasaulyje vis labiau jaučiamas klimato kaitos poveikis: dažnėja ekstremalūs oro reiškiniai, kyla vidutinė temperatūra, tirpsta ledynai ir kyla jūros lygis. Šie reiškiniai skatina šalis susimąstyti ir imtis ryžtingų veiksmų, siekiant sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijas.

2015 m. gruodžio 12 d. Paryžiuje vykusioje Jungtinių Tautų klimato kaitos konferencijoje (COP21) buvo priimtas vienas svarbiausių tarptautinių susitarimų – Paryžiaus klimato susitarimas, skirtas kovai su klimato kaita. Susitarimą pasirašė 196 šalys, tarp jų Lietuva bei visos Europos Sąjungos narės ir net tokios šalys kaip JAV, Kinija, Indija, kurios yra pačios didžiausios pasaulio teršėjos [1]. Paryžiaus klimato susitarimas oficialiai įsigaliojo 2016 m. lapkričio 4 d., kai jį ratifikavo 55 šalys. Šio susitarimo tikslas – kad vidutinės pasaulio temperatūros didėjimas būtų gerokai mažesnis nei 2 °C, palyginti su iki pramoninio laikotarpio lygiu, dedant pastangas, kad temperatūros didėjimas neviršytų 1,5 °C, palyginti su iki pramoninio laikotarpio [2, 3].

Paryžiaus susitarimas buvo vienas reikšmingiausių ir plačiausiai palaikomų tarptautinių susitarimų kovos su klimato kaita istorijoje. Tai buvo svarbus žingsnis siekiant tvaresnės ateities bei suvienijęs beveik visas pasaulio valstybes bendram tikslui. Taip pat jis paskatino investicijas į atsinaujinančią energiją ir technologijas, kurios mažai išskiria anglies dioksido. Viena iš tokių sprendimų kryptį – vandenilio technologijos, kurios, pasak Tarptautinės energetikos agentūros, iki 2050 m. gali prisidėti prie maždaug 7 gigatonų CO₂ emisijų sumažinimo kasmet, o bendrai apie 20 % visų reikalingų emisijų mažinimų, reikalingų Paryžiaus susitarimo tikslams pasiekti [4, 5].

Vandenilis gali atlikti lemiamą vaidmenį ne tik energetikos, bet ir sunkiojo transporto, pramonės bei šilumos gamybos srityse. Pasak Tarptautinės energetikos agentūros, vandenilis ypač svarbus sektoriuose, kuriuose emisijas mažinti sudėtinga, pavyzdžiui, sunkiojo transporto ir pramonės sektoriuose, kur elektrifikacija nėra tinkama alternatyva [6]. Tačiau didžiausias iššūkis išlieka jo gamybos savikaina, priklausanti nuo naudojamų technologijų, elektros kainos bei kapitalo ir veiklos sąnaudų.

Darbo problema – žaliojo vandenilio gamyba aplinkai yra visiškai neutrali, tačiau jo gamybos sąnaudos išlieka didelės, o technologijos – skirtingai išvystytos. Todėl kyla klausimas, ar žaliojo vandenilio plėtra yra ekonomiškai efektyvi esamomis sąlygomis.

Tyrimo objektas – žaliojo vandenilio gamybos technologijos ir jų ekonominis pagrindumas.

Darbo tikslas – įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį pagrindumą, analizuojant naudojamą technologijas, jų plėtros kontekstą ir taikant ekonominio vertinimo metodiką.

Uždaviniai:

1. išnagrinėti žaliojo vandenilio gamybos technologijas, jų brandos lygį ir taikymo galimybes.
2. išanalizuoti žaliojo vandenilio plėtros kontekstą Europos Sąjungos ir nacionalinės energetikos politikos dokumentuose.
3. parengti žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo metodiką, pagrįstą svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) rodikliu.
4. atlikti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį vertinimą, apskaičiuojant svertinius vandenilio gamybos kaštus (LCOH) ir įvertinant pagrindinių parametru įtaką rezultatams.

5. įvertinti žaliojo vandenilio gamybos konkurencingumą ir pateikti išvadas dėl jo plėtros galimybių.

Darbo struktūra. Pirmojoje darbo dalyje atliekama literatūros analizė, kurioje nagrinėjamos žaliojo vandenilio gamybos technologijos, jų brandos lygis, tarptautinės ir nacionalinės strategijos bei rinkos ir aplinkosauginiai aspektai. Antrojoje darbo dalyje pateikiama tyrimo metodika, aprašomas žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo modelis ir taikomi analizės metodai. Trečiojoje darbo dalyje atliekamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas, analizuojami skirtingi scenarijai, atliekama jautrumo analizė bei vertinamas ekonominis ir aplinkosauginis efektyvumas.

Tyrimo metodai. Darbe taikyti šie tyrimo metodai: mokslinės literatūros analizė, leidžianti apžvelgti žaliojo vandenilio gamybos technologinius ir ekonominius aspektus; ekonominis vertinimas, skirtas žaliojo vandenilio savikainai (LCOH) apskaičiuoti; bei jautrumo analizė, leidžianti įvertinti pagrindinių veiksnių (elektros kainos, elektrolizatoriaus investicijų) įtaką galutinei vandenilio savikainai.

Darbo struktūra. Darbą sudaro 55 puslapiai, 7 paveikslai, 5 lentelės. Darbą sudaro įvadas, trys pagrindiniai skyriai, išvados ir literatūros sąrašas.

1. Žaliojo vandenilio gamybos technologijų ir ekonominių aspektų analizė

Šiame skyriuje nagrinėjami žaliojo vandenilio gamybos teoriniai aspektai, apimantys pagrindines technologijas, jų veikimo principus bei taikymo galimybes. Taip pat analizuojamos žaliojo vandenilio plėtros tendencijos, strateginiai dokumentai ir ekonominiai bei aplinkosauginiai veiksniai, lemiantys šios technologijos plėtrą. Skyriuje siekiama suformuoti teorinį pagrindą tolesniam žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam vertinimui atlikti.

1.1. Vandenilio rūšys pagal gamybos būdą

Vandenilis (lot. *hydrogenium*) – cheminis elementas periodinėje elementų lentelėje, žymimas H. Vandenilio atominis skaičius – 1, tai pats lengviausias ir labiausiai paplitęs elementas visatoje. Normaliomis sąlygomis tai bespalvės, bekvapės, itin degios dviatomės dujos. Vandenilis – sudedamoji vandens dalis, vandenilio yra kiekvienoje organinėje medžiagoje ir kiekviename organizme ir jis gali reaguoti su dauguma kitų elementų bei yra plačiausiai paplitęs cheminis elementas visatoje [7].

Vandenilis – tai universalus energijos nešiklis, tinkamas tiek jai kaupti, tiek transportuoti. Tačiau jo poveikis aplinkai ir ekonominis efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo pasirinkto gamybos būdo. Dėl šios priežasties vandenilis klasifikuojamas į skirtingas rūšis ir vis platesnė spalvų paletė apibūdina tą pačią bespalvę, bekvapę ir labai degią molekulę – vandenilį. Spalvinė klasifikacija nėra standartizuota, tačiau plačiai naudojama siekiant atskirti vandenilį pagal jo gamybos šaltinį ir poveikį aplinkai [8].

Vandenilio klasifikavimas pagal spalvas [9]:

- Juodas arba rudas vandenilis reiškia vandenilį, gautą dujojant anglį. Juoda ir ruda spalvos kartais nurodo anglies rūšį: bituminę (juodąją) ir lignitą (rudąją). Šis procesas sukelia didelį CO₂ išmetimą (19 tCO₂/tH₂).
- Pilkasis vandenilis – tai vandenilis, pagamintas iš iškastinio kuro, daugiausia garų dujų reformavimo arba anglies dujojimo būdu. Jis išskiria didelį CO₂ kiekį – nuo 10 iki 19 tonų CO₂ tCO₂/tH₂. Daugiau nei 95 % pasaulyje sunaudojamo vandenilio yra pilkasis vandenilis.
- Mėlynasis vandenilis daugiausia gaminamas iš gamtinių dujų garų riformingo būdu, kartu su anglies dioksido surinkimu ir saugojimu (CCS). Mėlynojo vandenilio anglies dioksido intensyvumas yra daug mažesnis nei pilkojo vandenilio – jo apytiksliai skaičiavimai svyruoja nuo 1 iki 4 tCO₂/tH₂. Nors CCS naudojimas padidina išlaidas, mėlynasis vandenilis išlieka pigiausia „švaria“ alternatyva pilkajam vandeniliui.
- Žaliasis arba atsinaujinantis vandenilis gaminamas iš atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip vėjo ir saulės energija, vandens elektrolizės būdu, kai elektrolizatorius suskaido vandens molekules į deguonį ir vandenilį. Gamybos proceso metu neišskiriamas CO₂. Šiandien žaliojo vandenilio kaina yra gerokai didesnė nei pilkojo vandenilio. Jis sudaro mažiau nei 0,1 % pasaulinės vandenilio gamybos.
- Geltonasis vandenilis reiškia žaliąjį vandenilį, pagamintą iš saulės energijos. Jis neišskiria CO₂. Apskaičiuota, kad geltonasis vandenilis vidutinės trukmės laikotarpiu gali tapti pigiausia atsinaujinančio vandenilio forma.

- Rožinis vandenilis gaminamas vandens elektrolizės būdu, naudojant branduolinę energiją – švarų, bet neatsinaujinantį energijos šaltinį, kuris neišskiria CO₂.
- Purpurinis vandenilis gaunamas elektrolizuojant vandenį naudojant branduolinę energiją ir šilumą.
- Raudonasis vandenilis gaunamas kataliziškai skaidant vandenį aukštoje temperatūroje, naudojant atominių elektrinių šilumą ir garus. Šiam procesui reikia daug mažiau elektros energijos nei tradicinei elektrolizei.
- Turkio spalvos vandenilis gaunamas iš gamtinių dujų metano pirolizės būdu. Šio proceso metu gamtinės dujos aukštoje temperatūroje skaidomos į vandenilį ir kietą anglį. Šiuo metu turkio spalvos vandenilis vis dar yra ankstyvojoje kūrimo stadijoje.
- Oranžinis vandenilis reiškia naujus procesus, kurių metu vandenilis gaminamas naudojant plastiko atliekas kaip žaliavą. Tai gali pasiūlyti sprendimą tiek švarios energijos problemai, tiek plastiko atliekų šalinimo klausimams. Oranžinis vandenilis vis dar yra ankstyvosiose kūrimo stadijose, o įvairios technologijos ir gamybos procesai, įskaitant pirolizę, mikrobangų katalizę ir fotoreformavimą, yra vertinami.
- Baltasis vandenilis, dar žinomas kaip natūralus vandenilis, natūraliai susidaro Žemės plutoje vykstant vandens molekulių ir geležies turinčių mineralų sąveikai aukštoje temperatūroje ir slėgyje. Vandeniui reaguojant su šiais mineralais, išsiskiria vandenilio dujos. Šiuo metu nėra jokių strategijų, kaip panaudoti šį vandenilį.

Įvairių vandenilio rūšių klasifikavimas pagal spalvas atspindi skirtingus jo gamybos būdus bei jų poveikį aplinkai. Nors vandenilio molekulė visais atvejais yra ta pati – bekvapė, bespalvė ir degi – gamybos metodai lemia jos emisijų kiekį, kainą ir tvarumo lygį. Labiausiai paplitęs vis dar išlieka iš kastingo kuro gaminamas vandenilis (vadinamasis pilkasis), kuris sudaro didžiąją dalį pasaulinės vandenilio gamybos. Jo gamyba, daugiausia vykdoma gamtinių dujų garų reformavimo būdu, išskiria apie 9–12 tonų CO₂ vienai tonai pagaminto vandenilio, priklausomai nuo technologijos ir regiono. [10]. O žaliojo, mėlynojo ir kitų alternatyvių rūšių vandenilis, ypač pagamintas naudojant atsinaujinančią ar branduolinę energiją, žymiai mažiau teršia arba iš viso neišskiria CO₂. Šių technologijų plėtra rodo, kad vandenilio spalvos ne tik apibūdina cheminius procesus, bet ir atspindi kryptį, kuria juda šiuolaikinė energetika – link švaresnių, klimatui neutralių sprendimų.

1.2. Žaliojo vandenilio plėtros tarptautinės strategijos

Atsižvelgdamos į klimato kaitos keliamus iššūkius ir būtinybę mažinti emisijas, daugelis pasaulio valstybių 2018–2020 m. pradėjo rengti nacionalines vandenilio strategijas. Europos Sąjunga, Japonija, Vokietija ir kitos šalys vis daugiau dėmesio skiria būtent žaliajam vandeniliui – kaip vienai iš svarbiausių ateities energetikos krypčių.

Šios strategijos rodo, kad žaliojo vandenilis tampa viena iš populiariausių technologinių alternatyvų bei labai svarbia nacionalinių energetikos politikų dalimi. Siekdamos sukurti tvarią, mažo anglies dioksido kiekio ekonomiką, valstybės kuria ilgalaikius planus, skiria finansavimą bei investuoja į infrastruktūrą, reikalingą vandenilio gamybai, transportavimui ir panaudojimui. Reikšmingiausios vandenilio strategijos, kurios daro įtaką tarptautinei ir regioninei vandenilio plėtrai – Europos

Sjungos vandenilio strategija (2020 m.), Vokietijos nacionalinė vandenilio strategija (2020 m.), Japonijos vandenilio kelio žemėlapis (angl. *Hydrogen Roadmap*).

Europos Sąjungos vandenilio strategija (2020 m.):

2020 m. liepos 8 d. Europos Komisija pristatė Europos vandenilio strategiją [11], kurioje žaliasis vandenilis įvardijamas kaip vienas pagrindinių įrankių siekiant klimato neutralumo iki 2050 metų. Ši strategija tapo svarbia Europos žaliojo kurso dalimi ir yra glaudžiai susijusi su siekiu transformuoti energetikos sistemą bei dekarbonizuoti sunkiai elektrifikuojamus pramonės sektorius. Joje numatyti trys pagrindiniai vystymosi etapai:

- 2020–2024 m. – remiama žaliojo vandenilio gamybos plėtra, ypač pasitelkiant elektrolizerius, kurių bendra galia siektų iki 6 GW, ir tikslas – pagaminti iki 1 milijono tonų žaliojo vandenilio per metus;
- 2025–2030 m. – vandenilis integruojamas į pramonės ir transporto sistemas, skatinant tarpvalstybinę infrastruktūrą, sandėliavimą ir rinkos vystymą. Elektrolizerių galia siektų bent 40 GW;
- po 2030 m. – žaliasis vandenilis tampa plačiai naudojama priemone daugelyje sektorių, įskaitant plieno, chemijos, aviacijos ir laivybos pramonę.

Strategijoje yra išskiriamos keturios pagrindinės veiksmų kryptys: investicijų skatinimas, paklausos ir gamybos didinimas, reguliacinės aplinkos kūrimas bei tarptautinis bendradarbiavimas. Numatant glaudų bendradarbiavimą su pramone buvo įkurtas Europos švaraus vandenilio aljansas (angl. *European Clean Hydrogen Alliance*), vienijantis pramonės įmones, investuotojus ir vyriausybes, siekiančias greitesnės vandenilio rinkos plėtros.

ES strategija pagrindinį dėmesį skiria žaliajam vandeniliui, išskiriant jį iš pilkojo ir mėlynojo, nes tik šis vandenilis atitinka ilgalaikį tikslą – visišką emisijų neutralumą.

Vokietijos nacionalinė vandenilio strategija (2020):

Vokietija paskelbė savo nacionalinę vandenilio strategiją 2020 metais [12]. Jos pagrindinis tikslas – tapti pirmaujančia šalimi vandenilio technologijų srityje. Strategija skiria prioritetą žaliajam vandeniliui, gaminamam iš atsinaujinančios elektros. Vokietija planuoja iki 2030 metų įrengti 10 GW elektrolizerių.

Valstybė paskyrė 9 mlrd. eurų investicijų, iš jų 2 mlrd. – tarptautiniam bendradarbiavimui. Strategijoje numatyta remti tyrimus, inovacijas, infrastruktūrą ir tarptautines tiekimo grandines. Pagrindiniai sektoriai, kuriuose planuojamas vandenilio naudojimas: plieno gamyba, chemijos pramonė, transportas ir energetika. Vokietija taip pat dalyvauja Europos vandenilio aljanso ir bendradarbiauja su ES kaimynėmis bei Afrikos šalimis.

Japonijos vandenilio strategija (atnaujinta 2023 m.):

Japonija buvo pirmoji šalis pasaulyje, kuri parengė vandenilio strategiją – dar 2017 metais. Ji buvo atnaujinta 2023 metais [13]. Strategijos tikslas – sukurti visą vandenilio tiekimo grandinę. Japonija daug dėmesio skiria vandenilio naudojimui transporto ir pramonės srityse. Viena iš svarbiausių kryptų – vandenilio degalų elementų (FCEV) plėtra. Japonija skatina naudoti vandenilį

automobiliuose, autobusų parkuose ir net traukiniuose. Šalis neturi pakankamai atsinaujinančių išteklių, todėl daug dėmesio skiria vandenilio importui. Planuojami ilgalaikiai tiekimai iš Australijos, kur vandenilis gaminamas naudojant saulės energiją. Japonija siekia, kad vandenilis padėtų sumažinti CO₂ emisijas ir padidinti energetinį saugumą.

Šių trijų šalių – Europos Sąjungos, Vokietijos ir Japonijos – strategijos parodo bendrą kryptį: vandenilis yra laikomas vienu iš pagrindinių energijos nešiklių siekiant ilgalaikės dekarbonizacijos, ypač sunkiai elektrifikuojamuose sektoriuose. Nors jų požiūris skiriasi pagal nacionalinius išteklius ir prioritetus, visos strategijos pabrėžia žaliojo vandenilio svarbą ir būtinybę plėtoti tiek vietinę gamybą, tiek tarptautinį bendradarbiavimą.

1.3. Žaliojo vandenilio plėtros gairės Lietuvoje

Nacionalinės vandenilio strategijos ir Europos Sąjungos tikslai rodo, kad vandenilis tampa svarbia ateities energetikos kryptimi. Lietuvoje 2022 m. patvirtintos ir vėliau atnaujintos Nacionalinės vandenilio technologijų plėtros gairės (2024–2050 m.) numato skatinti vandenilio gamybą iš atsinaujinančių energijos išteklių, plėtoti jo panaudojimą pramonės ir transporto srityse bei kurti konkurencingą vandenilio vertės grandinę [14].

Gairėse pabrėžiama, kad Lietuva turi palankias sąlygas vystyti šią technologiją – tai augantis atsinaujinančių energijos šaltinių kiekis, stipri elektros infrastruktūra bei didėjantis tarptautinių projektų skaičius.

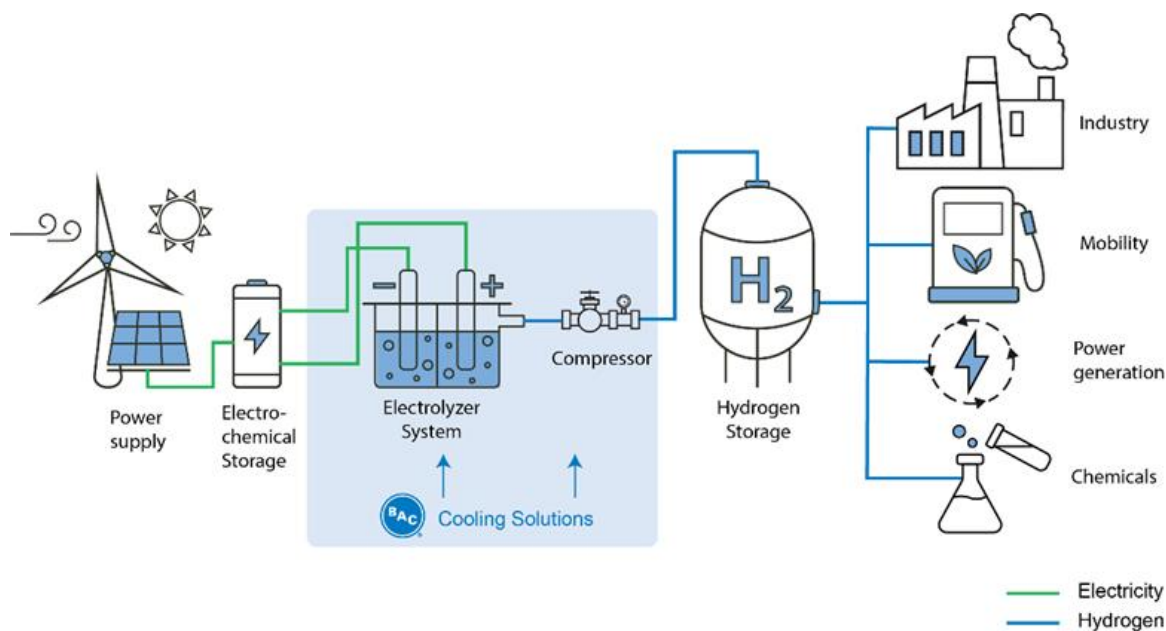
2022–2023 m. Lietuvoje buvo atlikti techniniai ir rinkos galimybių vertinimai, susiję su vandenilio technologijų plėtra. Vienas svarbiausių praktinių žingsnių – demonstracinių projektų finansavimas pagal Europos Sąjungos „Connecting Europe Facility“ (CEF) programą, pagal kurią skiriama daugiau nei 250 mln. eurų vandenilio infrastruktūros projektams vystyti Europoje [15]. Tai rodo, kad Lietuva, kaip ir kitos ES valstybės, pereina nuo strateginių dokumentų prie realios infrastruktūros kūrimo.

Pasak mokslinės analizės, vandenilio technologijos dažnai pradedamos diegti per pilotinius ir regioninius projektus, kurie leidžia testuoti jų pritaikomumą bei kurti rinkos pagrindus. Tokiu būdu net ir mažesnės valstybės gali pasinaudoti vandeniliu kaip inovacine niša, vystydamos projektus per viešojo ir privataus sektoriaus partnerystes [16].

Tačiau tiek Lietuvoje, tiek kitose šalyse žaliasis vandenilis susiduria su tuo pačiu iššūkiu – aukšta gamybos savikaina, kuri dažnai yra didesnė nei kitų energijos formų ar net pilkojo bei mėlynojo vandenilio. Dėl to būtina išsamiai išanalizuoti, kaip veikia žaliojo vandenilio gamybos technologijos, kas lemia jų sąnaudas ir kokiomis sąlygomis šis vandenilis galėtų tapti ekonomiškai pagrįstu sprendimu.

1.4. Žaliojo vandenilio gamybos technologijos

Žaliojo vandenilio gamyba apima įvairius technologinius sprendimus, kurių efektyvumas priklauso nuo taikomo gamybos metodo, energijos šaltinio bei sąnaudų struktūros. Vienas pagrindinių būdų – vandens elektrolizė, kai naudojant elektros energiją vanduo suskaidomas į vandenilį ir deguonį. 1 pav. pavaizduota supaprastinta žaliojo vandenilio gamybos ir panaudojimo schema, paremta vandens elektrolize, naudojant atsinaujinančią energiją.



1 pav. Žaliojo vandenilio technologijos schema [17]

Šiame skyriuje aptariamos pagrindinės žaliojo vandenilio gamybos technologijos, ypatingą dėmesį skiriant vandens elektrolizei. Nagrinėjami skirtingi elektrolizės tipai, jų veikimo principai, privalumai ir trūkumai, taip pat ekonominiai veiksniai, turintys įtakos gamybos efektyvumui ir kainai.

Ši analizė sudarys pagrindą tolesniam vertinimui atlikti – kiek realiai konkurencinga gali būti žaliaji vandenilį gaminanti technologija, palyginti su kitais vandenilio šaltiniais ar įprastais energijos nešikliais.

Elektrolizė yra pagrindinis žaliojo vandenilio gamybos metodas. Tai procesas, kurio metu vandens molekulės (H_2O) yra suskaidomos į deguonį (O_2) ir vandenilį (H_2), panaudojant elektros energiją. Reakcija vyksta elektrolizatoriuje – įrenginyje, kuris atlieka elektros srovės perdavimą per vandenį arba elektrolitą.

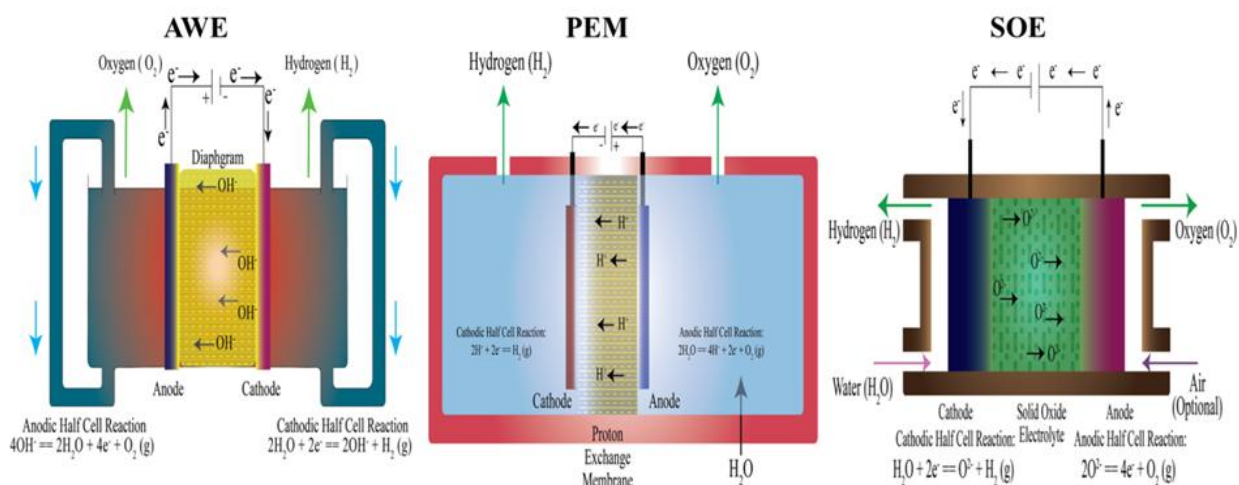
Kai ši elektros energija yra gaunama iš atsinaujinančių energijos išteklių, tokių kaip saulės ar vėjo jėgainės, pagamintas vandenilis laikomas žaliuoju. Tai vienintelis būdas gaminti vandenilį be šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų.

Elektrolizė susideda iš dviejų pagrindinių pusreakcijų: katodo reakcijos, kurioje išskiriamas vandenilis, ir anodo reakcijos, kurioje išsiskiria deguonis. Šios reakcijos skirtingai vyksta priklausomai nuo elektrolizerio tipo – naudojamo elektrolito, membranos ar temperatūros.

Pagrindiniai elektrolizės tipai yra:

- Šarminė elektrolizė (AEL) – tai seniausia ir labiausiai išvystyta elektrolizės technologija. Ji grindžiama vandeniniais hidroksido tirpalais, kurie veikia kaip jonams laidus elektrolitas, praktikoje naudojamas kalio hidroksidas. Šis vandeninis šarminis elektrolitas teka per elementą, kurio anodas (deguonį gaminantis) ir katodas (vandenilį gaminantis) yra atskirti porėta medžiaga, užpildyta vandeniniu elektrolitu [18]. Šarminiai elektrolizatoriai pasižymi ilgaamžiškumu ir palyginti mažomis sąnaudomis, tačiau jų efektyvumas ir galimybė greitai reaguoti į elektros energijos tiekimo svyravimus yra riboti.

- Protonų mainų membranos (PEM) elektrolizė. PEM elektrolizės elemente skystas vanduo tiekiamas į anodą, kur jis suskaidomas į deguonį ir protonus. PEM leidžia protonams migruoti į katodo pusę, kur jie redukuojami į vandenilį. Kadangi PEM yra tanki membrana, paprastai pagaminta iš perfluorosulfonrūgšties (PFSA) polimerų, anodo ir katodo skyriai gali veikti esant skirtingam slėgiui abiejose pusėse. PEM elektrolizeriai pasižymi dideliu efektyvumu, kompaktišku dizainu ir gebėjimu greitai reaguoti į elektros energijos tiekimo pokyčius. Tačiau jų gamybos sąnaudos yra didesnės dėl brangių medžiagų, tokių kaip platina, naudojimo [19].
- Kietųjų oksidų elektrolizė (SOEC) grindžiama kieta, tankia keramikos oksidų membranine atskyrimo medžiaga, kuri aukštoje temperatūroje praleidžia jonus. Oksidų jonų laidininkai yra labiausiai paplitę ir yra labiau išstobulinti technologiniu požiūriu, tačiau protonams laidžios oksidų medžiagos gali sumažinti šių įrenginių veikimo temperatūros diapazoną, todėl jos taip pat tiriamos. Šie keramikos pagrindu pagaminti elektrolizatoriai nereikalauja jokių retų ir brangių medžiagų, paprastai veikia labai aukštoje temperatūroje (daugiau nei 600 °C), kurioje gali veikti itin efektyviai ir beveik atvirkščiai. Per pastaruosius kelis dešimtmečius kietųjų oksidų kuro elementai (SOFC) pasiekė reikšmingą pažangą, o kietųjų oksidų elektrolizė gali pasinaudoti SOFC technologijų ir gamybos pažanga [20].



2 pav. Vandens elektrolizės skirtingi metodai [21]

Remiantis mokslinės apžvalgos analize, visos šios technologijos, pavaizduotos 2 pav., pasižymi skirtingomis sąnaudomis, efektyvumu ir brandos lygiu. PEM ir AEL yra jau komerciškai taikomos, o SOEC dar reikalauja tyrimų ir bandymų, nors ilginiui gali pasiekti didžiausią grąžą efektyvumo prasme [8; 18].

Norint suprasti žaliojo vandenilio plėtos ekonominį pagrindumą, būtina palyginti šias technologijas iš techninės ir ekonominės perspektyvos.

Lietuvoje šiuo metu pradėti įgyvendinti du žaliojo vandenilio gamybos projektai, kurie yra bendrai finansuojami Europos Sąjungos lėšomis. Abiejuose projektuose pasirinkta naudoti PEM tipo elektrolizės technologiją dėl jos lankstumo, efektyvumo ir tinkamumo integracijai su atsinaujinančių energijos šaltinių sistemomis. Tai rodo, kad PEM technologija tampa ne tik teoriškai patrauklia, bet ir praktiškai diegiama Lietuvoje, siekiant kurti inovatyvią bei beemisę energetikos infrastruktūrą.

Projektai paskelbti viešai 2024 m. ir finansuojami pagal „Connecting Europe Facility (CEF)“ programą [22, 23].

Skirtingos elektrolizės technologijos pasižymi nevienodu efektyvumu, kaina ir pritaikymo galimybėmis. Tiek tarptautinėje, tiek Lietuvos praktikoje matyti, kad vis didesnis dėmesys skiriamas PEM elektrolizės technologijai dėl jos lankstumo ir tinkamumo integruoti su atsinaujinančiais energijos šaltiniais.

Norint objektyviai įvertinti technologijų tinkamumą ir ekonominį pagrįstumą, būtina jas palyginti pagal svarbiausius techninius ir ekonominius parametrus.

Technologijų brandos lygis (angl. *Technology Readiness Level*, TRL) – tai devynių pakopų skalė, naudojama įvertinti technologijos vystymosi stadiją – nuo pirminių mokslinių tyrimų iki visiško komercinio taikymo. Ši skalė plačiai taikoma Europos Sąjungos mokslinių tyrimų ir inovacijų programose, tokiose kaip „Horizon 2020“ ir „Horizon Europe“, siekiant nustatyti technologijų pasirengimą rinkai ir atitinkamai paskirstyti finansavimą [24; 25].

TRL skalė apima šiuos lygius [24]:

TRL 1: Pagrindinių principų stebėjimas.

TRL 2: Technologinės koncepcijos formulavimas.

TRL 3: Eksperimentinis koncepcijos patvirtinimas.

TRL 4: Technologijos validavimas laboratorinėmis sąlygomis.

TRL 5: Technologijos validavimas atitinkamoje aplinkoje.

TRL 6: Technologijos demonstravimas atitinkamoje aplinkoje.

TRL 7: Sistemos prototipo demonstravimas operacinėje aplinkoje.

TRL 8: Galutinės sistemos kvalifikavimas.

TRL 9: Technologijos įrodymas operacinėje aplinkoje.



3 pav. Technologijų brandos lygio skalė [26]

Ši skalė padeda vieningai vertinti technologijų brandą ir yra naudinga tiek mokslininkams, tiek investuotojams bei politikos formuotojams. Šiame tyrime TRL taikoma siekiant palyginti pagrindines žaliojo vandenilio gamybos technologijas (PEM, AEL, SOEC) pagal jų vystymosi stadiją ir praktinio pritaikymo galimybes. Tai leidžia objektyviau įvertinti, kurios dar reikalauja tyrimų.

Kalbant apie elektrolizės technologijas, visos trys pagrindinės rūšys pasižymi skirtingu brandos lygiu. Šarminė (AEL) yra labiausiai išvystyta ir jau plačiai taikoma pramonėje, todėl jos technologinis parengtumo lygis (TRL) siekia 9. Protonų mainų membranos (PEM) elektrolizė taip pat yra pasiekusi TRL 9, tačiau vis dar aktyviai tobulinama – siekiama sumažinti komponentų kainą ir pagerinti efektyvumą. O kietojo oksido elektrolizė (SOEC) tebėra vystymo stadijoje ir šiuo metu atitinka TRL 6–7, nes dar atliekami demonstraciniai bandymai.

1 lentelė. Technologijų palyginimas [8; 10; 18]

Technologija	Efektyvumas (%)	Temperatūra (°C)	Reagavimo greitis	Kaina (Eur/kW)	Brandos lygis	Pritaikymas
Šarminė (AEL)	65–70 %	60–80	Lėtas	~500–1 000	Brandus	Tradicinis
PEM	70–80 %	50–80	Greitas	~1 000–1 800	Augantis	Lietuvoje diegiamas
SOEC	80–90 %	700–1 000	Vidutinis	>2 000	Tyrimų lygmuo	Pramonės šilumos šaltiniai

Technologijų brandos lygis (TRL) padeda įvertinti, ar žaliojo vandenilio gamybos technologijos yra tinkamos taikyti praktikoje ir kokio masto investicijų bei tolesnių tyrimų jos dar reikalauja. Tačiau vien technologinė branda negarantuoja sėkmingos plėtros. Elektrolizės technologijos – nors ir svarbiausias žaliojo vandenilio gamybos pagrindas – siekiant jas plačiai taikyti, turi būti ne tik techniškai efektyvios, bet ir ekonomiškai pagrįstos.

Gamybos kaina, priklausanti nuo pasirinktų technologijų, elektros šaltinio bei investicinių ir veiklos sąnaudų, tampa pagrindiniu kriterijumi vertinant konkurencingumą rinkoje. Todėl tolesnėje darbo dalyje nagrinėjami pagrindiniai žaliojo vandenilio gamybos ekonominiai aspektai: sąnaudų struktūra, kapitalo ir veiklos išlaidos bei vieneto savikaina.

1.5. Pasaulinė ir regioninės žaliojo vandenilio rinkos

Žaliojo vandenilio rinka visame pasaulyje sparčiai auga kaip būtinybė mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas energetikos, transporto ir pramonės srityse. Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) duomenimis, 2023 m. pasaulinė vandenilio paklausa siekė apie 95 mln. tonų, tačiau mažiau nei 1 % šio kiekio buvo pagaminta iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Tai rodo didelį žaliojo vandenilio plėtros potencialą [27].

Prognozuojama, kad iki 2030 m. vandenilio paklausa pasaulyje padidės nuo 95 mln. tonų iki daugiau nei 175 mln. tonų per metus. Remiantis „Hydrogen Council“ ir „McKinsey & Company“ ataskaita, bendra investicijų į vandenilio vertės grandinę apimtis gali viršyti 570 mlrd. JAV dolerių, iš kurių daugiau kaip 70 % numatoma skirti žaliojo vandenilio plėtrai. Didžiausi šuoliai šioje srityje fiksuojami Šiaurės Europoje, Persijos įlankos šalyse, Australijoje, Kanadoje ir Jungtinėse Amerikos Valstijose, kur plėtojami stambūs projektai, integruojami į energijos tiekimo ir eksporto infrastruktūrą [28].

Europoje žaliojo vandenilio plėtra glaudžiai siejama su ES klimato tikslais. Remiantis „REPowerEU“ komunikatu, Europos Komisija tikisi iki 2030 m. pasiekti 10 mln. t žaliojo vandenilio gamybą ES viduje ir dar 10 mln. t importą iš trečiųjų šalių [29]. Papildomai įsteigtas Europos vandenilio bankas, kurio tikslas – subalansuoti rinką ir skatinti ilgalaikes investicijas per EEG aukcionus ir subsidijas.

Lietuvoje žaliojo vandenilio rinka dar tik pradeda formuotis, tačiau jau vykdomi konkretūs žingsniai jos link. Europos Komisijos „Connecting Europe Facility“ (CEF) programos lėšomis finansuojami demonstraciniai projektai, kuriuose taikoma PEM tipo elektrolizė, rodo šalies įsitraukimą į bendrą Europos vandenilio infrastruktūros plėtrą. Tai leidžia Lietuvai įgyti praktinės patirties integruojant inovatyvias technologijas ir kurti pagrindus tolesnei žaliojo vandenilio plėtrai [30].

Tiek pasaulinėje, tiek regioninėse rinkose žaliojo vandenilio konkurencingumą lems jo gamybos kaina, infrastruktūros išvystymas ir politinis reguliavimas. Kol kas pagrindiniai rinkos žaidėjai – valstybės su stipria atsinaujinančios energijos baze ir ilgalaikė strategine vizija.

1.6. Žaliojo vandenilio aplinkosauginiai aspektai

Žaliojo vandenilio gamyba yra laikoma vienu iš pagrindinių įrankių pereinant prie klimatu neutralios energetikos sistemos. Skirtingai nei pilkasis ar mėlynasis vandenilis, kurie gaminami iš iškastinio kuro ir susiję su šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijomis, žaliojo vandenilio gamyboje nėra išskiriamas anglies dioksidas. Jis gaminamas elektrolizės būdu, naudojant tik vandenį ir elektros energiją iš atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip saulė, vėjas ar hidroenergija.

Vienas pagrindinių šios technologijos privalumų – nulinės tiesioginės emisijos tiek gamybos, tiek naudojimo metu. Vandenilį deginant arba naudojant kuro elementuose, galutinis produktas yra tik vandens garai. Tai leidžia vandeniliui pakeisti iškastinį kurą tose srityse, kur anglies dvideginio mažinimas yra sudėtingas, pavyzdžiui, sunkiujų transporto priemonių, pramonės procesų ar energijos kaupimo.

Tarptautinė energetikos agentūra (IEA) pažymi, kad vandenilis gali atlikti svarbų vaidmenį mažinant emisijas energetikos, transporto ir pramonės sektoriuose. „Hydrogen Council“ vertinimu, vandenilio technologijos iki 2050 m. gali padėti sumažinti apie 80 Gt CO₂ emisijų ir sudaryti iki 20 % visų reikalingų emisijų mažinimų siekiant 1,5 °C klimato tikslo (*Hydrogen Council*, 2021) [31].

Tačiau aplinkosauginė nauda tiesiogiai priklauso nuo naudojamos elektros šaltinio. Jei elektrolizė būtų vykdoma naudojant elektrą iš neatsinaujančių šaltinių, gamybos poveikis aplinkai būtų gerokai didesnis. Todėl svarbu užtikrinti, kad visa žaliojo vandenilio gamybos grandinė būtų pagrįsta tvariais energijos šaltiniais.

Be klimato kaitos mažinimo, žaliojo vandenilio gamyba ir naudojimas padeda sumažinti oro taršą miestuose, mažina priklausomybę nuo importuojamo iškastinio kuro ir skatina inovatyvios, žiedinės ekonomikos kūrimą.

1.7. Žaliojo vandenilio ekonominiai aspektai ir tendencijos

Augantis dėmesys žaliojo vandenilio gamybai susijęs ne tik su aplinkosauginiais tikslais, bet ir su siekiu sukurti ekonomiškai konkurencingą alternatyvą iškastiniam kurui bei kitoms vandenilio rūšims. Nors žaliojo vandenilio nauda aplinkai neabejotina, šio energijos šaltinio gamyba išlieka brangi ir reikalaujanti didelių investicijų.

Todėl vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių jo įsitvirtinimą rinkoje, yra gamybos sąnaudų analizė. Šiame skyriuje nagrinėjami pagrindiniai ekonominiai aspektai: kapitalo (CAPEX) ir veiklos (OPEX) sąnaudos, elektros energijos įtaka bendrai kainai, taip pat pateikiama vieneto savikainos – LCOH (angl. *Levelized Cost of Hydrogen*) – samprata ir taikymas.

Remiantis šia analize galima įvertinti, kiek ekonomiškai pagrįsta plėtoti žaliąjį vandenilį Lietuvoje ir pasaulyje bei kokios prielaidos lemtų jo konkurencingumą artimiausioje ateityje.

Žaliojo vandenilio gamybos ekonominį pagrįstumą lemia dvi pagrindinės sąnaudų kategorijos: kapitalo investicijos (CAPEX) ir veiklos sąnaudos (OPEX). Šios išlaidos tiesiogiai veikia galutinę vandenilio gamybos kainą ir lemia, ar projektas gali būti ekonomiškai gyvybingas.

CAPEX (angl. *Capital Expenditures*) apima visas pradines investicijas, reikalingas įrenginių statybai ir technologijoms įsigyti. Tai apima elektrolizerio, atsinaujinančius energijos šaltinius (jei jie integruoti), elektros keitiklius, akumuliatorines sistemas bei infrastruktūros prijungimą prie tinklo.

Remiantis Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) duomenimis, PEM ir šarminių elektrolizerių CAPEX vidutiniškai siekia nuo 2 000 iki 2 450 USD/kW (apie 1 850–2 250 EUR/kW), priklausomai nuo projekto apimties ir regiono [31; 32].

OPEX (angl. *Operational Expenditures*) – tai nuolatinės eksploataavimo išlaidos: elektros energija, vanduo, įrangos priežiūra, darbo užmokestis ir kitos veiklos sąnaudos.

Matyti, kad elektros energija sudaro didžiausią dalį žaliojo vandenilio gamybos sąnaudų – ji gali sudaryti apie 60–75 % visų OPEX. Todėl itin svarbus tampa elektros tiekimo šaltinis ir jo kaina – pigios atsinaujinančios energijos naudojimas leidžia reikšmingai sumažinti vandenilio gamybos savikainą [33].

Tiksli CAPEX ir OPEX analizė yra būtina norint įvertinti žaliojo vandenilio konkurencingumą bei optimizavimo galimybes projektavimo etape.

1.8. Literatūros analizės apibendrinimas

Atlikta literatūros analizė atskleidžia, kad žaliojo vandenilio technologijos tampa strategiškai svarbiu sprendimu siekiant klimatui neutralios ekonomikos. Tarptautinės ir nacionalinės strategijos rodo augantį dėmesį šiam energijos šaltiniui, ypač jo potencialui dekarbonizuoti sunkiai elektrifikuojamus sektorius. Technologinė pažanga, ypač PEM ir AEL elektrolizės srityse, rodo vis didesnę praktinę pritaikomumą, tačiau aukštos gamybos sąnaudos tebėra esminė kliūtis.

Literatūros analizėje identifikuoti pagrindiniai iššūkiai – didelės kapitalo investicijos, elektros energijos kainos įtaka gamybos sąnaudoms, infrastruktūros trūkumas – sudaro pagrindą mokslinei problemai. Nors žaliasis vandenilis aplinkai yra visiškai neutralus, jo ekonominis pagrindumas išlieka neaiškus. Todėl šiame tyrime keliamą problema – ar esamomis technologinėmis ir ekonominėmis sąlygomis žaliojo vandenilio gamyba gali būti laikoma konkurencinga alternatyva kitoms energijos formoms. Šios problemos analizė yra itin aktuali tiek energetikos transformacijos kontekste, tiek formuojant ilgalaikes investicines kryptis mažose valstybėse, tokiose kaip Lietuva.

2. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo metodika

Šiame skyriuje pateikiamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo metodologinis pagrindas. Aprašomas tyrimo pobūdis, taikomi analizės metodai ir pagrindiniai vertinimo rodikliai. Taip pat suformuojamas ekonominio vertinimo modelis, kuriuo remiantis bus atliekamas empirinio tyrimo etapas. Skyriaus tikslas – pagrįsti pasirinktą metodiką ir sudaryti nuoseklų pagrindą tolesniam žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam vertinimui atlikti.

2.1. Tyrimo pobūdis ir logika

Šiame baigiamajame darbe atliekamas taikomojo pobūdžio tyrimas, kurio pagrindinis tikslas – įvertinti žaliojo vandenilio gamybos technologijų ekonominį pagrįstumą ir jų konkurencingumą energetikos sektoriuje. Tyrimas orientuotas ne vien į teorinių prielaidų nagrinėjimą, bet ir į jų pritaikymą praktinėmis ekonominėmis sąlygomis, kurios lemia realius investicinius sprendimus. Dėl šios priežasties darbe ypatingas dėmesys skiriamas ne tik technologiniams sprendimams, bet ir jų ekonominėms pasekmėms.

Tyrimo taikomasis pobūdis pasirinktas atsižvelgiant į tai, kad žaliojo vandenilio technologijos jau yra pradėtos diegti praktikoje, tačiau jų ekonominis efektyvumas vis dar išlieka diskusijų objektu. Mokslinėje literatūroje ir energetikos politikos formavimo procese pabrėžiama, jog žaliojo vandenilio gamyba pasižymi reikšminga aplinkosaugine nauda, tačiau jos plėtrą šiuo metu riboja aukštos pradinės investicijos, didelės veiklos sąnaudos bei ryški priklausomybė nuo elektros energijos kainos. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad technologinio sprendimo pasirinkimas turi būti grindžiamas ne tik jo techninėmis savybėmis, bet ir ekonominiu vertinimu, apimančiu sąnaudas, kainos formavimąsi ir konkurencingumą [34].

Atsižvelgiant į tai, tyrimas grindžiamas nuosekliu analitiniu ir lyginamuoju požiūriu, leidžiančiu susieti teorinėje darbo dalyje apžvelgtas technologines ir ekonomines tendencijas su konkrečiu ekonominiu vertinimu. Teorinėje dalyje atlikta literatūros analizė sudaro pagrindą identifikuoti pagrindinius veiksnius, darančius įtaką žaliojo vandenilio gamybos sąnaudoms ir konkurencingumui. Šie veiksniai vėliau struktūrizuojami metodologinėje dalyje ir pritaikomi ekonominio vertinimo modeliui sudaryti, siekiant užtikrinti tyrimo nuoseklumą ir logišką struktūrą.

Atliekant tyrimą pagrindinis dėmesys skiriamas kapitalo investicijoms (CAPEX), veiklos sąnaudoms (OPEX) ir svertiniams žaliojo vandenilio gamybos kaštams (LCOH – angl. *Levelized Cost of Hydrogen*). Šie rodikliai laikomi esminiais vertinant žaliojo vandenilio gamybos ekonominį pagrįstumą, nes jie leidžia įvertinti ne tik pradinį investicijų poreikį, bet ir ilgalaikes gamybos sąnaudas per visą technologijos eksploatavimo laikotarpį. LCOH rodiklis pasirinktas kaip pagrindinis ekonominis indikatorius dėl to, kad jis suteikia galimybę palyginti skirtingas vandenilio gamybos technologijas tarpusavyje, nepriklausomai nuo jų masto ar taikymo sąlygų [34; 28].

Svarbi tyrimo logikos dalis – teorijos ir praktikos integracija. Be tarptautinių ir nacionalinių statistinių bei analitinių šaltinių analizės, darbe nagrinėjamas konkretus atvejis, susijęs su AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomu žaliojo vandenilio gamybos projektu. Šis projektas, finansuojamas Europos Sąjungos „Connecting Europe Facility“ (CEF) programos lėšomis, suteikia galimybę pritaikyti teorinius ekonominio vertinimo modelius realiame Lietuvos kontekste ir patikrinti jų praktinį tinkamumą. Tokiu būdu tyrimas įgauna ne tik teorinę, bet ir aiškia praktinę reikšmę [35].

Tyrimo eiga organizuojama nuosekliai, pereinant nuo technologinių ir ekonominių parametų identifikavimo prie išsamesnio ekonominio vertinimo. Pirmiausia nustatomi pagrindiniai technologiniai ir finansiniai rodikliai, vėliau atliekami žaliojo vandenilio gamybos sąnaudų skaičiavimai ir ekonominis vertinimas. Toliau numatoma jautrumo analizė, leidžianti įvertinti, kaip pagrindinių prielaidų, ypač elektros energijos kainos, pokyčiai veikia galutinę vandenilio gamybos savikainą. Galiausiai atliekama lyginamoji analizė su kitomis vandenilio gamybos rūšimis, siekiant įvertinti žaliojo vandenilio konkurencingumą rinkoje.

Tyrimo logika grindžiama sisteminiu požiūriu, kai technologiniai, ekonominiai ir rinkos veiksniai vertinami kaip tarpusavyje susijusi visuma. Toks požiūris leidžia ne tik įvertinti dabartinį žaliojo vandenilio gamybos ekonominį potencialą, bet ir sudaro pagrindą tolesnei analizei, kurios rezultatai bus pateikti tiriamojoje darbo dalyje.

2.2. Tyrimo metodai

Siekiant įgyvendinti baigiamojo darbo tikslą ir pagrįstai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį pagrįstumą, tyrime taikomi tarpusavyje derinami analizės ir vertinimo metodai. Metodų pasirinkimas nėra atsitiktinis – jis grindžiamas tyrimo objektu, keliamais uždaviniais bei energetikos ekonomikos srityje plačiai taikoma mokslinė praktika. Pasirinkti metodai leidžia nuosekliai pereiti nuo teorinių prielaidų prie praktinio ekonominio vertinimo ir sudaro pagrindą gautų rezultatų interpretacijai.

Šiame tyrime taikomi analitinis ir lyginamasis metodai, ekonominis modeliavimas, paremtas svertinių žaliojo vandenilio gamybos kaštų rodiklio (LCOH) skaičiavimu, bei jautrumo analizė. Šių metodų derinimas leidžia kompleksiskai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos technologijas ne tik technologiniu, bet ir ekonominiu požiūriu, atsižvelgiant į skirtingas rinkos ir sąnaudų prielaidas.

2.2.1. Analitinis metodas

Analitinis metodas yra vienas pagrindinių moksliniuose tyrimuose taikomų metodų, ypač energetikos, ekonomikos ir technologijų analizės srityse. Šio metodo esmė – sistemingas esamos informacijos rinkimas, struktūrizavimas ir kritinis vertinimas, siekiant išskirti pagrindines tendencijas, dėsningumus ir tarpusavio ryšius tarp nagrinėjamų reiškinių.

Šiame darbe analitinis metodas taikomas nagrinėjant mokslinę literatūrą, tarptautinių organizacijų ataskaitas bei strateginius dokumentus, susijusius su žaliojo vandenilio gamyba. Naudojant šį metodą identifikuojami pagrindiniai technologiniai ir ekonominiai veiksniai, darantys įtaką žaliojo vandenilio gamybos sąnaudoms, tokie kaip elektrolizės technologijų efektyvumas, kapitalo investicijų poreikis, veiklos sąnaudų struktūra ir elektros energijos kainų reikšmė [34; 28].

Analitinis metodas leidžia susieti teorinėje darbo dalyje aptartas technologijas su jų ekonomiais aspektais ir sudaro pagrindą tolesniam metodologiniam vertinimui atlikti. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad šio metodo taikymas leidžia atrinkti tuos parametrus, kurie yra esminiai ekonominiam modeliui sudaryti ir vėliau naudojami skaičiavimų procese. Tokiu būdu užtikrinamas tyrimo nuoseklumas ir metodinis pagrįstumas.

2.2.2. Lyginamasis metodas

Lyginamasis metodas taikomas siekiant įvertinti žaliojo vandenilio gamybos konkurencingumą kitų vandenilio gamybos rūšių atžvilgiu. Energetikos sektoriuje technologijos paprastai vertinamos ne izoliuotai, o lyginant skirtingas alternatyvas pagal vienodus kriterijus, todėl šis metodas yra itin svarbus.

Šiame tyrime lyginamasis metodas naudojamas analizuojant žaliojo, pilkojo ir mėlynojo vandenilio gamybos ekonominius rodiklius bei sąnaudų struktūrą. Tokia analizė leidžia nustatyti, ar žaliojo vandenilio gamyba gali būti laikoma konkurencinga esamomis rinkos sąlygomis, taip pat įvertinti, kokiomis aplinkybėmis jos ekonominis patrauklumas didėja arba mažėja [36].

Taikant lyginamąjį metodą skirtingos vandenilio gamybos technologijos lyginamos pagal ekonominius ir technologinius kriterijus, apimančius gamybos savikainą, priklausomybę nuo energijos šaltinių kainų, emisijų intensyvumą ir technologinį brandos lygį. Be to, šis metodas taikomas vertinant skirtingas elektrolizės technologijas (AEL, PEM ir SOEC), atsižvelgiant į jų efektyvumą, investicinius poreikius ir pritaikymo galimybes. Toks palyginimas leidžia ne tik įvertinti esamą padėtį, bet ir pagrįsti tolesnės analizės kryptį.

2.2.3. Ekonominis modeliavimas taikant svvertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) rodiklį

Vienas svarbiausių šiame tyrime taikomų metodų yra ekonominis modeliavimas, paremtas svvertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) skaičiavimu. Šis rodiklis plačiai taikomas tarptautiniuose energetikos tyrimuose, nes leidžia įvertinti vidutinę vandenilio gamybos kainą per visą technologijos eksploatavimo laikotarpį [37]. LCOH metodas apima tiek kapitalo investicijas (CAPEX), reikalingas technologijoms įsigyti ir įrengti, tiek veiklos sąnaudas (OPEX), patiriamas per visą projekto gyvavimo ciklą. Šios sąnaudos paskirstomos proporcingai pagamintam vandenilio kiekiui, taip gaunant vieningą ir palyginamą ekonominį rodiklį [34; 37].

Šio rodiklio pasirinkimas grindžiamas tuo, kad jis leidžia palyginti skirtingas technologijas nepriklausomai nuo jų masto, finansavimo struktūros ar eksploatavimo trukmės. Be to, LCOH ypač tinkamas vertinant ilgalaikius energetikos projektus, kuriuose investiciniai sprendimai priimami remiantis ne trumpalaikėmis, o viso gyvavimo sąnaudomis. Praktiniu požiūriu tai suteikia galimybę objektyviai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį potencialą.

Žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas šiame tyrime atliekamas taikant svvertinių vandenilio gamybos kaštų rodiklį (LCOH), kuris apskaičiuojamas kaip diskontuotų visų projekto sąnaudų ir diskontuoto per visą laikotarpį pagaminto vandenilio kiekio santykis. LCOH skaičiavimo formulė (1) pateikiama toliau, remiantis Europos vandenilio observatorijos taikoma metodika [38]:

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{H_{2,t}}{(1+r)^t}}; \quad (1)$$

čia: $CAPEX_t$ – kapitalo investicijos t -aisiais metais (EUR);

$OPEX_t$ – veiklos ir priežiūros sąnaudos t -aisiais metais (EUR);

$H_{2,t}$ – t -aisiais metais pagamintas vandenilio kiekis (kg);

r – diskonto norma;

n – technologijos eksploatavimo laikotarpis (metais).

Ši formulė leidžia įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį pagrįstumą, atsižvelgiant į laiko veiksnį ir skirtingų sąnaudų struktūrą, ir apskaičiuoti vidutinę vieneto savikainą per visą projekto gyvavimo laikotarpį, sudarant pagrindą lyginamajai analizei su kitomis vandenilio gamybos technologijomis [39].

2.2.4. Jautrumo analizė

Energetikos sektoriaus ekonominiai vertinimai pasižymi dideliu neapibrėžtumu, todėl vien bazinio scenarijaus analizė nėra pakankama. Dėl šios priežasties šiame tyrime taikoma jautrumo analizė, leidžianti įvertinti, kaip pagrindinių ekonominių ir technologinių rodiklių pokyčiai daro įtaką žaliojo vandenilio gamybos savikainai.

Jautrumo analizės metu keičiami svarbiausi kintamieji, tokie kaip elektros energijos kaina, elektrolizatoriaus efektyvumas, kapitalo investicijų dydis ir eksploatavimo trukmė. Šių parametru pasirinkimas grindžiamas jų reikšminga įtaka galutiniam LCOH rodikliui, kurią pabrėžia ir mokslinė literatūra [36].

Šio metodo taikymas leidžia identifikuoti kritinius veiksnius, nuo kurių labiausiai priklauso žaliojo vandenilio gamybos ekonominis pagrįstumas, ir įvertinti galimus alternatyvius bei rizikos scenarijus. Tai padidina tyrimo rezultatų patikimumą ir leidžia išvengti vienpusiško ekonominio vertinimo.

2.3. Tyrimo duomenų šaltiniai ir jų pagrįstumas

Siekiant užtikrinti tyrimo patikimumą, objektyvumą ir gautų rezultatų pagrįstumą, šiame darbe naudojami įvairūs tarptautiniai, nacionaliniai ir empiriniai duomenų šaltiniai. Duomenų šaltinių įvairovė pasirinkta sąmoningai, siekiant kompleksiskai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį pagrįstumą ir sumažinti vieno informacijos šaltinio ribotumo įtaką tyrimo rezultatams.

Tyrime naudojami duomenys pagal savo pobūdį skirstomi į tris pagrindines grupes: tarptautinių organizacijų ir mokslinių institucijų pateikiamus duomenis, nacionalinius strateginius ir planavimo dokumentus bei empirinius projekto duomenis, susijusius su konkrečiu žaliojo vandenilio gamybos projektu. Toks šaltinių grupavimas leidžia nuosekliai derinti teorines išvalgas su praktiniais duomenimis ir užtikrina tyrimo metodologinį pagrįstumą [27; 34; 35].

Pagrindinę tyrimo duomenų bazę sudaro tarptautinių organizacijų ir mokslinių institucijų skelbiami duomenys, plačiai naudojami energetikos sektoriaus analizei atlikti. Šiame darbe remiamasi Tarptautinės energetikos agentūros (IEA), Europos Komisijos, „Hydrogen Council“ ir kitų tarptautinių institucijų ataskaitomis. Šių organizacijų duomenys laikomi patikimais dėl aiškiai apibrėžtos metodologijos, reguliaraus atnaujinimo ir plataus taikymo tiek akademinuose tyrimuose, tiek formuojant energetikos politiką.

IEA ataskaitose pateikiami duomenys apie elektrolizės technologijų efektyvumą, kapitalo investicijų poreikį, veiklos sąnaudų struktūrą ir žaliojo vandenilio gamybos kaštų sudedamąsias dalis. Ši informacija naudojama nustatant pagrindinius ekonominio modeliavimo parametrus, tokius kaip elektrolizatoriaus kaina, energijos sąnaudos ir eksploatavimo trukmė. Europos Komisijos ir „Hydrogen Council“ dokumentai papildomai suteikia platesnį kontekstą, leidžiantį įvertinti rinkos

tendencijas, technologijų plėtros kryptis ir žaliojo vandenilio vaidmenį siekiant klimato neutralumo tikslų [10; 11; 28].

Svarbią vietą tyrime užima nacionaliniai strateginiai dokumentai, leidžiantys pritaikyti tarptautinius duomenis Lietuvos kontekste. Darbe analizuojamos Lietuvos Respublikos energetikos politikos gairės bei Europos Sąjungos iniciatyvos, tokios kaip „REPowerEU“. Šie dokumentai pasirinkti dėl to, kad juose apibrėžiamos prioritetinės vandenilio plėtros kryptys, numatomos investicijos ir politikos priemonės, turinčios tiesioginę įtaką žaliojo vandenilio projektų ekonominiam pagrįstumui nacionaliniu ir regioniniu mastu. [40].

Be teorinių ir strateginių šaltinių, tyrime naudojami empiriniai duomenys, susiję su AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomu žaliojo vandenilio gamybos projektu. Šis projektas pasirinktas kaip atvejo tyrimas dėl jo praktinės reikšmės, viešai prieinamų duomenų ir finansavimo pagal Europos Sąjungos „Connecting Europe Facility“ (CEF) programą. Empiriniai duomenys apima informaciją apie pasirinktą elektrolizės technologiją, planuojamus gamybos pajėgumus, integraciją su atsinaujinančiais energijos šaltiniais bei projekto strateginius tikslus.

Empirinio atvejo analizė leidžia pritaikyti teorinį ekonominio vertinimo modelį realiame projekte ir įvertinti, kaip teorinės prielaidos veikia praktikoje. Tai suteikia galimybę ne tik patikrinti pasirinktos metodikos tinkamumą, bet ir padidina tyrimo praktinę vertę, ypač vertinant žaliojo vandenilio gamybos galimybes Lietuvos energetikos sistemos kontekste.

Renkant tyrimui naudojamus duomenų šaltinius buvo vadovaujama aiškiais atrankos kriterijais. Pirmiausia prioritetą teikiama naujausiems ir reguliariai atnaujinamiems šaltiniams, kadangi žaliojo vandenilio technologijų ir rinkos sąlygos pasižymi sparčia kaita. Antrasis svarbus kriterijus – šaltinių patikimumas ir metodologinis skaidrumas, todėl naudoti tik tie dokumentai, kuriuose aiškiai aprašomi duomenų rinkimo principai ir taikomos analizės metodikos. Trečiasis kriterijus – šaltinių pritaikomumas Lietuvos ir Europos Sąjungos kontekstui, siekiant išvengti mechaniško tarptautinių rodiklių perkėlimo.

Apibendrinant galima teigti, kad tyrime naudojamų duomenų šaltinių derinys sudaro tvirtą pagrindą išsamiam ir metodologiškai pagrįstam žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam vertinimui atlikti. Tarptautiniai duomenys suteikia bendrą analitinį pagrindą, nacionaliniai dokumentai leidžia pritaikyti analizę konkrečioms šalies sąlygoms, o empirinis atvejo tyrimas užtikrina tyrimo rezultatų praktinį aktualumą.

2.4. AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomo žaliojo vandenilio projekto kontekstas ir pasirinkimo pagrindimas

Atliekant žaliojo vandenilio gamybos ekonominį vertinimą, tyrimui atlikti pasirinktas AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomas projektas „Žaliųjų degalų (vandenilio) gamybos plėtra Klaipėdos uoste“. Šis projektas pasirinktas kaip empirinio tyrimo pagrindas, nes jis yra viešai deklaruotas, strategiškai reikšmingas ir įgyvendinamas laikantis Europos Sąjungos žaliosios transformacijos bei dekarbonizacijos politikos kryptių.

Projektas įtrauktas į 2021–2027 m. Europos Sąjungos investicijų programą ir yra orientuotas į žaliojo vandenilio gamybos infrastruktūros kūrimą Klaipėdos uosto teritorijoje. Viešai skelbiamoje informacijoje nurodoma, kad projekto tikslas – prisidėti prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų

mažinimo, skatinti alternatyviųjų degalų naudojimą ir sudaryti prielaidas tvaresniems energetiniams sprendimams uosto veikloje [41; 42].

Klaipėdos valstybinis jūrų uostas yra svarbus Lietuvos transporto ir logistikos mazgas, kuriame vykdoma intensyvi pramoninė ir krovos veikla. Dėl šios priežasties uosto teritorijoje diegiami energetiniai sprendimai turi reikšmingą poveikį aplinkosauginiams rodikliams ir ilgalaikiams tvarumo tikslams. Žaliojo vandenilio gamybos projektas šiame kontekste vertinamas kaip viena iš galimų priemonių mažinti uosto veiklos poveikį aplinkai ir prisidėti prie energetikos sektoriaus transformacijos.

Metodologiniu požiūriu šis projektas yra tinkamas empirinio tyrimo objektas, nes leidžia taikyti ekonominio vertinimo metodus, paremtus viešai apibrėžtais projekto tikslais, apimtimi ir technologiniu pobūdžiu. Projekto kontekstas leidžia nustatyti pagrindines analizės prielaidas, reikalingas svertiniams vandenilio gamybos kaštams (LCOH) apskaičiuoti, ir sudaro sąlygas atlikti jautrumo analizę, vertinant pagrindinių ekonominių veiksnių įtaką žaliojo vandenilio gamybos sąnaudoms.

Svarbu pažymėti, kad šiame tyrimo etape remiamasi tik viešai prieinama informacija apie projektą, jo strateginį pagrindimą ir planuojamas kryptis, nesiekiant analizuoti konfidencialių ar sutartinių duomenų. Toks metodologinis sprendimas leidžia išlaikyti tyrimo skaidrumą, atitikti akademinės etikos principus ir užtikrinti, kad ekonominis vertinimas būtų grindžiamas patikimais bei viešai patikrinamais šaltiniais.

Apibendrinant galima teigti, kad AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomas žaliojo vandenilio gamybos projektas pasirinktas kaip empirinio tyrimo objektas dėl galimybės pritaikyti pasirinktą ekonominio vertinimo metodologiją realaus projekto kontekste. Šis pasirinkimas sudaro pagrindą tolesnei tiriamajai darbo daliai ir leidžia vertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį potencialą praktiniu lygmeniu.

2.5. Tyrimo eiga ir analizės etapai

Tyrimas organizuojamas nuosekliai, laikantis aiškios metodologinės logikos, kuri leidžia sistemškai pereiti nuo teorinių prielaidų prie praktinio ekonominio vertinimo. Tyrimo eiga suskirstyta į atskirus etapus, kurių kiekvienas atlieka konkrečią funkciją bendroje analizės struktūroje ir sudaro pagrindą tolesniems skaičiavimams bei rezultatų interpretavimui. Toks nuoseklus požiūris pasirinktas siekiant užtikrinti tyrimo skaidrumą ir nuoseklumą [34].

Pagrindinis tyrimo instrumentas – ekonominių skaičiavimų modelis, sudarytas skaičiuoklėje. Šiame modelyje integruojami pagrindiniai technologiniai ir ekonominiai parametrai, tokie kaip kapitalo investicijos (CAPEX), veiklos sąnaudos (OPEX), elektros energijos kaina, įrangos eksploatavimo trukmė bei technologinis efektyvumas. Modelis grindžiamas 1.2.3 skyriuje pateikta žaliojo vandenilio svertinių žaliojo vandenilio gamybos kaštų (LCOH) skaičiavimo formule, pagal kurią apskaičiuojama vidutinė vandenilio gamybos savikaina per visą projekto gyvavimo laikotarpį.

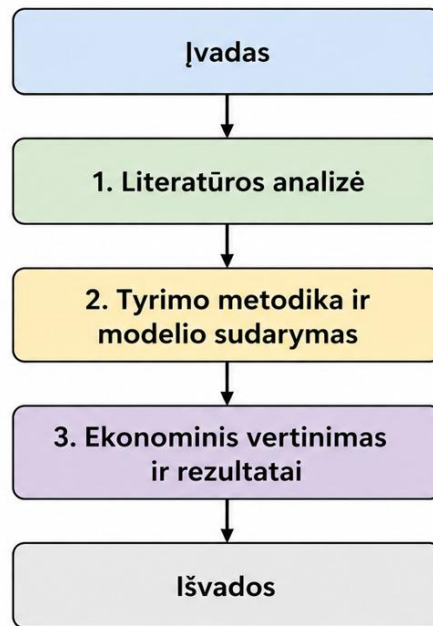
Jautrumo analizė atliekama keičiant pasirinktus pagrindinius kintamuosius, tokius kaip elektros energijos kaina, investicijų dydis ar technologinis efektyvumas, ir vertinant jų įtaką LCOH rodiklio reikšmei. Toks modelio struktūros aprašymas leidžia užtikrinti skaičiavimų logikos aiškumą ir rezultatų pakartojamumą, neapsiribojant konkrečia skaičiuoklės realizacija.

Pirmajame tyrimo etape atliekamas pagrindinių technologinių ir ekonominių parametru nustatymas, kurie bus naudojami tolesniuose ekonominio vertinimo skaičiavimuose. Prie technologinių parametru šiame tyrime priskiriami: pasirinktos elektrolizės technologijos tipas, specifinės elektros energijos sąnaudos, technologinis efektyvumas, įrangos eksploatavimo trukmė bei technologinis brandos lygis. Prie ekonominių parametru priskiriami: pradinės kapitalo investicijos (CAPEX), metinės veiklos ir priežiūros sąnaudos (OPEX), elektros energijos kaina bei taikoma diskonto norma. Šių parametru identifikavimas sudaro pagrindą žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam vertinimui ir jautrumo analizei atlikti. Antrajame tyrimo etape atliekami kapitalo investicijų (CAPEX) ir veiklos sąnaudų (OPEX) skaičiavimai. Šio etapo metu vertinamos pagrindinės investicijos ir eksploatacinės išlaidos, tiesiogiai susijusios su žaliojo vandenilio gamybos procesu. Tyrimo objektą šiame etape sudaro žaliojo vandenilio gamybos sistema, apimanti elektrolizatorius, su jų veikimu susijusius elektros energijos tiekimo sprendimus bei būtiną gamybos infrastruktūrą. Į tyrimo apimtį neįtraukiami su vandenilio saugojimu, transportavimu ar galutiniu panaudojimu susiję kaštai, jei jie nėra tiesiogiai susiję su gamybos procesu. Veiklos sąnaudų analizė apima elektros energijos, vandens, įrangos techninės priežiūros ir kitų eksploatacinių išlaidų įvertinimą. Šie skaičiavimai sudaro pagrindą tolesniam ekonominiam vertinimui atlikti [37; 33]. Trečiajame tyrimo etape atliekamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas, taikant svertinius vandenilio gamybos kaštus LCOH (angl. *Levelized Cost of Hydrogen*). Šiame etape integruojami ankstesniuose etapuose nustatyti technologiniai ir ekonominiai parametrai, siekiant apskaičiuoti vidutinę vandenilio gamybos kainą per visą technologijos eksploatavimo laikotarpį. LCOH skaičiavimas leidžia objektyviai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį efektyvumą ir sudaro galimybę palyginti skirtingas technologijas bei gamybos scenarijus tarpusavyje.

Ketvirtajame tyrimo etape atliekama jautrumo analizė, kurios metu vertinama, kaip pagrindinių prielaidų pokyčiai daro įtaką žaliojo vandenilio gamybos savikainai. Analizės metu keičiami svarbiausi kintamieji, tokie kaip elektros energijos kaina, elektrolizatoriaus efektyvumas, investicijų dydis ar įrangos eksploatavimo trukmė. Šis etapas leidžia identifikuoti kritinius veiksnius, nuo kurių labiausiai priklauso galutinis LCOH rodiklis, ir įvertinti galimus rizikos bei alternatyvius scenarijus.

Penktajame tyrimo etape atliekama lyginamoji analizė su kitomis vandenilio gamybos rūšimis. Šiame etape žaliojo vandenilio gamybos ekonominiai rodikliai lyginami su pilkojo ir mėlynojo vandenilio gamybos sąnaudomis, atsižvelgiant į skirtingas technologines prielaidas, emisijų intensyvumą ir bendras rinkos sąlygas. Tokia analizė leidžia įvertinti, kokiomis sąlygomis žaliojo vandenilio gamyba gali tapti ekonomiškai konkurencinga alternatyva tradiciniams sprendimams.

Siekiant aiškiai ir nuosekliai pristatyti tyrimo metodiką, tyrimo eiga apibendrinama grafiškai, išskiriant pagrindinius darbo etapus ir jų tarpusavio ryšius.



4 pav. Darbo struktūra (sudaryta autoriaus)

Pagrindinis ekonominio vertinimo rodiklis šiame tyrime yra svertiniai vandenilio gamybos kaštai (LCOH), tinkami technologijų savikainai palyginti. Siekiant papildomai įvertinti investicijos finansinį patrauklumą, tolesnėje tyrimo dalyje gali būti taikomi investiciniai rodikliai NPV ir IRR, jei bus pagrįstai nustatomos vandenilio realizacijos kainos ir pinigų srautai.

Apibendrinant galima teigti, kad tyrimo eiga suformuota taip, jog kiekvienas analizės etapas logiškai pereina į kitą, o visa metodologija sudaro nuoseklią ir sistemišką struktūrą, leidžiančią objektyviai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominį potencialą.

2.6. Tyrimo prielaidos ir apribojimai

Atliekant žaliojo vandenilio gamybos ekonominį vertinimą, neišvengiamai remiamasi tam tikromis prielaidomis ir susiduriama su metodologiniais apribojimais, kurie daro įtaką gautiems rezultatams ir jų interpretacijai. Šių prielaidų ir apribojimų įvardijimas yra svarbi tyrimo metodologijos dalis, nes leidžia aiškiai apibrėžti analizės ribas ir užtikrinti rezultatų skaidrumą bei pagrįstumą.

Vienas pagrindinių tyrimo apribojimų susijęs su naudojamų duomenų pobūdžiu. Nors darbe remiamasi patikimų tarptautinių organizacijų ir nacionalinių institucijų pateikiamais duomenimis, dalis technologinių ir ekonominių rodiklių literatūroje pateikiami apibendrintai arba tam tikrais intervalais. Dėl šios priežasties ekonominio modeliavimo metu taikomos vidutinės reikšmės, kurios leidžia atlikti palyginamąją analizę, tačiau gali skirtis nuo konkrečių projektų faktinių sąlygų.

Atliekant ekonominį vertinimą daroma prielaida, kad žaliojo vandenilio gamybos procesas nagrinėjamu laikotarpiu vyksta stabiliai, o technologijų eksploatacinių sąlygų iš esmės nekinta. Ši prielaida leidžia taikyti LCOH metodą ir paskirstyti visas sąnaudas per visą technologijos gyvavimo ciklą. Vis dėlto praktinėmis sąlygomis gamybos apimtys gali kisti dėl elektros energijos tiekimo svyravimų, įrangos techninės priežiūros poreikio ar kitų eksploatacinių veiksnių, kurių poveikis šiame tyrime detalios neanalizuojamas.

Ypatingas dėmesys skiriamas elektros energijos kainos prielaidai, kadangi šis veiksnys yra vienas reikšmingiausių žaliojo vandenilio gamybos savikainos komponentų. Tyrime daroma prielaida, kad elektros energijos kainos nustatomos remiantis viešai prieinamais oficialių institucijų pateikiamais istoriniais duomenimis ir ilgalaikėmis energetikos sektoriaus tendencijomis. Atsižvelgiant į tai, kad elektros energijos kainos pasižymi dideliu nepastovumu, šio veiksnio įtaka papildomai vertinama jautrumo analizės metu, keičiant elektros energijos kainos reikšmes pasirinktame intervale. Tai leidžia sumažinti vieno scenarijaus ribotumą ir įvertinti galimų kainų svyravimų poveikį galutiniams rezultatams [34; 40]. Taip pat daroma prielaida, kad pasirinktų elektrolizės technologijų veikimas atitinka gamintojų deklaruojamus techninius parametrus, tokius kaip efektyvumas, energijos sąnaudos ir eksploataavimo trukmė. Nors šie parametrai grindžiami mokslinės literatūros ir praktinių projektų duomenimis, realiomis eksploataavimo sąlygomis technologijų veikimas gali skirtis priklausomai nuo eksploatacijos intensyvumo, priežiūros kokybės ar integracijos su atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Šie aspektai šiame tyrime laikomi papildomais neapibrėžtumo veiksniais.

Empirinis tyrimo apribojimas susijęs su pasirinktu atvejo tyrimu. Darbe analizuojamas AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcijos vystomas žaliojo vandenilio gamybos projektas atspindi konkrečias technologines, ekonomines ir institucines aplinkos sąlygas. Dėl šios priežasties gauti rezultatai pirmiausia taikytini panašaus pobūdžio ir masto projektams bei Lietuvos energetikos kontekstui. Tiesioginis rezultatų perkėlimas į kitų šalių ar skirtingo masto projektus turėtų būti vertinamas atsargiai.

Pažymėtina, kad tyrime nėra detalai vertinami kai kurie išoriniai ekonominiai ir politiniai veiksniai, tokie kaip subsidijų mechanizmų pokyčiai, anglies dioksido kainų dinamika ar geopolitinės aplinkybės. Šių veiksnių neįtraukimas leidžia susikoncentruoti į technologinių ir tiesioginių ekonominių parametrų analizę, tačiau kartu riboja platesnį makroekonominį vertinimą.

Apibendrinant galima teigti, kad tyrime taikomos prielaidos ir apribojimai yra būtini siekiant atlikti struktūruotą ir palyginamą ekonominę analizę. Jie ne mažina tyrimo vertės, bet aiškiai apibrėžia jo taikymo ribas ir sudaro pagrindą pagrįstai rezultatų interpretacijai bei tolesniems tyrimams.

3. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas

Antrojoje darbo dalyje suformuota žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo metodika, pagrįsta svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) rodikliu.

Trečiojoje darbo dalyje atliekamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas, siekiant identifikuoti pagrindinius ekonominius veiksnius ir įvertinti jų įtaką žaliojo vandenilio konkurencingumui skirtingomis elektros rinkos sąlygomis. Atliekant vertinimą analizuojama elektros energijos kainos, technologinių parametru ir eksploatacinių sąlygų įtaka vandenilio gamybos kaštams.

Ypatingas dėmesys skiriamas elektros energijos kainų kintamumui ir elektrolizerio veikimo lankstumui, leidžiančiam pereiti nuo supaprastinto metinio prie dinamiškesnio, valandiniu principu paremto vertinimo. Tai leidžia tiksliau įvertinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominę efektyvumą realiomis rinkos sąlygomis.

Papildomai vertinama skirtingų elektros energijos tiekimo strategijų įtaka ekonominiams rezultatams, lyginant fiksuotos kainos (PPA) ir elektros biržos scenarijus. Vertinimas papildomas rinkos perspektyvos analize, nagrinėjant galimas žaliojo vandenilio realizacijos kryptis ir jų sąveiką su alternatyvių energijos šaltinių kainomis.

Empirinei analizei atlikti naudojamas realaus projekto pavyzdys, kuris taikomas kaip atvejo analizė (angl. *case study*), leidžianti pagrįsti teorinius skaičiavimus ir įvertinti jų pritaikomumą realios infrastruktūros plėtros kontekste.

Tokiu būdu atliekama analizė leidžia įvertinti ne tik žaliojo vandenilio gamybos kaštus, bet ir nustatyti sąlygas, kuriomis ši technologija gali tapti ekonomiškai pagrįsta.

3.1. Tyrimo duomenys ir prielaidos

3.1.1. Analizuojamo projekto charakteristika

Šiame tyrime žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam vertinimui atlikti taikomas tipinio mažo–vidutinio masto elektrolizės projekto modelis, pagrįstas Klaipėdos uosto teritorijoje planuojamo projekto techniniais parametrais [42; 43]. Toks pasirinkimas leidžia pritaikyti teorinę metodiką realiam atvejui, išlaikant galimybę daryti bendresnes ekonomines įžvalgas.

Analizuojamas projektas apima visą žaliojo vandenilio vertės grandinę – nuo gamybos iki saugojimo ir paskirstymo. Vandenilio gamyba numatoma naudojant protonų mainų membranos (PEM) elektrolizerį, kuris pasižymi lankstumu ir tinkamumu dirbti su kintančia atsinaujinančios energijos pasiūla. Tokie elektrolizeriai gali veikti plačiame apkrovos diapazone, todėl yra tinkami integracijai su elektros energijos rinka.

Modelyje taikomi pagrindiniai technologiniai parametrai:

- elektrolizerio galia – 1,25 MW;
- specifinės elektros energijos sąnaudos – apie 63 kWh/kg H₂;
- gamybos infrastruktūra apima suspaudimo, saugojimo ir paskirstymo sistemas.

Tokia technologinių parametų konfigūracija atitinka literatūroje analizuojamus elektrolizės projektų scenarijus ir patenka į tipinius elektrolizės technologijų charakteristinius intervalus, todėl leidžia modeliuoti ekonomiškai pagrįstą žaliojo vandenilio gamybos sistemą [33; 44; 45].

3.1.2. Žaliojo vandenilio gamybos technologinis modelis

Žaliojo vandenilio gamybos procesas šiame tyrime modeliuojamas kaip integruota technologinė sistema, apimanti pagrindinius etapus: vandens paruošimą, elektrolizę, suspaudimą, saugojimą ir paskirstymą. Tokia struktūra leidžia ne tik apibūdinti technologinę grandinę, bet ir įvertinti atskirų etapų įtaką bendroms gamybos sąnaudoms.

Pagrindinis technologinis etapas yra elektrolizė, kurios metu naudojant elektros energiją vanduo skaidomas į vandenilį ir deguonį. Šiame tyrime taikomas protonų mainų membranos (PEM) elektrolizeris, pasižymintis lankstumu ir gebėjimu veikti plačiame apkrovos diapazone. Tai leidžia jį efektyviai integruoti su kintančia elektros energijos pasiūla ir taikyti lankstų veikimo režimą, prisitaikant prie elektros kainų svyravimų [33; 44].

Kiti technologiniai etapai – suspaudimas, saugojimas ir paskirstymas – užtikrina vandenilio pritaikymą galutiniam vartojimui. Tačiau šie etapai kartu didina tiek kapitalo investicijas, tiek veiklos sąnaudas, todėl yra svarbūs vertinant bendrą projekto ekonominę efektyvumą.

Atsižvelgiant į technologinio proceso struktūrą, galima išskirti tiesioginę sąsają tarp atskirų etapų ir sąnaudų kategorijų: elektrolizė lemia didžiausią elektros energijos poreikį ir daro esminę įtaką veiklos sąnaudoms, tuo tarpu suspaudimo ir saugojimo sistemos labiausiai prisideda prie kapitalo investicijų.

2 lentelė. Nagrinėjamo objekto techniniai parametrai [43]

Parametras	Reikšmė
Elektrolizerio tipas	PEM
Elektrolizerio galia	1,25 MW
Elektrolizerio specifinės sąnaudos	iki 58 kWh/kg H ₂
Gamybos pajėgumas	>250 Nm ³ /val. (~540 kg/24 h)
Vandenilio grynumas	99,999 %, ISO 14687:2019
Pradinis, išeinantis slėgis	30 bar
Darbo diapazonas	20–100 %
Rampavimo laikas	≤5 min
Paleidimo laikas	≤1 min
Efektyvumas	~57,5 %
Vidutinio slėgio kompresoriai	37 kW + 15 kW
Aukšto slėgio kompresorius	5,5 kW
Aušintuvai	3 × 34 kW
Bendra momentinė gamyklos galia (įvertis)	1 409,5 kW
Visos gamyklos specifinės sąnaudos (įvertis)	~63 kWh/kg H ₂

3.1.3. Sąnaudų struktūros detalizavimas

Siekiant atlikti žaliojo vandenilio gamybos ekonominę vertinimą, būtina aiškiai apibrėžti sąnaudų struktūrą, kuri naudojama svertiniams vandenilio gamybos kaštams (LCOH) apskaičiuoti. Atsižvelgiant į technologinio proceso struktūrą, skirtingi gamybos etapai generuoja skirtingo pobūdžio sąnaudas, darančias nevienodą įtaką galutinei savikainai [33; 44; 46].

3 lentelė. Žaliojo vandenilio infrastruktūros investicijų struktūra

Projekto komponentas	Investicijų vertė (EUR)
Žaliojo vandenilio gamybos infrastruktūra	6 876 500
Stacionari vandenilio pildymo stotelė	2 926 561
Bendra projekto investicijų suma (CAPEX)	9 803 061*

* Ši suma atspindi visos žaliojo vandenilio gamybos infrastruktūros investicijas, įskaitant visus technologinius elementus (elektrolizę, saugojimą, suspaudimą ir kt.), todėl naudojama bendram projekto mastui įvertinti.

Atsižvelgiant į technologinio proceso struktūrą, galima išskirti skirtingą atskirų etapų įtaką sąnaudų formavimuisi: elektrolizė lemia didžiausią elektros energijos poreikį, o suspaudimo ir saugojimo sistemos didina kapitalo investicijas. Tokia sąnaudų diferenciacija sudaro pagrindą detaliau nagrinėti kapitalo ir veiklos sąnaudų struktūrą.

Kapitalo investicijos (CAPEX)

Kapitalo investicijos apima visas ilgalaikes išlaidas, susijusias su technologinės infrastruktūros įrengimu. Šiame tyrime CAPEX apima elektrolizės įrangą, suspaudimo ir saugojimo sistemas, vandenilio paskirstymo infrastruktūrą, taip pat statybos ir inžinerinių tinklų įrengimą.

Pažymėtina, kad nors elektrolizeris sudaro technologinį branduolį, reikšmingą bendrų investicijų dalį gali sudaryti infrastruktūriniai elementai, ypač diegiant aukšto slėgio sistemas. Todėl vertinant žaliojo vandenilio gamybos ekonomiką būtina atsižvelgti į visos sistemos investicinę struktūrą [44; 45].

Veiklos sąnaudos (OPEX)

Veiklos sąnaudos apima visas einamąsias projekto eksploatacijos išlaidas, kurios patiriamos per visą projekto gyvavimo laikotarpį. Jos apima techninę priežiūrą, remontą, personalo sąnaudas, vandens tiekimą bei administracines išlaidas.

Didžiausią veiklos sąnaudų dalį sudaro elektros energijos sąnaudos, kurios dėl elektrolizės proceso energijos intensyvumo tampa lemiamu veiksniumi formuojant galutinę vandenilio savikainą. Todėl šiame tyrime elektros energijos sąnaudos analizuojamos atskirai kaip pagrindinis ekonominis kintamasis [33; 44; 46].

Elektros energijos sąnaudų vaidmuo

Elektros energija yra esminis žaliojo vandenilio gamybos kaštų komponentas, kadangi elektrolizės procesas yra itin imlus energijai. Dėl šios priežasties net ir nedideli elektros kainos pokyčiai gali turėti reikšmingą įtaką LCOH rodikliui.

Tokiu būdu suformuota sąnaudų struktūra sudaro pagrindą tolesniam ekonominiam vertinimui, kuriame analizuojama elektros energijos kainos ir kitų parametrų įtaka žaliojo vandenilio gamybos kaštams, atlikti [33; 44; 47].

LCOH rodiklis

Žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam vertinimui atlikti šiame darbe taikomas svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) rodiklis, leidžiantis įvertinti visas projekto sąnaudas per visą gyvavimo laikotarpį.

LCOH apskaičiuojamas įvertinant kapitalo investicijas, veiklos sąnaudas ir pagaminto vandenilio kiekį, diskontuotą per projekto gyvavimo laikotarpį. Šis rodiklis plačiai naudojamas moksliniuose tyrimuose ir praktikoje vertinant skirtingų technologijų ekonominį efektyvumą [37; 44].

3.1.4. Pagrindinės ekonominės prielaidos

Atliekant ekonominį žaliojo vandenilio gamybos vertinimą būtina aiškiai apibrėžti modelyje naudojamas prielaidas. Kadangi svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) rodiklis apima visą projekto gyvavimo ciklą, šiame tyrime nustatomi pagrindiniai parametrai, susiję su technologiniu veikimu, elektros energijos kaina ir rinkos sąlygomis.

Svarbu pažymėti, kad žaliojo vandenilio gamyba yra glaudžiai susijusi su elektros energijos kainų dinamika, todėl šiame tyrime prielaidos formuojamos taip, kad leistų vertinti ne tik vidutinius kaštus, bet ir skirtingas elektros rinkos situacijas.

Elektrolizerio apkrovos koeficientas

Viena svarbiausių modelio prielaidų yra elektrolizerio apkrovos koeficientas (angl. *capacity factor*), kuris apibrėžia faktinį įrenginio darbo laiką, palyginti su teoriniu maksimaliu pajėgumu. Nagrinėjamame modelyje naudojamas PEM elektrolizeris gali veikti plačiame galios diapazone (20–100 %), todėl jo eksploatavimas gali būti pritaikomas prie elektros energijos kainų svyravimų.

Literatūroje nurodoma, kad elektrolizerių apkrovos koeficientas paprastai svyruoja nuo maždaug 40 % iki 80 %, priklausomai nuo elektros tiekimo strategijos ir atsinaujinančių energijos šaltinių integracijos lygio [44; 45; 48]. Atsižvelgiant į tai, šiame tyrime baziniam scenarijui taikomas 70 % apkrovos koeficientas.

Elektros kainų scenarijų taikymas modelyje

Elektros energija yra pagrindinis žaliojo vandenilio gamybos sąnaudų komponentas, todėl jos kainos modeliavimas yra esminė analizės dalis. Skirtingai nei supaprastintuose modeliuose, kuriuose naudojama vidutinė metinė elektros kaina, šiame tyrime vertinamos skirtingos elektros kainų situacijos.

Remiantis „Nord Pool“ elektros biržos duomenimis, elektros kainos pasižymi dideliu kintamumu – nuo labai aukštų iki itin žemų ar net neigiamų reikšmių [49]. Tokia dinamika leidžia vertinti žaliojo vandenilio gamybą kaip lankstų elektros vartotoją, galintį prisitaikyti prie rinkos sąlygų.

Atsižvelgiant į tai, šiame darbe nagrinėjami du pagrindiniai elektros energijos tiekimo scenarijai, kurie vėliau analizėje papildomi elektrolizerio veikimo strategijomis:

- fiksuotos kainos scenarijus, kai elektros energija perkama pagal ilgalaikę elektros pirkimo sutartį (PPA), leidžiančią sumažinti elektros kainų svyravimo riziką [50];
- kintamos kainos scenarijus, kai elektros energija perkama elektros biržoje, leidžiant gamybą vykdyti tik palankiausiomis kainų valandomis [48; 51].

Toks požiūris leidžia įvertinti ne tik vidutinę elektros kainą, bet ir jos svyravimų įtaką žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam efektyvumui.

Diskonto norma

Ekonominiame modelyje taikoma diskonto norma, kuri atspindi kapitalo kainą ir investicijų riziką. Ji naudojama būsimų pinigų srautų dabartinei vertei apskaičiuoti ir yra svarbi vertinant ilgalaikių investicinių projektų ekonominį efektyvumą.

Mokslinėje literatūroje žaliojo vandenilio projektams dažniausiai taikomos 6–8 % diskonto normos, priklausomai nuo projekto rizikos ir finansavimo struktūros [44; 47].

Remiantis šiomis prielaidomis, tolesniuose skyriuose atliekamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas, leidžiantis nustatyti, kaip elektros energijos kainos, technologiniai parametrai ir eksploatacinės sąlygos veikia galutinį LCOH rodiklį.

Analizė orientuota į elektros energijos kainų scenarijų palyginimą bei elektrolizerio veikimo režimo įtakos vertinimą, siekiant nustatyti sąlygas, kuriomis žaliojo vandenilio gamyba gali tapti ekonomiškai pagrįsta [44; 47].

Vienas pagrindinių ekonominio vertinimo parametrų yra projekto eksploataavimo laikotarpis, kuris apibrėžia laikotarpį, per kurį paskirstomos kapitalo investicijos ir vertinamos veiklos sąnaudos.

Tarptautinėje praktikoje elektrolizės įrenginių eksploataavimo trukmė dažniausiai svyruoja nuo 15 iki 25 metų, priklausomai nuo technologijos tipo, darbo režimo ir eksploataavimo sąlygų [33; 44]. Atsižvelgiant į literatūroje pateikiamus intervalus bei nagrinėjamo modelio pobūdį, šiame tyrime taikomas 20 metų analizės laikotarpis.

Toks laikotarpis laikomas pakankamu įvertinti ilgalaikį investicijų atsiperkamumą ir užtikrina nuoseklų kapitalo sąnaudų paskirstymą viso projekto gyvavimo ciklo metu.

Atsižvelgiant į nagrinėjamo modelio pobūdį, šiame tyrime taikoma 7 % diskonto norma, kuri laikoma vidutine reikšme tarp mažesnės rizikos (pvz., valstybės remiamų projektų) ir didesnės rizikos komercinių investicijų.

Toks pasirinkimas atitinka literatūroje pateikiamus intervalus ir leidžia užtikrinti nuoseklų investicijų ekonominio efektyvumo vertinimą.

Metinė vandenilio gamybos apimtis

Metinė vandenilio gamybos apimtis yra vienas pagrindinių parametrų, naudojamų apskaičiuojant svertinius vandenilio gamybos kaštus (LCOH). Ji nustatoma atsižvelgiant į elektrolizerio galią, veikimo laiką ir specifines elektros energijos sąnaudas.

Šiame tyrime daroma prielaida, kad elektrolizeris veikia esant 70 % apkrovos koeficientui, todėl efektyvios darbo valandos per metus sudaro:

$$t = 8\,760 \times 0,7 = 6\,132 \text{ val.}$$

Atsižvelgiant į 1,25 MW elektrolizerio galią (1 250 kW), metinis elektros energijos suvartojimas apskaičiuojamas taip:

$$E_{\text{met}} = P \times t; \quad (2)$$

čia: P – elektrolizerio galia (kW);
t – efektyvus veikimo laikas per metus (val.).

$$E_{\text{met}} = 1\,250 \times 6\,132 = 7\,665\,000 \text{ kWh}.$$

Remiantis visos sistemos specifinėmis elektros energijos sąnaudomis (~63 kWh/kg H₂), metinė vandenilio gamybos apimtis apskaičiuojama taip:

$$H_{\text{met}} = \frac{E_{\text{met}}}{e}; \quad (3)$$

$$H_{\text{met}} = \frac{7\,665\,000}{63} \approx 121\,700 \text{ kg}.$$

Taigi, esant bazinėms prielaidoms, metinė žaliojo vandenilio gamybos apimtis sudaro apie 121,7 t per metus.

Pažymėtina, kad šiame etape taikomas supaprastintas metinis modelis, darant prielaidą apie nuolatinį elektrolizerio veikimą. Tačiau realiomis rinkos sąlygomis elektrolizerio darbo režimas gali būti kintamas ir priklausyti nuo elektros energijos kainų svyravimų, todėl ši prielaida tolesniuose skyriuose tikslinama taikant scenarijų analizę.

Elektros energijos kainos prielaidos

Remiantis „Nord Pool“ elektros biržos duomenimis, elektros energijos kainos pasižymi dideliu kintamumu – nuo aukštų iki itin žemų ar net neigiamų reikšmių [49]. Tokia kainų dinamika sudaro prielaidas vertinti žaliojo vandenilio gamybą kaip lankstų elektros energijos vartotoją.

Atsižvelgiant į tai, šiame darbe nagrinėjami du pagrindiniai elektros energijos tiekimo scenarijai, kurie sudaro pagrindą tolesnei ekonominei analizei:

- fiksuotos kainos scenarijus, kai elektros energija perkama pagal ilgalaikę elektros pirkimo sutartį (PPA), leidžiančią sumažinti kainų svyravimo riziką [50];
- kintamos kainos scenarijus, kai elektros energija perkama elektros biržoje, leidžiant gamybą optimizuoti pagal elektros energijos kainų svyravimus [48].

Toks požiūris leidžia įvertinti ne tik vidutinę elektros energijos kainą, bet ir jos svyravimo poveikį žaliojo vandenilio gamybos ekonominiams rezultatams.

Ekonominių prielaidų suvestinė

Siekiant užtikrinti ekonominio vertinimo nuoseklumą ir skaidrumą, pagrindinės šiame tyrime taikomos prielaidos apibendrinamos vienoje lentelėje. Joje pateikiami pagrindiniai technologiniai, eksploataciniai ir ekonominiai parametrai, naudojami svertiniams vandenilio gamybos kaštams (LCOH) apskaičiuoti.

4 lentelė. Ekonominio modelio pagrindinės prielaidos

Parametras	Reikšmė	Pastaba / pagrindimas
------------	---------	-----------------------

Elektrolizerio galia	1,25 MW	Modelio prielaida, pagrįsta realaus projekto parametrais [42; 43]
Elektrolizerio tipas	PEM	Tinkamas darbui su kintančia AEI pasiūla [33; 44]
Apkrovos koeficientas	70 %	Remiantis literatūra (40–80 % intervalas) [44; 45]
Efektyvios darbo valandos	6 132 h	Apskaičiuota (8 760 × 0,7)
Specifinės energijos sąnaudos	63 kWh/kg	Remiantis literatūra ir sistemos įverčiu [33; 43]
Metinė H ₂ gamyba	121,7 t/metus	Apskaičiuota remiantis modelio prielaidomis
Elektros tiekimo scenarijai	PPA/birža	PPA ir biržos scenarijai [50]
Diskonto norma	7 %	Remiantis literatūra: 6–8 % [33; 44]
Analizės laikotarpis	20 metų	Remiantis literatūra [33; 44]

Pateiktos prielaidos sudaro pagrindą tolesniam ekonominiam modeliavimui atlikti ir leidžia nuosekliai įvertinti žaliojo vandenilio gamybos kaštus bei pagrindinių parametų įtaką galutiniam LCOH rodikliui.

3.2. Žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas

Šiame skyriuje atliekamas žaliojo vandenilio gamybos ekonominis vertinimas, remiantis 3.1 skyriuje nustatytais prielaidomis. Vertinimo tikslas – nustatyti, kaip elektros energijos kainos, elektrolizerio veikimo režimas ir pasirinkta elektros tiekimo strategija veikia svertinius vandenilio gamybos kaštus (LCOH).

Remiantis anksčiau aprašytais elektros energijos tiekimo scenarijais, analizė išplečiama įtraukiant elektrolizerio veikimo strategijas. Analizė atliekama nagrinėjant tris pagrindinius scenarijus: fiksuotos elektros energijos kainos scenarijų (PPA), kintamos elektros energijos kainos scenarijų (elektros birža) bei lankstaus elektrolizerio veikimo scenarijų, kai gamyba optimizuojama pagal elektros energijos kainų svyravimus ir įvertinamos papildomos pajamos iš dalyvavimo elektros rinkoje. Toks scenarijų pasirinkimas leidžia kompleksiskai įvertinti skirtingų strategijų įtaką galutiniams rezultatams ir nustatyti sąlygas, kuriomis žaliojo vandenilio gamyba gali tapti ekonomiškai konkurencinga.

3.2.1. Bazinio scenarijaus LCOH skaičiavimas

Šiame skyriuje atliekamas bazinio scenarijaus LCOH skaičiavimas. Bazinis scenarijus apibrėžiamas kaip vidutinių veikimo sąlygų atvejis, kai elektrolizeris veikia esant 70 % apkrovos koeficientui, o elektros energijos kaina laikoma vidutine – apie 0,085 EUR/kWh, atitinkančia tipinį elektros biržos kainų lygį.

Remiantis nustatytais ekonominėmis prielaidomis, šiame etape atliekamas žaliojo vandenilio gamybos kaštų skaičiavimas, leidžiantis įvertinti bazinio scenarijaus LCOH reikšmę.

Atliekant praktinį vertinimą taikomas supaprastintas metinių ekvivalentinių sąnaudų metodas, darant prielaidą, kad pagrindinės kapitalo investicijos patiriamos projekto pradžioje, o metinė vandenilio gamyba ir veiklos sąnaudos išlieka pastovios per visą projekto laikotarpį. Tokiu atveju LCOH apskaičiuojamas pagal formulę:

$$LCOH = \frac{CAPEX_{ann} + OPEX}{H}; \quad (4)$$

čia: $CAPEX_{ann}$ – metinės kapitalo sąnaudos (EUR/metus);
 $OPEX$ – metinės veiklos sąnaudos (EUR/metus);
 H – metinė vandenilio gamybos apimtis (kg);
 CRF – kapitalo atkūrimo koeficientas.

Taikant 7 % diskonto normą ir 20 metų analizės laikotarpį, CRF reikšmė sudaro apie 0,094.

Baziniame scenarijuje daroma prielaida, kad elektros energija perkama pagal ilgalaikę elektros pirkimo sutartį (PPA), taikant 0,05 EUR/kWh kainą. Toks pasirinkimas atitinka praktikoje dažnai naudojamus atsinaujinančių energijos išteklių projektų elektros kainų lygius ir leidžia suformuoti stabilų atskaitos tašką tolesnei analizei [33; 44].

Atsižvelgiant į modelyje nustatytą elektrolizerio galią (1,25 MW) ir apkrovos koeficientą (70 %), metinis elektros energijos suvartojimas sudaro 7 665 000 kWh. Esant pasirinktai elektros kainai, metinės elektros energijos sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$OPEX_{el} = E_{met} \times C_{el}; \quad (5)$$

čia: E_{met} – metinis elektros energijos suvartojimas (kWh);
 C_{el} – elektros energijos kaina (EUR/kWh).

$$OPEX_{el} = 7\,665\,000 \times 0,05 = 383\,250 \text{ EUR/metus.}$$

Šiame modelyje daroma prielaida, kad bendros kapitalo investicijos sudaro apie 1 250 000 EUR. Pažymėtina, kad atliekant šį ekonominį vertinimą naudojama supaprastinta $CAPEX$ reikšmė (1 250 000 EUR), atitinkanti pagrindinę elektrolizės įrangos dalį, o ne visos infrastruktūros investicijas. Toks supaprastinimas taikomas siekiant izoliuoti elektros energijos kainos įtaką LCOH rodikliui ir išvengti papildomų infrastruktūrinių komponentų įtakos, kurie buvo įvertinti bendrame projekto $CAPEX$. Metinės kapitalo sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$CAPEX_{ann} = CAPEX \times CRF; \quad (6)$$

čia: $CAPEX$ – bendros kapitalo investicijos (EUR);
 CRF – kapitalo atkūrimo koeficientas.

$$CAPEX_{ann} = 1\,250\,000 \times 0,094 = 117\,500 \text{ EUR/metus.}$$

Bendros metinės sąnaudos sudaro:

$$S\grave{a}naudos_{met} = CAPEX_{ann} + OPEX; \quad (7)$$

čia: $CAPEX_{ann}$ – metinės kapitalo sąnaudos (EUR/metus);
 $OPEX_{el}$ – metinės elektros energijos sąnaudos (EUR/metus).

$$S\grave{a}naudos_{met} = 117\,500 + 383\,250 = 500\,750 \text{ EUR/metus.}$$

Atsižvelgiant į apskaičiuotą metinę vandenilio gamybos apimtį (121 700 kg), bazinio scenarijaus LCOH sudaro:

$$LCOH = \frac{500\,750}{121\,700} \approx 4,11 \text{ EUR/kg.}$$

Gauta LCOH reikšmė daugiausia priklauso nuo elektros energijos sąnaudų, kurios dėl elektrolizės proceso energijos intensyvumo sudaro didžiausią bendrų veiklos sąnaudų dalį. Tai rodo, kad žaliojo vandenilio gamybos ekonominis efektyvumas yra itin jautrus elektros energijos kainai.

Gauta reikšmė patenka į literatūroje pateikiamą žaliojo vandenilio gamybos kaštų intervalą, kuris, priklausomai nuo elektros energijos kainos ir technologinių parametru, dažniausiai svyruoja apie 3–8 EUR/kg [33; 44]. Tai patvirtina, kad atlikti skaičiavimai yra ekonomiškai pagrįsti.

Atsižvelgiant į reikšmingą elektros energijos kainos įtaką, tolesnėje analizėje tikslinga detaliau įvertinti skirtingų elektros energijos tiekimo scenarijų poveikį žaliojo vandenilio gamybos kaštams.

3.2.2. Elektros energijos tiekimo scenarijų palyginimas

Siekiant įvertinti elektros energijos kainos įtaką žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam efektyvumui, šiame darbe analizuojami du pagrindiniai elektros energijos tiekimo scenarijai: fiksuotos kainos (PPA) ir kintamos kainos (elektros biržos) scenarijai.

PPA scenarijuje daroma prielaida, kad elektros energija perkama už iš anksto sutartą kainą, kuri šiame tyrime laikoma 0,05 EUR/kWh. Toks modelis leidžia užtikrinti stabilias veiklos sąnaudas ir sumažinti kainų svyravimo riziką, tačiau neleidžia pasinaudoti žemų ar neigiamų elektros kainų laikotarpiais.

Biržos scenarijuje daroma prielaida, kad elektros energija perkama rinkos kaina, kuri vidutiniškai siekia apie 0,085 EUR/kWh, tačiau pasižymi dideliu kintamumu. Tai sudaro galimybes optimizuoti elektrolizerio veikimą, gaminant vandenilį tik ekonomiškai palankiaisiais laikotarpiais.

Darant prielaidą, kad elektros energija perkama už vidutinę rinkos kainą (0,085 EUR/kWh), metinės elektros energijos sąnaudos sudarytų:

$$OPEX_{el} = 7\,665\,000 \times 0,085 = 651\,525 \text{ EUR/metus.}$$

Įvertinus metines kapitalo sąnaudas (117 500 EUR/metus), bendros metinės sąnaudos sudarytų:

$$S\underline{naudos}_{met} = 117\,500 + 651\,525 = 769\,025 \text{ EUR/metus.}$$

Atsižvelgiant į metinę vandenilio gamybos apimtį (121 700 kg), LCOH reikšmė būtų:

$$LCOH = \frac{769\,025}{121\,700} \approx 6,32 \text{ EUR/kg.}$$

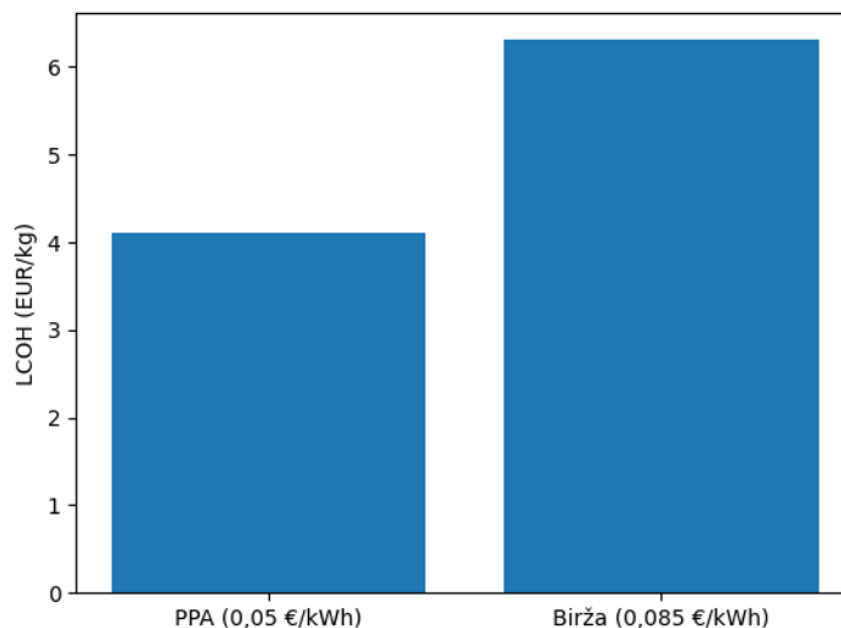
Palyginus gautus rezultatus su baziniu PPA scenarijumi (4,11 EUR/kg), matyti, kad, naudojant vidutinę biržos elektros kainą, žaliojo vandenilio gamybos kaštai padidėja daugiau nei 50 %. Šį skirtumą lemia didesnė elektros energijos kaina, kuri sudaro didžiausią LCOH dalį.

Tačiau svarbu pažymėti, kad toks vertinimas atspindi tik supaprastintą situaciją, kai naudojama vidutinė elektros energijos kaina. Realiomis rinkos sąlygomis elektros biržoje kainos pasižymi dideliu kintamumu, o tam tikrais laikotarpiais gali būti itin žemos arba net neigiamos.

Tai sudaro galimybes optimizuoti elektrolizerio veikimą, gaminant vandenilį tik ekonomiškai palankiaisiais laikotarpiais. Tokiu atveju faktinės elektros energijos sąnaudos gali būti reikšmingai mažesnės nei naudojant vidutinę kainą, o tai leistų sumažinti ir bendrą LCOH reikšmę.

Atsižvelgiant į tai, galima daryti išvadą, kad žaliojo vandenilio gamybos ekonominis efektyvumas priklauso ne tik nuo vidutinės elektros energijos kainos, bet ir nuo jos svyravimo struktūros bei elektrolizerio veikimo lankstumo. Esant galimybei pritaikyti gamybą prie palankiausių kainų laikotarpių, biržos scenarijus gali tapti konkurencingas ar net pranašesnis už PPA, nepaisant didesnės vidutinės elektros kainos.

Todėl tolesnėje analizėje tikslinga detaliau įvertinti elektros energijos kainų svyravimų įtaką, nagrinėjant skirtingus elektrolizerio veikimo scenarijus ir atliekant jautrumo analizę.



5 pav. Žaliojo vandenilio gamybos kaštų (LCOH) palyginimas pagal elektros tiekimo scenarijus (sudaryta autoriaus)

5 paveiksle pateiktas žaliojo vandenilio gamybos kaštų (LCOH) palyginimas, esant skirtingiems elektros energijos tiekimo scenarijams. Matyti, kad naudojant PPA modelį kaštai yra mažesni, o taikant vidutinę biržos kainą LCOH reikšmė reikšmingai išauga. Tai patvirtina elektros energijos kainos lemiamą įtaką žaliojo vandenilio gamybos ekonominiam efektyvumui.

3.2.3. Elektros energijos kainos įtaka LCOH

Atsižvelgiant į reikšmingą elektros energijos kainos įtaką žaliojo vandenilio gamybos kaštams, šiame skyriuje analizuojama LCOH rodiklio priklausomybė nuo elektros energijos kainos, siekiant įvertinti, kaip jos pokyčiai veikia galutinę vandenilio savikainą.

Elektros energijos kainų intervalas pasirinktas remiantis 2025 m. „Nord Pool“ elektros biržos duomenimis, kurie rodo reikšmingą kainų kintamumą Lietuvos regione [49]. Analizuojamu laikotarpiu elektros kainos svyruoja nuo labai žemų ar net neigiamų reikšmių iki aukštų kainų pikų, viršijančių 0,10 EUR/kWh.

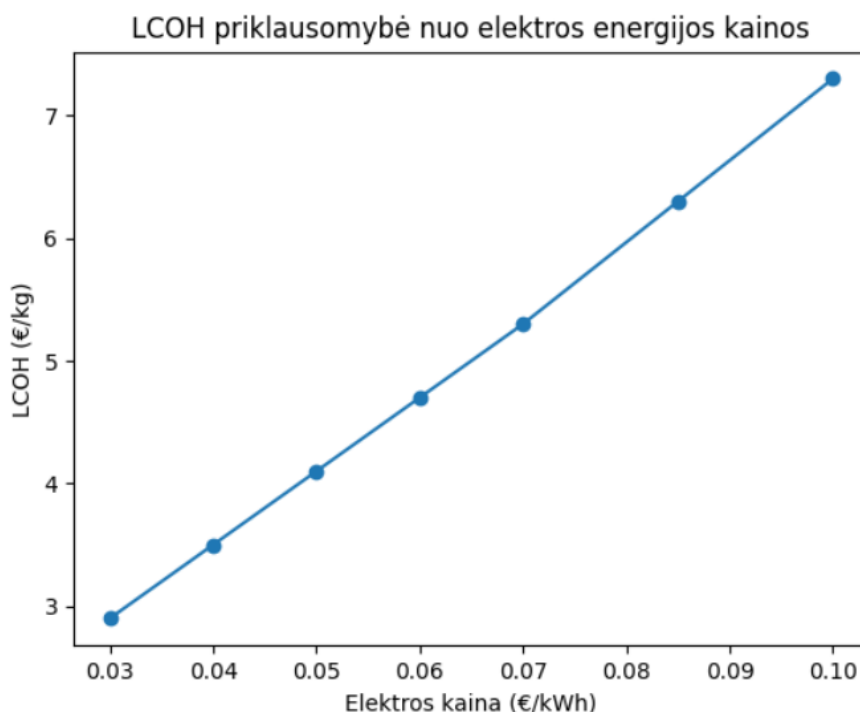
Atsižvelgiant į šiuos duomenis, jautrumo analizei atlikti pasirinktas elektros energijos kainų intervalas nuo 0,03 iki 0,10 EUR/kWh. Apatinė intervalo riba atspindi laikotarpius, kai dėl didelės atsinaujinančių energijos išteklių generacijos susidaro elektros perteklius, o viršutinė riba – padidėjusios paklausos ar ribotos pasiūlos sąlygas. Vidutinės intervalo reikšmės atitinka skirtingus

elektros tiekimo modelius: apie 0,05 EUR/kWh – ilgalaikių elektros pirkimo sutarčių (PPA) lygį, o apie 0,085 EUR/kWh – vidutinę biržos kainą.

Remiantis sudarytu ekonominiu modeliu, apskaičiuotos LCOH reikšmės skirtingoms elektros energijos kainoms pateiktos 5 lentelėje.

5 lentelė. LCOH priklausomybė nuo elektros energijos kainos

Elektros kaina (EUR/kWh)	LCOH (EUR/kg)
0,03	2,9
0,04	3,5
0,05	4,1
0,06	4,7
0,07	5,3
0,085	6,3
0,10	7,3



6 pav. LCOH priklausomybė nuo elektros energijos kainos (sudaryta autoriaus)

6 paveiksle pateikta žaliojo vandenilio gamybos kaštų (LCOH) priklausomybė nuo elektros energijos kainos. Grafike aiškiai matyti kritinė zona, kurioje žaliojo vandenilio gamyba tampa konkurencinga (apie 0,03–0,04 EUR/kWh).

Gauti rezultatai rodo aiškią priklausomybę tarp elektros energijos kainos ir žaliojo vandenilio gamybos kaštų. Didėjant elektros kainai, LCOH reikšmė didėja tiesiogiai proporcingai, o tai patvirtina, kad elektros energija yra pagrindinis kaštų veiksnys.

Esant žemoms elektros energijos kainoms (apie 0,03–0,04 EUR/kWh), LCOH sumažėja iki maždaug 3 EUR/kg, o tai leidžia žaliojo vandenilio gamybai artėti prie konkurencingo lygio. Esant aukštesnėms kainoms (0,08–0,10 EUR/kWh), LCOH reikšmė viršija 6 EUR/kg ir tampa ekonomiškai mažiau patraukli.

Tai rodo, kad žaliojo vandenilio gamybos ekonominis efektyvumas yra itin jautrus elektros energijos kainai, o galimybė naudoti pigesnę elektros energiją yra esminė sąlyga siekiant sumažinti gamybos kaštus.

Remiantis gautais rezultatais, galima daryti išvadą, kad žaliojo vandenilio gamyba tampa ekonomiškai konkurencinga tik esant žemoms elektros energijos kainoms. Tai patvirtina, kad elektrolizerio veikimo optimizavimas ir gebėjimas prisitaikyti prie elektros rinkos svyravimų yra esminiai veiksniai siekiant sumažinti gamybos kaštus.

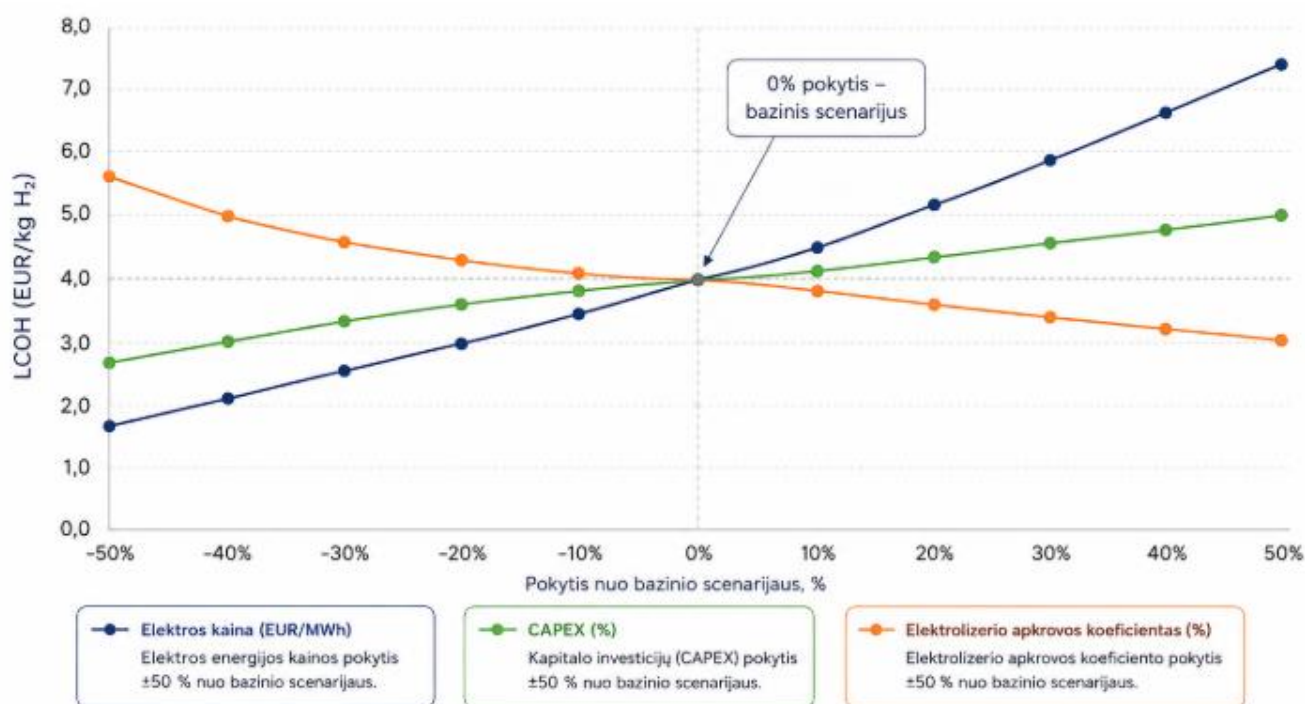
Atsižvelgiant į didėjančią elektros kainų nepastovumą ir dažnėjančius žemų kainų laikotarpius „Nord Pool“ regione, lankstus elektrolizerio veikimas gali tapti svarbiu konkurenciniu pranašumu, leidžiančiu sumažinti vidutines elektros energijos sąnaudas ir priartinti žaliojo vandenilio gamybą prie ekonomiškai pagrįsto lygio.

Todėl tolesniuose tyrimuose tikslinga detaliau vertinti elektrolizerio veikimo strategijas, įskaitant gamybos optimizavimą pagal valandinius elektros energijos kainų svyravimus, siekiant maksimaliai išnaudoti palankias rinkos sąlygas.

3.2.4. Jautrumo analizė

Siekiant įvertinti pagrindinių parametru įtaką žaliojo vandenilio gamybos kaštams, atlikta jautrumo analizė. Analizėje vertinamas LCOH rodiklio pokytis keičiant pagrindinius modelio parametrus $\pm 50\%$ intervale. 0% pokytis atitinka bazinį scenarijų, kai visi parametrai yra nepakitę ir naudojamos pradinės modelio prielaidos. Vertinami trys svarbiausi veiksniai: elektros energijos kaina, kapitalo investicijos (CAPEX) ir elektrolizerio apkrovos koeficientas.

Pasirinktas analizės metodas leidžia įvertinti, kurie parametrai daro didžiausią įtaką galutiniam vandenilio gamybos kaštui bei nustatyti sąlygas, kuriomis žaliojo vandenilio gamyba gali tapti konkurencinga.



7 pav. LCOH jautrumo analizė pagal pagrindinius parametrus (sudaryta autoriaus)

7 pav. pateikta LCOH jautrumo analizė rodo, kad didžiausią įtaką galutinei vandenilio savikainai daro elektros energijos kaina. Kaip matyti 7 paveiksle, 0 % taške visos kreivės susikerta viename taške, nes tai atitinka bazinį scenarijų, kai visos sąlygos yra vienodos. Keičiantis šiam parametru ± 50 % intervale, LCOH reikšmė kinta labiausiai, kas patvirtina stiprią priklausomybę tarp elektros kainos ir gamybos kaštų.

CAPEX pokytis taip pat turi įtakos LCOH rodikliui, tačiau ši įtaka yra mažesnė nei elektros kainos. Tai rodo, kad nors investicinės sąnaudos yra svarbios, ilgalaikėje perspektyvoje didesnę įtaką daro eksploatacinės sąnaudos.

Elektrolizerio apkrovos koeficiento didinimas lemia LCOH mažėjimą, nes didėja pagaminamo vandenilio kiekis ir efektyviau paskirstomos pastovios sąnaudos. Atitinkamai, mažėjant apkrovos koeficientui, LCOH didėja.

Apibendrinant galima teigti, kad žaliojo vandenilio konkurencingumas labiausiai priklauso nuo elektros energijos kainos ir įrenginio eksploataavimo efektyvumo.

3.2.5. Žaliojo vandenilio realizacijos ir konkurencingumo vertinimas

Iki šiol atlikta analizė buvo orientuota į žaliojo vandenilio gamybos kaštų nustatymą, tačiau, siekiant įvertinti ekonominį projekto pagrįstumą, būtina įtraukti ir realizacijos aspektą, t. y. įvertinti galimas vandenilio panaudojimo kryptis bei jo konkurencingumą rinkoje.

Viena pagrindinių žaliojo vandenilio panaudojimo sričių yra pramonė, ypač chemijos sektorius, kuriame vandenilis naudojamas kaip žaliava (pvz., amoniako gamyboje). Šiuo metu rinkoje dominuoja vadinamasis pilkasis vandenilis, gaminamas iš gamtinių dujų, kurio kaina paprastai yra mažesnė nei žaliojo vandenilio.

Tačiau pilkojo vandenilio gamyba yra susijusi su reikšmingomis CO₂ emisijomis, todėl, augant emisijų kainai, jo ekonominis patrauklumas mažėja. Atsižvelgiant į Europos Sąjungos klimato politiką ir nuosekliai didėjančius CO₂ mokesčius, tikėtina, kad ilgalaikėje perspektyvoje žaliojo vandenilio konkurencingumas didės [29; 44].

Remiantis literatūra, pilkojo vandenilio gamybos kaštai paprastai svyruoja apie 1,5–2,5 EUR/kg, tačiau įvertinus CO₂ emisijų kaštus, ši reikšmė gali padidėti iki 2,5–4 EUR/kg ar daugiau, priklausomai nuo emisijų kainos lygio [28; 44].

Palyginus su šiame darbe apskaičiuota žaliojo vandenilio savikaina (apie 4,1–6,3 EUR/kg, priklausomai nuo elektros kainos), matyti, kad esamomis rinkos sąlygomis žaliojo vandenilio gamyba dar nėra visiškai konkurencinga be papildomų skatinimo priemonių.

Tačiau jautrumo analizės rezultatai rodo, kad, esant žemoms elektros energijos kainoms (apie 0,03–0,04 EUR/kWh), žaliojo vandenilio kaštai gali sumažėti iki maždaug 3 EUR/kg, o tai leidžia jam konkuruoti su pilkuoju vandeniliu, ypač įvertinus CO₂ emisijų kaštus.

Siekiant tiksliau įvertinti CO₂ emisijų įtaką pilkojo vandenilio savikainai, galima atlikti papildomą skaičiavimą. Tyrimų duomenimis, kad gaminant 1 kg vandenilio iš gamtinių dujų garų reformingo būdu išskiriama apie 9–10 kg CO₂ [33; 44]. Šis emisijų lygis yra reikšmingas ir turi tiesioginę įtaką galutinei vandenilio savikainai, ypač įvertinus Europos Sąjungos apyvartinių taršos leidimų sistemos

(ETS) kainodarą. Todėl toliau atliekamas skaičiavimas leidžia kiekybiškai įvertinti CO₂ emisijų kaštų įtaką pilkojo vandenilio ekonominiam konkurencingumui.

Anglies dioksido emisijų kaštai vienam kilogramui vandenilio gali būti apskaičiuojami pagal formulę:

$$C_{CO_2} = e_{CO_2} \times P_{CO_2}; \quad (8)$$

čia: C_{CO_2} – CO₂ emisijų kaštai, EUR/kg H₂;

e_{CO_2} – specifinės CO₂ emisijos, t CO₂/kg H₂;

P_{CO_2} – CO₂ emisijų kaina, EUR/t CO₂.

Remiantis literatūroje pateikiamomis pilkojo vandenilio emisijomis (~9–10 kg CO₂/kg H₂, t. y. 0,009–0,010 t CO₂/kg H₂) [33; 44] ir Europos Sąjungos apyvartinių taršos leidimų sistemos kainomis (80–100 EUR/t CO₂) [29; 44], apskaičiuojama:

$$CO_2 \text{ kaštai} \approx 0,009 - 0,010 \times 80 - 100 \approx 0,7 - 1,0 \text{ EUR/kgH}_2.$$

Įvertinus šiuos kaštus, pilkojo vandenilio savikaina padidėja iki maždaug 2,5–3,5 EUR/kg ar daugiau, priklausomai nuo emisijų kainos lygio. Tai reikšmingai sumažina kainų skirtumą tarp žaliojo ir pilkojo vandenilio bei leidžia identifikuoti sąlygas, kuriomis žaliojo vandenilio gamyba tampa konkurencinga.

Todėl galima teigti, kad žaliojo vandenilio konkurencingumas tiesiogiai priklauso nuo elektros energijos kainos ir CO₂ emisijų kainos santykio, o šių veiksnių pokyčiai gali iš esmės pakeisti rinkos pusiausvyrą.

Atsižvelgiant į didėjantį atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą ir elektros kainų nepastovumą, taip pat griežtėjančią klimato politiką, galima prognozuoti, kad žaliojo vandenilio ekonominis patrauklumas ateityje didės.

Be to, žaliojo vandenilio panaudojimas transporto sektoriuje, ypač sunkiojo transporto ir uosto infrastruktūros srityse, gali sudaryti papildomas realizacijos galimybes, prisidedant prie dekarbonizacijos tikslų įgyvendinimo.

Vertinant žaliojo vandenilio gamybos aplinkosauginį efektyvumą, svarbu palyginti jį su tradiciniu pilkojo vandenilio gamybos būdu. Pilkasis vandenilis dažniausiai gaminamas iš gamtinių dujų naudojant garų metano reformavimo (SMR) technologiją, kurios metu išskiriamas reikšmingas anglies dioksido kiekis.

Mokslinių tyrimų pateikiamais duomenimis, pilkojo vandenilio gamyba išskiria apie 9–12 t CO₂ vienai tonai pagaminto vandenilio [33; 44]. Tuo tarpu žaliojo vandenilio gamyba, naudojant atsinaujinančią elektros energiją, pasižymi nuliui artimomis tiesioginėmis CO₂ emisijomis.

Šis skirtumas rodo reikšmingą žaliojo vandenilio aplinkosauginį pranašumą, leidžiantį ženkliai sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas ir prisidėti prie klimato kaitos švelninimo tikslų įgyvendinimo.

Atsižvelgiant į šiame darbe apskaičiuotą metinę žaliojo vandenilio gamybos apimtį (~121,7 t per metus), galima įvertinti išvengiamų emisijų kiekį. CO₂ emisijos, susidarancios gaminant vandenilį pilkojo vandenilio būdu, gali būti apskaičiuojamos pagal formulę:

$$CO_2 = Q_{H_2} \times EF; \quad (9)$$

čia: CO₂ – metinės anglies dioksido emisijos, t/metus;
Q_{H₂} – metinė vandenilio gamybos apimtis, t/metus;
EF – emisijos faktorius, t CO₂/t H₂.

Jei ši vandenilio apimtis būtų gaminama pilkojo vandenilio būdu, metinės CO₂ emisijos sudarytų:

$$CO_2 \approx 121,7 \times (9 - 12) \approx 1\,095 - 1\,460 \text{ tCO}_2 \text{ per metus.}$$

Tai reiškia, kad pereinant prie žaliojo vandenilio gamybos galima išvengti apie 1,1–1,5 tūkst. tonų CO₂ emisijų kasmet.

Papildomai galima įvertinti išvengiamų CO₂ emisijų ekonominę reikšmę, atsižvelgiant į Europos Sąjungos apyvartinių taršos leidimų sistemos (ETS) kainą. Esant 80–100 EUR/t CO₂ kainai [29; 44], metinė išvengtų emisijų vertė gali būti apskaičiuojama remiantis anksčiau nustatytu emisijų kiekiu.

Atsižvelgiant į tai, kad žaliojo vandenilio gamyba leidžia išvengti apie 1 095–1 460 t CO₂ per metus, ekonominė šių emisijų vertė sudaro:

$$\text{Ekonominė vertė} \approx 1\,095 - 1\,460 \times 80 - 100 \approx 87\,602 - 146\,000 \text{ EUR per metus.}$$

Šie rezultatai rodo, kad CO₂ emisijų mažinimas gali turėti reikšmingą ekonominę naudą, kuri, įtraukus į bendrą vertinimą, gali papildomai pagerinti žaliojo vandenilio gamybos konkurencingumą.

Apibendrinant galima teigti, kad žaliojo vandenilio gamyba reikšmingai prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimo, o įvertinus CO₂ kainodarą, šis poveikis gali turėti ir tiesioginę ekonominę išraišką.

3.2.6. Elektrolizės įrenginių lankstumo įtaka ekonominiam efektyvumui

Vertinant žaliojo vandenilio gamybos ekonominį efektyvumą, svarbu atsižvelgti ne tik į elektros energijos kainą, bet ir į elektros rinkos veikimo principus bei lankstaus vartojimo galimybes. Didėjant atsinaujinančių energijos išteklių daliai, elektros gamybos nepastovumas lemia augantį balansavimo poreikį, todėl lankstumo paslaugos tampa vis svarbesnės energetikos sistemoje.

Elektrolizės įrenginiai, ypač PEM tipo, pasižymi aukštu veikimo lankstumu, leidžiančiu greitai keisti apkrovą ar laikinai sustabdyti gamybą. Dėl šios priežasties jie gali būti laikomi lanksčiais elektros vartotojais, gebančiais optimizuoti energijos vartojimą pagal elektros kainų svyravimus [33; 44].

Be elektros sąnaudų optimizavimo, tokie įrenginiai gali dalyvauti elektros sistemos balansavimo procesuose. Lietuvos elektros rinkoje perdavimo sistemos operatorius organizuoja balansavimo paslaugų pirkimą, kuriame rinkos dalyviai gauna pajamas už lankstumo ir rezervų teikimą [56]. Be to, dėl Baltijos šalių elektros rinkos integracijos ir augančios atsinaujinančios energetikos dalies šių paslaugų poreikis ateityje didės [57].

Dėl šių priežasčių tradicinis svertinių vandenilio gamybos kaštų (LCOH) vertinimas, pagrįstas vien tik sąnaudų analize, gali nevisiškai atspindėti realų projekto ekonominį potencialą. Įtraukus papildomų pajamų iš elektros sistemos paslaugų bei energijos kainų arbitražo galimybes, bendras projekto ekonominis efektyvumas gali būti reikšmingai didesnis.

Siekiant įvertinti galimą šių veiksnių įtaką, galima atlikti supaprastintą papildomų pajamų vertinimą. Remiantis šiame darbe apskaičiuota metine žaliojo vandenilio gamybos apimtimi (~121 700 kg) ir baziniu LCOH (~4,5 EUR/kg), bendros metinės sąnaudos sudaro apie 547 650 EUR.

Įvertinus galimybę dalyvauti elektros sistemos balansavimo rinkoje, galima daryti prielaidą, kad lankstus elektrolizerio veikimas galėtų generuoti papildomų pajamų. Net ir konservatyviai vertinant 50 000–100 000 EUR metinių pajamų intervalą, efektyvios sąnaudos sumažėtų iki 447 650–497 650 EUR.

Atitinkamai efektyvus LCOH sumažėtų iki maždaug 3,68–4,09 EUR/kg, t. y. apie 10–20 %, palyginti su baziniu scenarijumi. Tai rodo, kad elektrolizės įrenginių dalyvavimas elektros rinkoje gali turėti reikšmingą įtaką žaliojo vandenilio ekonominiam konkurencingumui.

Apibendrinant galima teigti, kad žaliojo vandenilio gamybos ekonominis efektyvumas priklauso ne tik nuo elektros energijos kainos, bet ir nuo gebėjimo integruotis į elektros rinką kaip lankstus vartotojas. Tokia integracija leidžia pereiti nuo pasyvaus energijos vartojimo modelio prie aktyvaus dalyvavimo energetikos sistemoje, o tai ateityje gali tapti vienu svarbiausių konkurencingumo veiksnių.

Išvados

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad žaliojo vandenilio gamyba, naudojant elektrolizės technologijas, yra viena svarbiausių priemonių mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, tačiau jos plėtrą šiuo metu riboja aukštos gamybos sąnaudos ir priklausomybė nuo elektros energijos kainos.
2. Išanalizavus Europos Sąjungos ir Lietuvos energetikos politikos dokumentus nustatyta, kad žaliojo vandenilio plėtra yra strategiškai svarbi kryptis, tačiau jos praktinis įgyvendinimas tiesiogiai priklauso nuo ekonominio konkurencingumo ir energijos rinkos sąlygų.
3. Parengus žaliojo vandenilio gamybos ekonominio vertinimo metodiką, pagrįstą LCOH rodikliu, nustatyta, kad šis metodas leidžia sistemiškai įvertinti gamybos sąnaudas bei pagrindinių parametrų įtaką galutinei vandenilio savikainai.
4. Atlikus ekonominį vertinimą nustatyta, kad žaliojo vandenilio gamybos savikaina (LCOH) labiausiai priklauso nuo elektros energijos kainos ir, esant nagrinėtam scenarijui, siekia apie 4,1 Eur/kg naudojant PPA modelį ir apie 6,3 Eur/kg elektros biržos sąlygomis. Tai rodo, kad esamomis rinkos sąlygomis žaliojo vandenilio gamyba išlieka mažiau konkurencinga nei pilkojo vandenilio (apie 1,5-2,5 EUR/kg), ypač neįvertinus papildomų skatinimo priemonių.
5. Atlikta jautrumo analizė parodė, kad didžiausią įtaką LCOH rodikliui daro elektros energijos kaina - jos pokyčiai $\pm 50\%$ intervale lemia didžiausią galutinės savikainos svyravimą, lyginant su kitais parametrais (CAPEX ir elektrolizerio apkrovos koeficientu). Nustatyta, kad esant žemoms elektros energijos kainoms (apie 0,03-0,04 EUR/kWh), žaliojo vandenilio savikaina gali sumažėti iki maždaug 3 EUR/kg, o tai leidžia jam tapti konkurencingu. Tuo tarpu esant aukštesnėms elektros kainoms, žaliojo vandenilio gamyba išlieka ekonomiškai nepalanki be papildomų optimizavimo sprendimų ar paramos mechanizmo.

Rekomendacijos

Remiantis atlikto tyrimo rezultatais, galima pateikti šias rekomendacijas:

1. Siekiant didinti žaliojo vandenilio gamybos ekonominę efektyvumą, rekomenduojama taikyti lankstaus elektrolizerio veikimo strategijas, leidžiančias optimizuoti elektros energijos vartojimą pagal kainų svyravimus rinkoje.
2. Investiciniuose sprendimuose tikslinga prioritetą teikti projektams, turintiems galimybę užsitikrinti žemos kainos elektros energijos tiekimą (pvz., per ilgalaikes elektros pirkimo sutartis), nes elektros energijos kaina yra pagrindinis LCOH rodiklį lemiantis veiksnys.
3. Energetikos politikos formuotojams rekomenduojama skatinti lankstaus elektros vartojimo sprendimus ir sudaryti sąlygas pramonės vartotojams dalyvauti elektros rinkose, įskaitant balansavimo paslaugų teikimą, siekiant didinti energetikos sistemos efektyvumą.
4. Atsižvelgiant į reikšmingą aplinkosauginį poveikį, rekomenduojama toliau plėtoti žaliojo vandenilio gamybą kaip vieną iš priemonių mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas.
5. Ateities tyrimuose tikslinga detaliau analizuoti realaus laiko elektros kainų duomenis ir elektrolizerio veikimo optimizavimo modelius, siekiant tiksliau įvertinti galimą ekonominę naudą.

Literatūros sąrašas

1. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). *The Paris Agreement*. Prieiga per internetą: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (žiūrėta 2025-05-11).
2. United Nations (2015). *Paris Agreement*. Prieiga per internetą: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=en (žiūrėta 2025-05-11).
3. Europos Sąjunga (2016). Paryžiaus susitarimas. OL L 282, 2016 10 19, p. 4–18. Prieiga per internetą: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)) (žiūrėta 2025-05-11).
4. Hydrogen Council (2021). *Hydrogen for Net Zero*. Prieiga per internetą: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf> (žiūrėta 2025-05-11).
5. Hydrogen Council (2021). CEO Coalition to COP26 leaders: Hydrogen to contribute over 20% of global carbon abatement by 2050 – strong public-private collaboration required to make it a reality. Prieiga per internetą: <https://hydrogencouncil.com/en/ceo-coalition-to-cop26-leaders-hydrogen-to-contribute-over-20-of-global-carbon-abatement-by-2050-strong-public-private-collaboration-required-to-make-it-a-reality/> (žiūrėta 2025-05-11).
6. International Energy Agency (2021). *Global Hydrogen Review 2021: Executive summary*. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary> (žiūrėta 2025-05-11).
7. Encyclopaedia Britannica (2026). *Hydrogen*. Prieiga per internetą: <https://www.britannica.com/science/hydrogen> (žiūrėta 2025-05-11).
8. Staffell, I.; Scamman, D.; Velazquez Abad, A.; Balcombe, P.; Dodds, P. E.; Ekins, P.; Shah, N.; Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), p. 463–491. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E> (žiūrėta 2025-05-11).
9. De Blasio, N. (2024). The colors of hydrogen. *Belfer Center for Science and International Affairs*. Prieiga per internetą: <https://www.belfercenter.org/research-analysis/colors-hydrogen> (žiūrėta 2025-05-11).
10. International Energy Agency (2023). *Global Hydrogen Review 2023*. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023> (žiūrėta 2025-05-11).
11. European Commission (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0301> (žiūrėta 2025-05-11).
12. Federal Ministry For Economic Affairs And Energy (2020). *The National Hydrogen Strategy*. Prieiga per internetą: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf> (žiūrėta 2025-05-12).
13. Ministry Of Economy, Trade And Industry (METI) (2023). *Japan's hydrogen strategy*. Prieiga per internetą: https://www.meti.go.jp/english/press/2023/0613_001.html (žiūrėta 2025-05-12).

14. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija (2024). Vandenilio plėtros Lietuvoje 2024–2050 m. gairės. Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/vandenilio-technologijos-2/vandenilio-pletros-gaires/> (žiūrėta 2025-05-12).
15. Offshore Energy (2025). *EU backs hydrogen infrastructure projects with over €250 million*. Prieiga per internetą: <https://www.offshore-energy.biz/eu-backs-hydrogen-infrastructure-projects-with-over-e250-million/> (žiūrėta 2025-05-12).
16. Van de Graaf, T.; Sovacool, B. K. (2020). Global energy politics. *Polity Press*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/341213829_Global_Energy_Politics (žiūrėta 2025-05-12).
17. Baltimore Aircoil Company (2023). *Green hydrogen production*. Prieiga per internetą: <https://www.baltimoreaircoil.eu/en/solutions/green-hydrogen-production> (žiūrėta 2025-05-12).
18. Nikolaidis, P.; Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, p. 597–611. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044> (žiūrėta 2025-06-06).
19. Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar Energy*, 78(5), 661–669. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.003> (žiūrėta 2025-06-06).
20. Zhang, X.; Li, Y.; Chen, H.; Wang, Z. (2025). Research progress of solid oxide electrolysis cell system: Dynamic modeling and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114839. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125008391> (žiūrėta 2025-06-06).
21. Devkota, S. (2023). Water electrolysis different methods. *LinkedIn*. Prieiga per internetą: <https://www.linkedin.com/pulse/water-electrolysis-different-methods-/> (žiūrėta 2025-06-06).
22. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija (2023). *Remiami trys pirmieji žaliojo vandenilio gamybos vystymo projektai transporto srityje*. Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/lt/naujienos/remiami-trys-pirmieji-zaliojo-vandenilio-gamybos-vystymo-projektai-transporto-srityje/> (žiūrėta 2025-06-06).
23. Lietuvos Respublikos finansų ministerija (2022). Projektų finansavimo ir administravimo taisyklės. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/14e33320f1ed11ec8fa7d02a65c371ad/QcHjOICbfbk>. (žiūrėta 2025-06-06).
24. Enspire Science Ltd (2023). *TRL scale in Horizon Europe and ERC explained*. Prieiga per internetą: <https://enspire.science/trl-scale-horizon-europe-erc-explained/> (žiūrėta 2025-06-06).
25. European Commission, Directorate-General For Research And Innovation (2025). Scaling up ideas: Using technology readiness levels to analyse technology progression in Horizon Europe. *Publications Office of the European Union*. Prieiga per internetą: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/249072ec-92a9-11f0-97c8-01aa75ed71a1/language-en> (žiūrėta 2025-06-06).
26. EPCM Holdings. *Green hydrogen technology evaluation criteria for electrolyser selection*. Prieiga per internetą: <https://epcmholdings.com/green-hydrogen-technology-evaluation-criteria-for-electrolyser-selection/> (žiūrėta 2025-06-06).
27. International Energy Agency (2024). *Global hydrogen review 2024*. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024> (žiūrėta 2025-06-09).

28. Hydrogen Council, Mckinsey & Company (2023). *Hydrogen insights 2023*. Prieiga per internetą: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023/> (žiūrėta 2025-06-09).
29. European Commission (2020). *Hydrogen*. Prieiga per internetą: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en (žiūrėta 2025-06-09).
30. Čučuk, A. (2025). EU backs hydrogen infrastructure projects with over €250 million. *Offshore Energy*. Prieiga per internetą: <https://www.offshore-energy.biz/eu-backs-hydrogen-infrastructure-projects-with-over-e250-million/> (žiūrėta 2025-06-10).
31. Krumpelmann, S. (2024). IEA raises 2030 renewable H2 cost estimates. *Argus Media*. Prieiga per internetą: <https://www.argusmedia.com/es/news-and-insights/latest-market-news/2614112-ia-raises-2030-renewable-h2-cost-estimates> (žiūrėta 2025-06-10).
32. Schmidt, O.; Gambhir, A.; Staffell, I.; Hawkes, A.; Nelson, J.; Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470–30492. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319918324157> (žiūrėta 2025-06-10).
33. International Renewable Energy Agency (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. Prieiga per internetą: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf (žiūrėta 2025-06-10).
34. International Energy Agency (2022). *Global hydrogen review 2022*. Prieiga per internetą: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf> (žiūrėta 2025-11-25).
35. European Commission. *Connecting Europe Facility*. Prieiga per internetą: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en (žiūrėta 2025-11-25).
36. Ueckerdt, F.; Verpoort, P. C.; Anantharaman, R.; Bauer, C.; Beck, F.; Longden, T.; Roussanaly, S. (2023). On the cost competitiveness of blue and green hydrogen. *Joule*. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435123004968> (žiūrėta 2025-11-25).
37. Nigbur, F.; Robinius, M.; Wienert, P.; Deutsch, M. (2022). Levelised cost of hydrogen: Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful. *Agora Energiewende*. Prieiga per internetą: https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2022/2022-12-10_Trans4Real/A-EW_301_LCOH_WEB.pdf (žiūrėta 2025-12-09).
38. Clean Hydrogen Observatory (2024). *Manual: Levelised cost of hydrogen (LCOH) calculator*. Prieiga per internetą: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-06/Manual%20-%20Levelised%20Cost%20of%20Hydrogen%20%28LCOH%29%20Calculator.pdf> (žiūrėta 2026-01-05).
39. Hydrovolt Energy (2025). *LCOH 101: How we calculate the true cost of green hydrogen*. Prieiga per internetą: <https://hydrovoltenergy.com/2025/06/05/lcoh-101-how-we-calculate-the-true-cost-of-green-hydrogen/> (žiūrėta 2026-01-05).
40. European Commission. *REPowerEU*. Prieiga per internetą: https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en (žiūrėta 2026-01-05).
41. Centrinė projektų valdymo agentūra (2023). *Žaliųjų degalų (vandenilio) gamybos plėtra Klaipėdos uoste*. Prieiga per internetą: <https://www.esinvesticijos.lt/sutartys/zaliuju-degalu-vandenilio-gamybos-pletra-klaipedos-uoste> (žiūrėta 2025-12-09).

42. AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcija (2023). *Žaliasis uostas: vandenilio gamyba ir pildymo stotelė*. Prieiga per internetą: <https://portofklaipeda.lt/uosto-direkcija/projektai/zaliasis-uostas-vandenilio-gamyba-ir-pildymo-stoteles/> (žiūrėta 2026-12-09).
43. AB Klaipėdos valstybinio jūrų uosto direkcija (2024). *Žaliųjų degalų (vandenilio) gamybos plėtra Klaipėdos uoste: techninis projektas. Bendroji dalis, II tomas, techninis aprašymas (SR2024-001-TP-BD, laida A)* (žiūrėta 2026-02-27).
44. International Energy Agency (2023). *Global hydrogen review 2023*. Prieiga per internetą: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf> (žiūrėta 2026-02-27).
45. Schmidt, O.; Gambhir, A.; Staffell, I.; Hawkes, A.; Nelson, J.; Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30470–30492. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045> (žiūrėta 2026-02-27).
46. Lazard (2021). *Lazard's levelized cost of hydrogen analysis*. Prieiga per internetą: <https://www.lazard.com/media/12qcx11j/lazards-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-vf.pdf> (žiūrėta 2026-02-27).
47. Ueckerdt, F.; Bauer, C.; Dirksen, S.; Luderer, G. (2023). On the cost competitiveness of blue and green hydrogen. *Joule*, 7(4), 850–875. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.006> (žiūrėta 2026-02-27).
48. Hu, Z.; Huo, H.; Li, D.; Song, G.; Xu, J. (2026). Composite control of a hydrogen production system coupling the wind–solar power generation with PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 226, 154437. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/S0360319926010748> (žiūrėta 2026-02-27).
49. Nord Pool (2025). *Day-ahead elektros energijos kainos (Lietuva)*. Prieiga per internetą: <https://data.nordpoolgroup.com/auction/day-ahead/prices?deliveryDate=2025-03-30¤cy=EUR&aggregation=MonthlyAggregate&deliveryAreas=LT> (žiūrėta 2026-03-04).
50. Review And Morphological Analysis Of Renewable Power Purchasing Agreements (2024). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114xxx> (žiūrėta 2026-03-04).
51. Nnabuife, S. G.; Hamzat, A. K.; Whidborne, J.; Kuang, B.; Jenkins, K. W. (2025). Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: A technology review for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 107, 218–240. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.342> (žiūrėta 2026-03-04).
52. Zhang, H.; Wang, L.; Chen, J. (2024). Techno-economic analysis of hydrogen production pathways. *Energy Conversion and Management*. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424007817> (žiūrėta 2026-03-05).
53. Li, X.; Zhang, Y.; Wang, Z.; Liu, H.; Chen, J. (2024). Life cycle analysis of hydrogen production pathways. *Energy Conversion and Management*, 302, 117705. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424007817> (žiūrėta 2026-03-05).
54. Energijos skirstymo operatorius (2026a). *Tarifų planai ir kainos 2026 metais*. Prieiga per internetą: <https://www.eso.lt/namams/elektra/tarifu-planai-kainos-atsiskaitymas/tarifu-planai-ir-kainos-2026-metais/4801> (žiūrėta 2026-03-12).

55. Energijos skirstymo operatorius. (2026b). Elektros įvedimo ir galios didinimo paslaugos kaina. Prieiga per internetą: <https://www.eso.lt/namams/elektra/tarifu-planai-kainos-atsiskaitymas/elektros-ivedimo-ir-galios-didinimo-paslaugos-kaina/3219> (žiūrėta 2026-03-12).
56. Litgrid (2024). Elektros sistemos balansavimo paslaugos. Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/paslaugos/balansavimo-paslaugos/> (žiūrėta 2026-05-01).
57. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija (2023). Nacionalinė energetikos nepriklausomybės strategijos įgyvendinimo planas ir energetikos sektoriaus plėtros kryptys. Prieiga per internetą: <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/energetika/strategija> (žiūrėta 2026-05-01).