

ŽALIOJO VANDENILIO EKOSISTEMOS IR ELEKTROS ENERGETIKOS SEKTORIAUS SĄVEIKOS ANALIZĖ

Adas Zakarauskas, Energetikos transformacijos centras,
AB Amber Grid



VANDENILIO PLĖTROS LIETUVOJE 2025–2027 METAIS GAIRIŲ ĮGYVENDINIMO VEIKSMŲ PLANAS

“Atlikti žaliojo vandenilio ekosistemos ir elektros energetikos sektoriaus sąveikos analizę, įvertinant elektros pavertimo dujomis (angl. Power-to-Gas) technologijas bei jų pritaikymą teikiant elektros energetikos sistemos lankstumo paslaugas.”





ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS LANKSTUMAS IR JO POREIKIS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS **BALANSAVIMO RINKOS**

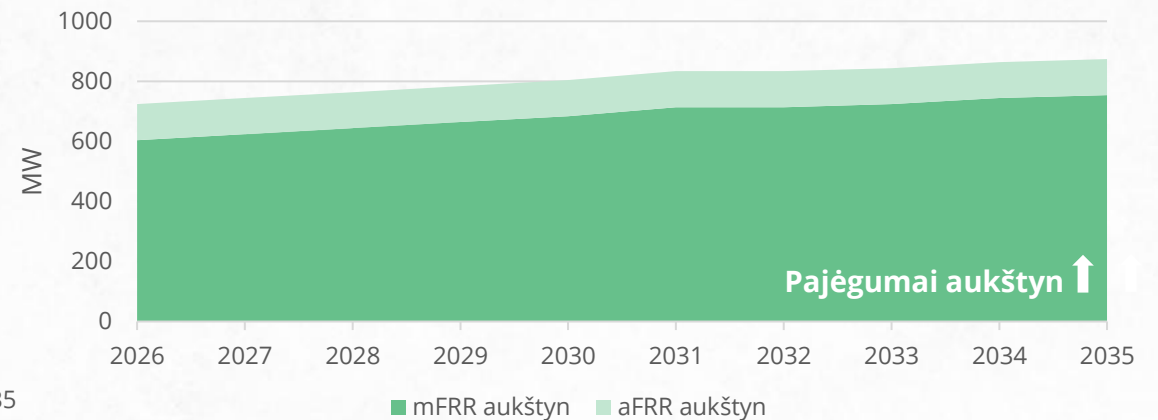
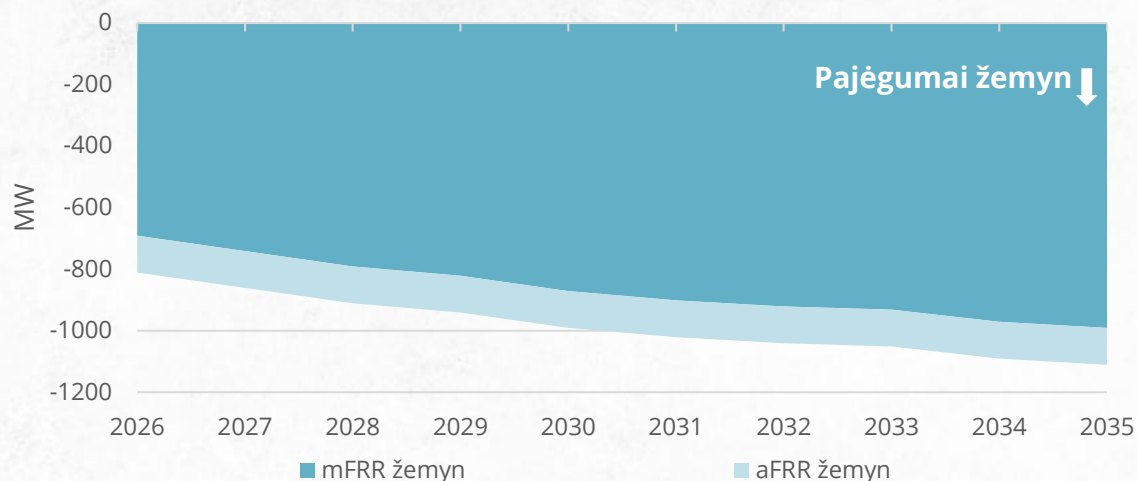
SISTEMOS BALANSAVIMO POREIKIAI

Prognozės rengiamos atsižvelgiant į regioninę AEI plėtrą, istorinius disbalanso kiekius (trumpalaikius ir ilgalaikius). Pažymėtina, jog tai indikaciniai balansavimo pajėgumų poreikiai, faktiniai balansavimo pajėgumų poreikiai nustatomi vadovaujantis Baltijos PSO patvirtinta metodika.

Remiantis 2025 m. prognoze, nustatyta, kad trumpos trukmės dažnio atkūrimo rezervo (FRR) maksimalūs poreikiai Baltijos LFC bloke augs. Prognozuojama, jog 2035 m. pajėgumų poreikis aukštyn augs 17 proc., o žemyn 27 proc. lyginant su 2026 m.

Baltijos šalių PSO balansavimo pajėgumų poreikių prognozės – indikacija rinkai dėl lanksčių pajėgumų plėtros. Svarbu pažymėti, jog siekiant užtikrinti balansavimo poreikius, reikalinga integruoti didesnį kiekį lanksčių pajėgumų - **1 MW lankstumo poreikis reikalauja 1,6 MW instaliuotų lanksčių pajėgumų.**

6 pav. FRR pajėgumų 2025-2032 m. prognozė



Šaltinis: „Litgrid“, AST ir „Elering“, „Baltic LFC block FRR dimensioning forecast 2025-2032“ (2023 m.)



ELEKTROLIZĖS ĮRENGINIŲ TECHNOLOGIJOS

ELEKTROLIZĖS ĮRENGINIŲ TECHNOLOGIJOS

Trys pagrindinės elektrolizės technologijos, kurios skiriasi brandumu, efektyvumu ir eksploatacinėmis charakteristikomis:

- **Šarminės elektrolizės elementai** (*angl. Alkaline*);
- **Protonų mainų membraniniai elektrolizės elementai** (*angl. Polymer Electrolyte Membrane, PEM*);
- Kietojo oksido elektrolizės elementai* (*angl. Solid Oxide Electrolyser Cell, SOEC*).

8 pav. Elektrolizės įrenginių techninės charakteristikos

Characteristic	Time horizon	Alkaline	PEM
Costs, efficiency and lifetime			
CAPEX in €/kWe	Today	437 – 1,500 (700)	613 – 2,000 (1,160)
The numbers in parenthesis are classified as typical by DNV-GL/GIE.	2030	357 – 800 (621)	350 – 1,350 (663)
OPEX as % of CapEx	Today	2 %	2 – 3 %
	2030	2 %	2 – 3 %
Efficiency at nominal load, LHV	Today	63 – 70 %	61 – 70 %
	2030	65 – 71 %	63 – 75 %
Lifetime stack (hours)	Today	60,000 – 75,000	50,000 – 80,000
	2030	90,000 – 100,000	60,000 – 90,000

Šarminiai elektrolizeriai yra komercinė technologija ir pasižymi **mažiausiu CapEx** šiuo metu, tačiau tikėtina, kad iki 2030 m. tipinės šarminės ir PEM kapitalo sąnaudos bus panašios.

Patobulinus diafragmų ir elektrokatalizatorių konstrukciją, jų eksploatacinės savybės šiandien yra panašios į PEM (63–70 % efektyvumas).

Šarminės technologijos elektrolizės įrenginio veikimo trukmė (60 – 75 tūkst. val.)

PEM konstrukcija užtikrina didelį efektyvumą (61–70 % efektyvumas), tačiau dėl didelio korozijos lygio (oksidacinės aplinkos) šiai technologijai reikalingi taurieji metalai kaip katalizatoriai, galintys atlaikyti šias sąlygas – iridžio anodui ir platinos katodui – o tai daro poveikį CapEx ir dėl to yra priklausoma nuo tauriųjų metalų rinkos, jos **CapEx yra didesnė nei šarminė**.

PEM technologijos elektrolizės įrenginio veikimo trukmė (50 – 80 tūkst. valandų).

ELEKTROLIZĖS ĮRENGINIŲ TECHNOLOGIJOS

9 pav. Elektrolizės įrenginių techninės charakteristikos

Characteristic	Time horizon	Alkaline	PEM
Flexibility			
Load range (relative to nominal load) The overload condition can be kept for a limited amount of time, requires oversized equipment and entails efficiency losses.	Today	10–110 %	0–160 %
	2030	Expected by 2050: 5–300 %	Expected for 2050: 5–300 %
Start-up time (warm, cold)	Today	1–10 minutes	1 second–5 minutes
	2030	Not available	Not available
Shutdown	Today	1–10 minutes	1 second–5 minutes
	2030	Not available	Not available
Ramp-up / Ramp- down	Today	0.2–20 % / second	100 % / second
	2030	Not available	Not available

- PEM elektrolizeriai yra daug lankstesni nei kitos technologijos.
- Šalto paleidimo ir išjungimo laikas svyruoja nuo 1 sekundės iki 5 minučių.
- PEM elektrolizeriai taip pat gali padidinti / sumažinti elektros energijos suvartojimą 100 % per sekundę greičiu - **jie gali pereiti iš budėjimo režimo į nominalų pajėgumą per vieną sekundę.**
- PEM elektrolizerių veikimo diapazonas yra plačiausias – nuo 0 iki 160 % jų nominalios galios.
- Šarminių elektrolizerių šalto paleidimo ir išjungimo laikas svyruoja 1–10 minučių.
- Šarminės technologijos perėjimas iš budėjimo į nominalų pajėgumą – 0,2–20 % per sekundę, t.y. nuo budėjimo režimo iki nominalaus pajėgumo nuo 5 s. iki daugiau nei 8 min.
- Šarminių elektrolizerių veikimo diapazonas yra mažesnis nei PEM technologijos ir vyrauja 10–110 % jų nominalios galios diapazone.

Elektrolizeriai yra nuolatinės srovės įrenginiai, todėl patys savaime negali užtikrinti reaktyviosios galios. Tačiau elektrolizeriai gali teikti reaktyviosios galios arba inercijos paslaugas, jei juose yra papildoma įranga. Tokiu atveju bet kokia likusi kintamosios ir nuolatinės srovės keitiklio talpa gali būti naudojama teikti reaktyvios galios paslaugas.

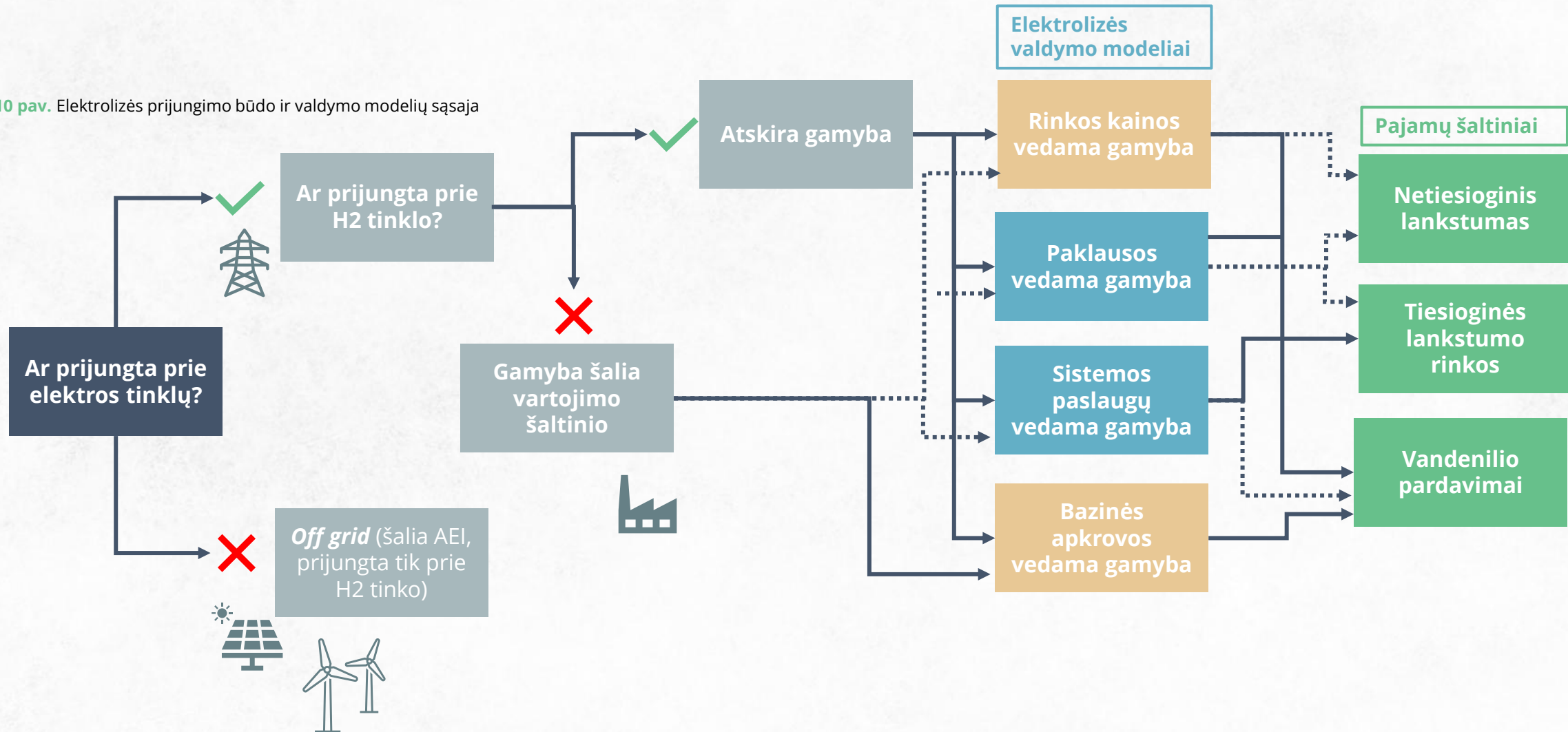


P2X TECHNINĖS GALIMYBĖS TEIKTI SISTEMOS LANKSTUMO PASLAUGAS

P2X TECHNINĖS GALIMYBĖS TEIKTI SISTEMOS LANKSTUMO PASLAUGAS

GALUTINIO PRODUKTO IR PAJAMŲ ŠALTINIO NUSTATYMAS

10 pav. Elektrolizės prijungimo būdo ir valdymo modelių sąsaja



ELEKTROLIZĖS ĮRENGINIŲ TECHNOLOGIJŲ TECHNINĖS GALIMYBĖS TEIKTI BALANSAVIMO PASLAUGAS

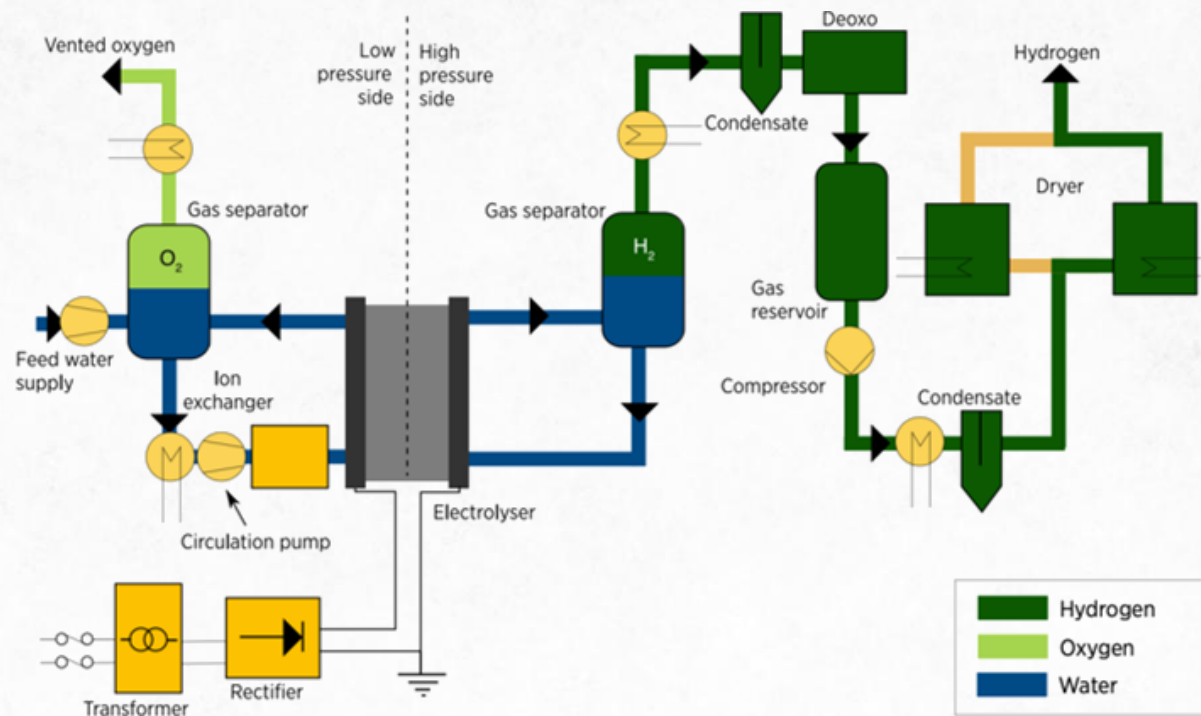
KITI ELEKTROLIZĖS ĮRENGINIO KOMPONENTAI (angl. *Balance of Plant, BoP*)

Vandenilio gamybos įrenginiai - kompleksas įvairių inžinerinių įrenginių: pačio elektrolizės įrenginio (angl. *stack*) dujų (vandenilio, deguonies) atskyrimo įrenginių, kompresorių, įtampos keitiklių, valdymo sistemos, vandenilio saugojimo talpyklų ir t.t.

Elektrolizės įrengių technologija, kiti gamybai reikalingi įrenginiai (angl. *balance of plant*) parenkami atsižvelgiant į planuojamos veiklos pobūdį, vandenilio gamybos profilį ir planuojamus pajamų šaltinius.

Elektrolizės įrenginių galimybė teikti lankstumo paslaugas priklauso nuo visų įrenginio komponentų techninių galimybių teikti lankstumo paslaugas.

11 pav. Elektrolizės įrenginio schema



Šaltinis: Newtrace

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS **BALANSAVIMO RINKOS**

STANDARTINIŲ BALANSAVIMO PRODUKTŲ APIBRĖŽIMAI

7 pav. FCR, aFRR, mFRR produktų techniniai parametrai

Parametras	FCR	aFRR	mFRR
Produkto sandara	Balansavimo pajėgumas	Balansavimo pajėgumas + balansavimo energija (energijos pasiūlymai)	Balansavimo pajėgumas + balansavimo energija (energijos pasiūlymai)
Aktyvacijos būdas	Automatinis	Automatinis	Rankinis
Aktyvacijos laikas (angl. full activation time, FAT)	< 30 s	< 5 min	< 12,5 min
Trukmė	15 min	15 min	15 min
Minimalus pasiūlymo dydis	1 MW	1 MW	1 MW
Pasiūlymo tikslumas	1 MW	1 MW	1 MW
Kryptis	Simetrinis produktas	Aukštyn arba žemyn	Aukštyn arba žemyn

Šaltinis: AB Litgrid

FCR:

FCR reiškia **dažnio išlaikymo rezervus**, kuriais galima suvaldyti sistemos dažnį atsiradus disbalansui;

Prekiaujama nustatant tik pajėgumų kainą (kartais nustatant aktyvacijos kainą) ir jie automatiškai aktyvuojami tinklo operatoriaus nurodymu;

mFRR ir aFRR:

FRR (aFRR ir mFRR) – aktyviosios galios rezervai, skirti sistemos dažniui atkurti iki vardinio dažnio, o sinchroninėje zonoje, kurią sudaro daugiau nei viena apkrovos ir dažnio valdymo (LFC) sritis, – atkurti suplanuotą galios balansą;

FRR apima eksploatavimo rezervus, kurių aktyvavimo trukmė yra nuo 30 sekundžių iki 15 minučių. FRR produktus sudaro balansavimo pajėgumų rezervai ir jų aktyvavimo paslaugos. FRR apima automatinį (aFRR) ir rankinį (mFRR) aktyvavimą;

ELEKTROLIZĖS ĮRENGINIŲ TECHNOLOGIJŲ TECHNINĖS GALIMYBĖS **TEIKTI BALANSAVIMO PASLAUGAS**

12 pav. Elektrolizės technologijų galimybės teikti balansavimo paslaugas

	Šarminė	PEM
FCR	Gali teikti, su tam tikrai apribojimais	Gali teikti, su tam tikrai apribojimais
aFRR	Gali teikti, su tam tikrai apribojimais	Gali teikti
mFRR	Gali teikti	Gali teikti

Šaltinis: ENTSO-E, „Potential of P2H2 technologies to provide system services“ (2022 m. birželis)

Tiek PEM, tiek šarminė technologija gali technologiškai teikti FCR paslaugas, jeigu jie tuo metu yra operatyvūs, kadangi FCR aktyvavimo laikas yra nuo 1 s, o PEM elektrolizerių šaltojo paleidimo laikas svyruoja nuo 1 sekundės iki 5 minučių ir šarminių – 1–10 min.

aFRR paslaugas be apribojimų gali teikti PEM technologija, o šarminiai elektrolizės įrenginiai dėl tų pačių priežasčių kaip ir FCR paslaugose, šias paslaugas gali teikti su operatyvumo sąlyga.

Tiek PEM, tiek šarminiai elektrolizeriai gali užtikrinti balansavimą žemyn, padidindami elektros energijos suvartojimą, jei jie neveikia maksimalia apkrova. Tačiau jie gali užtikrinti balansavimą aukštyn (sumažindami vartojimą) tik karštoje būsenoje. Todėl simetrijos reikalavimas tenkinamas tik tuo atveju, jei elektrolizatoriai balansavimo paslaugų teikimo laikotarpiu veikia.

PSO SU DAŽNIO REGULIAVIMU NESUSIJUSIOS LANKSTUMO PASLAUGOS IR STO ĮSIGYJAMOS LANKSTUMO PASLAUGOS

Perdavimo sistemos operatoriaus (PSO) su dažnio reguliavimu nesusijusios paslaugos (angl. *Non-Frequency Ancillary Service, NFAS*) – PSO (AB LITGRID) įsigyjamų paslaugų, skirtų sistemos specifiniams techniniams parametrams palaikyti ir sistemos darbui ekstremaliose situacijose (*last resort measure*), kuomet visos kitos priemonės jau išnaudotos.

IŠVADOS:

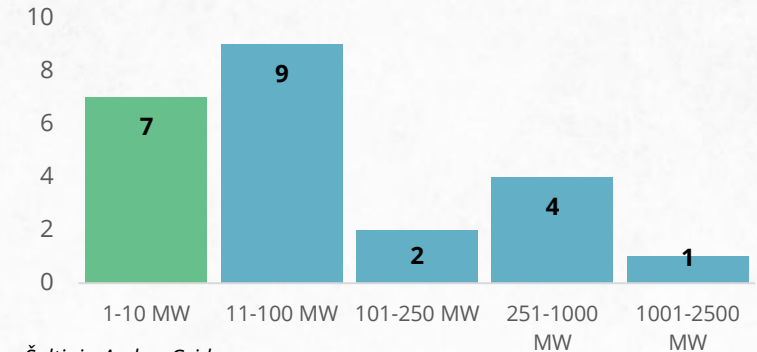
Rinkoje įsigyjamų NFAS paslaugų yra last resort measures, kuomet dienos eigos, balansavimo rinkos „nesuveikė“. Tokioje situacijoje sistemai reikalingi generacijos šaltiniai, kurie užtikrintų sistemos patikimumą ir stabilumą. Pagal atliktą vertinimą, NFAS paslaugų elektrolizės įrenginiai teikti negali, kadangi jas teikia arba +20 MW generatoriai, arba specifinė TSO valdoma įranga (pvz. sinchroniniai kompensatoriai);

Skirstymo tinklo operatorių (STO) lankstumo paslaugos – tai STO įsigyjamų paslaugų, kurių įsigijimas reglamentuotas EEĮ ir poįstatyminiuose TA. Jos skirtos skirstomojo tinklo nepertraukiamam ir efektyviam valdymui. Lankstumo paslaugos sprendžia lokalias tinklo problemas, t. y. STO vertina lankstumo poreikį tinkle ir identifikuoja konkrečias vietas, kurioms reikalinga rekonstrukcija arba lankstumo paslaugos, priklausomai nuo ekonominio alternatyvų vertinimo.

IŠVADOS:

- Elektrolizės įrenginiai gali teikti ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslaugą, bet yra tam tikrų barjerų:
 - Iki galo nėra aiškūs ir įvardinti ESO tinklo lankstumo poreikiai ateityje, todėl ESO neskelbia lokacijų, kuriose identifikuojamas potencialus lankstumo poreikis, rinkos dalyviams sudėtinga planuoti investicijas, trūksta apibrėžtumo.
 - Lankstumo paslaugos šiuo metu įsigyjamų viešųjų pirkimų būdu, todėl sudėtingesnis ir ilgesnis administracinis, biurokratinis procesas dalyvauti šioje rinkoje.
- Pagal atliktą rinkos dalyvių apklausą (2025 m.), didžioji dalis elektrolizės įrenginių jungsis prie perdavimo tinklo, todėl ESO lankstumo paslaugų rinkos potencialas **šiuo metu** yra ribotas.

13 pav. Projektų skaičius pagal planuojamos elektrolizės galią (2025)



Šaltinis: Amber Grid

P2X TECHNOLOGIJŲ EKONOMINĖS SĄLYGOS ŽALIOJO VANDENILIO GAMYBAI



EKONOMINĖS SĄLYGOS ŽALIOJO VANDENILIO GAMYBAI

LEVELISED COST OF HYDROGEN (LCOH)

Žaliojo vandenilio ekonomiką formuoja ir jai įtaką daro įvairūs veiksniai:

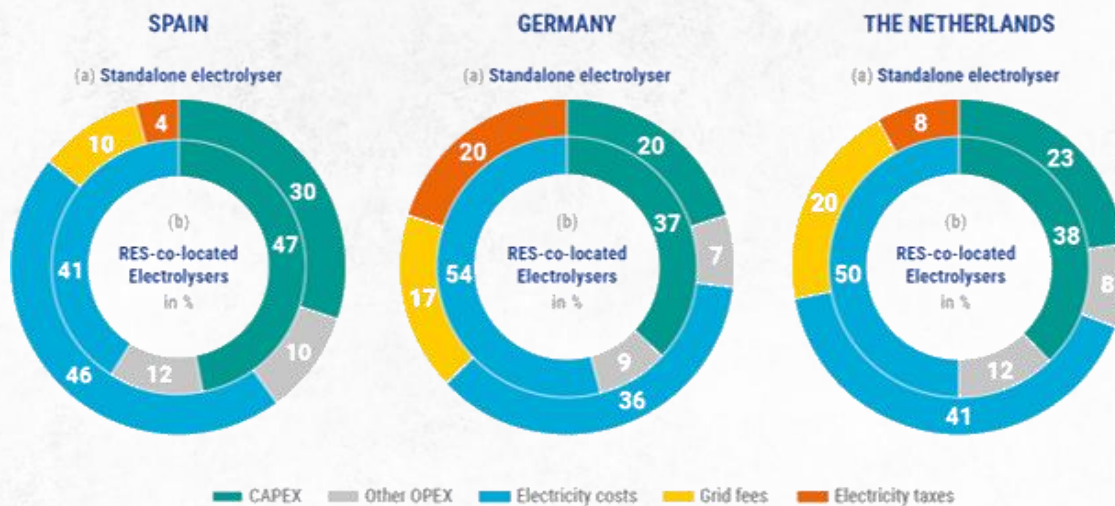
- Žaliojo vandenilio paklausa;
- Vandenilio infrastruktūra;
- **Vandenilio kaina visu įrenginio gamybos laikotarpiu (angl. *Levelised Cost of Hydrogen (LCOH)*);**
- Reguliacinė aplinka;
- Konkurencinė aplinka.

LCOH turi didžiausią įtaką elektrolizės technologijų verslo atvejui. Tai atspindi pagaminto vandenilio vieneto kainą per visą elektrolizės įrenginio eksploatavimo laiką, įskaitant **CAPEX**, **veiklos sąnaudas (OPEX)**, elektros energijos kainas ir elektrolizės įrenginio efektyvumą.

CAPEX kartu su technologijos pažanga, kuri gerina efektyvumą ir mažina kaštus, turės svarbų vaidmenį. Masto ekonomija, inovacijos, efektyvus elektrolizės įrenginių operavimo laikotarpio suprojektavimas elektrolizės įrenginių technologijoje gali padaryti vandenilio gamybą konkurencingesnę.

OPEX dalyje elektros energijos kaina (kartu su transportavimo ir kitais mokesčiais), turi didžiausią poveikį LCOH vertinime. Apie **60-77 proc.** (priklausomai nuo prijungimo prie tinklo konfigūracijos) žaliojo vandenilio kainos sudaro elektros energijos produkto kaina ir jo transportavimo kaštai bei kiti susiję mokesčiai.

14 pav. Ispanijos, Vokietijos ir Nyderlandų LCOH struktūra

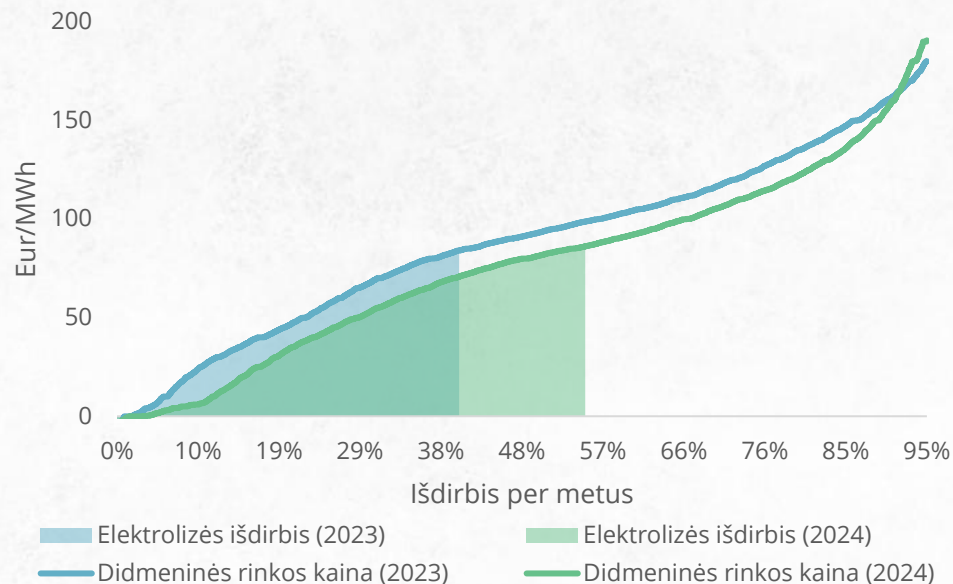


Ekonominės sąlygos žaliajo vandenilio gamybai

Elektros energija – žaliava žaliajam vandeniliui.

Atliekant Europos adekvatumo vertinimą (angl. *European Resource Adequacy Assessment - ERAA*) 2024 m., ENTSO-E elektros sistemų modeliavimuose vertino, jog konkurencinga elektros energijos kaina (**tik biržos kaina**), kuri vertinta vandeniliui gaminti, yra apie **45-71 Eur**. Vertinant vidutinę biržos kainą 45 Eur/MWh, elektrolizės įrenginiai veiktų 4813 val. 2024 m. (**55 proc.** viso laiko) ir 3517 val. 2023 m. (**40 proc.** viso laiko).

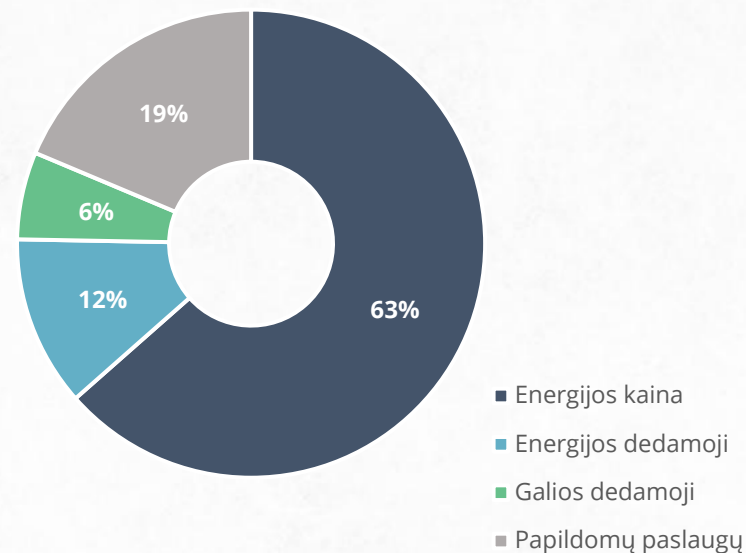
15 pav. Didmeninė elektros energijos kaina 2023-2024 m. periodu Lietuvos kainų zonoje ir išdirbis per metus esant 45 Eur/MWh kainai.



Šaltinis: AB Litgrid

Tačiau galutinė elektros energijos kaina vandenilio gamybai nėra lygi kainai biržoje. Vertinant, jog 45 Eur/MWh riba būtų konkurencinga didmeninė elektros energijos kaina vandenilio gamybai, elektros energijos perdavimo kaštai (tarifai) sudarytų **37 proc. (arba 25,9 Eur/MWh)** mokamos sumos už galutinę elektros energiją.

16 pav. Galutinės elektros energijos struktūra 2025-2026 m.

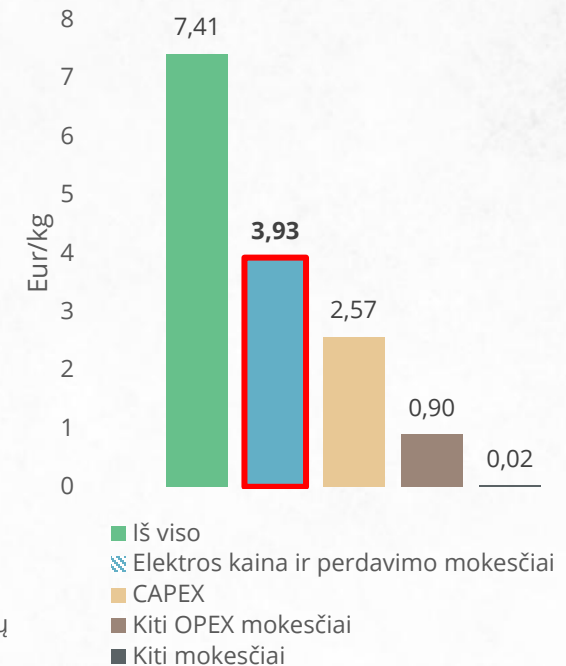


Šaltinis: VERT

Vertinant 45 Eur/MWh biržos kainą, atitinkamą išdirbį per metus ir šiuo metu galiojančią perdavimo tinklų tarifų struktūrą, vandenilio kaina svyruotų (priklausomai nuo technologijos) 7,65-8,12 EUR/kg(H₂) 2023 m. ir 6,61-7,25 EUR/kg(H₂) 2024 m. (vidutinė „pilko“ vandenilio kaina 2024 m. šiek tiek aukščiau 2 Eur/kg).

Elektros kainos ir perdavimo paslaugų dedamosios sudarytų apie **48-58 proc.** vandenilio kainos.

17 pav. Vidutinė vandenilio LCOH 2023 -2024 m. periodu



IŠVADOS

1. Elektrolizės technologijos **turi technines galimybes** teikti tiesiogines ir netiesiogines lankstumo paslaugas (su tam tikrais apribojimais).
2. P2X dalyvavimas elektros energetikos lankstumo rinkose priklausys nuo pasirinkto verslo modelio, planuojamo pagrindinio veiklos produkto apibrėžimo, produkto galutinio vartotojo poreikių.
3. Nors elektrolizės įrenginiai (*stack*) turi technines galimybes dalyvauti lankstumo paslaugų rinkose, elektrolizės įrenginių galimybė teikti lankstumo paslaugas priklauso nuo visų kitų įrenginio komponentų (*Balance of plant*) techninių galimybių teikti lankstumo paslaugas.
4. Elektrolizės įrenginiai turi technines galimybes dalyvauti STO lankstumo paslaugų rinkoje, tačiau šiuo metu rinkos potencialas yra ribotas.
5. Elektrolizės įrenginiai (tiek PEM, tiek šarminė technologija) turi technines galimybes teikti rankinio dažnio atkūrimo rezervo paslaugą (mFRR) be apribojimų, taip pat PEM technologija gali teikti automatinio dažnio atkūrimo paslaugą (aFRR) be apribojimų, FCR paslaugą gali teikti su tam tikrais apribojimais, tačiau balansavimo rinkos **ekonominis** potencialas yra ribotas.
6. Elektrolizės technologijos gali teikti netiesioginį lankstumą (reakcija į didmeninių elektros rinkų kainų signalus). Elektrolizės įrenginiai turi technines galimybes dalyvauti didmeninėje elektros rinkoje, tačiau jų dalyvavimas apribotas ekonominiais ir techniniais barjeriais.



IŠVADOS IR GALIMI TOLIMESNI ŽINGSNIAI



Nors elektrolizės įrenginių techninės ir ekonominės galimybės teikti paslaugas šiuo metu yra ribotos, šiuo metu kuriami (ar planuojami) ekonominiai bei infrastruktūros projektai tam tikrus barjerus gali sumažinti.

1. **Vandenilio transportavimo infrastruktūros** atsiradimas leistų vandenilio gamintojams spręsti vandenilio saugojimo iššūkius.
2. **Dinaminio elektros perdavimo tarifo** atsiradimas leistų vandenilio gamintojams ekonomiškai efektyviau gaminti vandenilį ir mažinti OPEX sąnaudas.
3. **Lankstumo poreikių, nacionalinių tikslų apibrėžimas** bei lankstumo paslaugų plėtra gali sudaryti sąlygas P2X įrenginiams atrasti naujus pajamų srautus.

Galimi tolimesni žingsniai:

1. Kitų energetikos sektorių sąveikos su P2X technologijomis analizė:

- Atliekinės elektrolizės proceso šilumos panaudojimas šilumos sektoriuje;
- Ilgalais energijos kaupimas, energijos konversijos į išvestines vandenilio priemones.

2. Ekonominis *business case* modeliavimas:

- Detali pasirinktų elektros rinkų analizė ir P2X naudų skaičiavimas;
- Optimalios P2X technologijos parinkimas, detalus BoP parinkimas;
- LOCH apskaičiavimas ir lankstumo paslaugų įtakos nustatymas.

AČIŪ UŽ DĖMESĮ