

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Jūrų inžinerijos katedra

Martynas Drazdauskas

**VANDENILINIO KURO TECHNOLOGIJŲ PANAUDOJIMO JŪRŲ
TRANSPORTE TYRIMAI**

Laivybos ir uostų inžinerijos (6211EX066) specialybės

Laivyno techninės eksploatacijos valdymas specializacijos magistro baigiamasis darbas

Darbo mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Sergejus Lebedevas

Klaipėda 2020

SANTRAUKA

M. Drazdauskas *Vandenilinio kuro technologijų panaudojimo jūrų transporte tyrimai*. Laivyno techninės eksploatacijos studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas Prof. habil. dr. Sergejus Lebedevas. Klaipėdos universitetas: Klaipėda: 2020. – 68 p.

Raktiniai žodžiai: vandenilio technologijos, kuro elementai, aplinkosauginiai reikalavimai, energetinis efektyvumas, eksploataciniai rodikliai.

Baigiamojo darbo tikslas yra ištirti vandenilinio kuro perspektyvias panaudojimo technologijas, atsižvelgiant į Tarptautinės jūrų organizacijos keliamus aplinkosauginius reikalavimus, energetinį efektyvumą bei eksploatacinį rentabilumą.

Išanalizuota dabartinė situacija dėl vandenilio technologijų pritaikymo jūrų transportui remiantis technologine pažanga sausumos kelių transporte ir įvertinus pasaulinę vandenilio infrastruktūrą. Nustatytas vandenilio technologijų pritaikymo jūrų transportui racionalumas, vadovaujantis MARPOL 73/78 Annex VI konvencijos aplinkosauginiais reikalavimais. Remiantis įvairiais moksliniais šaltiniais, palygintas vandenilio technologijų energetinis efektyvumas.

Atliktas tyrimas pritaikant vandenilio kuro elementų technologiją generalinių krovinių laive, pateikiant eskizinį vandenilio kuro elementų laivo jėgainės sprendimą. Ištirtas laivo eksploatacijos vandeniliu rentabilumas ir palyginti emisijų rodikliai.

SUMMARY

M. Drazdauskas *Research in use of hydrogen fuel technologies in marine transport*. Fleet technical operation management studies program thesis. Klaipėda University: Klaipėda 2020. - 68 p.

Keywords: hydrogen technologies, fuel cell, environmental regulations, energy efficiency, operational indicators.

Purpose of this thesis is to investigate perspective hydrogen technologies adaptation for marine transport in regards of International Maritime Organization environmental protection standards, energy efficiency and operational economy.

The current situation regarding the application of hydrogen technologies for marine transport is analyzed on the basis of technological advance in land transport and the assessment of global hydrogen infrastructure. The rationality of the application of hydrogen technologies for marine transport has been evaluated in accordance with environmental requirements of MARPOL 73/78 Annex VI convention. Based on various scientific sources, the energy efficiency of hydrogen technologies has been compared.

A study was carried out by applying hydrogen fuel cell technology to a general cargo ship by presenting concept fuel cell technology integration solution to a ship's power plant. The cost-effectiveness of the vessel's operation on hydrogen fuel using fuel cell technology was investigated and as a result emissions were compared with traditional ship's power plant.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. MARPOL 73/78 Annex VI Regulation 13-14	14
2 lentelė. Skirtingų kuro rūšių pagrindinės charakteristikos	17
3 lentelė. Kuro elementų technologijos palyginimas	31
4 lentelė. Kuro elementų technologijos pritaikymo jūrų transporte SSGG analizė.	32
5 lentelė. Vandenilio gamybos metodų apžvalga.	36
6 lentelė. Laivo pagrindiniai duomenys.	44
7 lentelė. Laivo jėgainės agregatų tūrio ir masės duomenys.	51
8 lentelė. Maršruto pagrindiniai duomenys.	52
9 lentelė. Dyzelino kuro suvartojimo rezultatai.....	53
10 lentelė. Kuro suvartojimo ir eksploatacinių kaštų rezultatai.	55
11 lentelė. Emisijų išsiskyrusių reiso metu rezultatai.....	56

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. Pasaulinės CO ₂ emisijos pagal sektorių	10
2 pav. Elektrinių ir vandenilio kuro elementų sausumos transporto perspektyvų palyginimas	12
3 pav. TJO CO ₂ mažinimo strategija	16
4 pav. Laivo „Alsterwasser“ išplanavimas	18
5 pav. Jūrų transporto sektoriaus kuro suvartojimo prognozė pagal kuro rūšį iki 2030 metų	20
6 pav. Jūrų transporto sektoriaus kuro suvartojimo prognozė pagal kuro rūšį iki 2050 metų	21
7 pav. Pasaulinio laivyno energijos suvartojimas pagal kuro rūšį 2050 metais	22
8 pav. Laivų virš 500 t. dedveito kuro suvartojimas per dieną pasauliniu mastu	22
9 pav. Konstrukcinių pakitimų schema.	25
10 pav. Anglies monoksido CO emisijos	26
11 pav. Anglies dioksido CO ₂ emisijos.....	26
12 pav. Kietųjų dalelių emisijos.....	27
13 pav. Azoto oksidų (NO _x) emisijos	27
14 pav. Protonų mainų membranos kuro elementai (PEM-FC) schema.....	29
15 pav. Naudingo veikimo koeficientas	30
16 pav. Naudojami išteklių vandenilio gamybai, pagal 2018 metų duomenis.....	34
17 pav. Vandenilio gamybos kainų palyginimas naudojant skirtingus išteklius.....	38
18 pav. Skirtingo kuro CO ₂ emisijų vertinimas pagal gyvavimo ciklą laivyboje.....	39
19 pav. Vandenilio transportavimo metodai.....	41
20 pav. Vandenilio transporteris „Suiso Frontier“.....	42
21 pav. Laivas „LIEKE“.....	44
22 pav. Dizelinė laivo jėgainės schema.....	45
23 pav. Kuro elementų laivo jėgainės schema.....	46
24 pav. Suskystinto vandenilio „IMO Type C“ tanko schema.....	47
25 pav. „ISO Type C“ vandenilio tankas.....	49
26 pav. Kuro tanko vietos laive eskizas.....	50
27 pav. Maršrutas iš Antverpeno į Bergeno uostą.....	52
28 pav. Specifinio kuro suvartojimo nustatymas prie 18,5% variklio apkrovos.....	53
29 pav. Laivo eksploatacinių rodiklių rezultatų grafinis vaizdavimas.....	57

TURINYS

IVADAS	7
I. SITUACIJOS ANALIZĖ	9
1.1. Vandenilio technologijų pritaikymo jūrų transporte galimybių analizė	9
1.2. Jūrų transporto sektoriaus vandenilinio kuro poreikio vertinimas.....	19
II. VANDENILIO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ	24
2.1. Vandenilio technologijų analizė pagal TJO aplinkosauginius reikalavimus.	24
2.2. Vandenilio technologijų analizė pagal energetinį efektyvumą.....	29
III. VANDENILIO GAMYBOS IR TRANSPORTAVIMO TECHNOLOGIJOS	33
3.1. Vandenilio gamybos technologijų analizė	33
3.2. Vandenilio transportavimo technologijų analizė	40
IV. VANDENILIO TECHNOLOGIJOS PRITAIKYMO LAIVE ESKIZINIS SPRENDIMAS	43
4.1. Vandenilio kuro elementų laivo jėgainės analizė	43
4.2. Laivo eksploatacinių rodiklių tyrimas.....	52
IŠVADOS	59
REKOMENDACIJOS	61
LITERATŪRA	62

IVADAS

Klimato kaitos problema šiomis dienomis yra vis aktualesnė ir priverčianti susimastyti kokia bus pasaulio ateitis jeigu neieškosime priemonių šiai problemai spręsti. Kasmet pasaulinis komercinis laivynas vidutinaisškai suvartoja apie 300 mil. t. iškastinio kuro ir tai sudaro apie 2,6% viso pasaulio anglies dvideginio CO₂ emisijų [49]. Nepaisant griežtėjančių reikalavimų ir apribojimų tokių kaip MARPOL Annex VI (nuo 2020 sausio 1 d. pasaulinis sieros kiekis kure sumažintas iki 0,5%, nuo 2015 sausio 1 d. ECA zonose 0,1%), MEPC 72/17/Add 1 Annex 11 (sumažinti komercinio laivyno šiltnamio dujų emisijas 50% iki 2050 metų) ir Paryžiaus susitarimo (užtikrinti, kad vidutinės pasaulio temperatūros didėjimas būtų gerokai mažesnis nei 2 °C, palyginti su iki-pramoninio laikotarpio lygiu) šiltnamio dujų emisijos didėja, o tai lemia auganti vartojimo paklausa laivybos sektoriuje [77; 78]. Prognozuojama, kad iki 2030 metų apie 60% pasaulinio laivyno pagrindinis energijos šaltinis vis dar išliks sunkusis kuras [61].

Siekiant sumažinti šiltnamio efektą privalome imtis drastiškų priemonių ir pertvarkyti pasaulinio laivyno jėgaines, įdiegiant inovacijas ir pereinant prie švarios kilmės kuro. Nors šiuo metu sparčiai populiarėja suskystintų gamtinių dujų naudojimas jūrų transporte, remiantis gamtinių dujų išmetamųjų dujų rodikliais, tai gali ir neišspręsti oro užterštumo problemos, nes geriausiu atveju išmetamųjų dujų CO₂ koncentracija sumažėtų 30% lyginant su dyzelinu [79]. Šiame kontekste vandenilis yra vertinamas kaip tinkamiausias pasirinkimas vystant švarią ir draugišką aplinkai laivybą.

Vandenilinis kuras yra bekvapis, netoksiškas ir pasižymi aukšta energetine verte. Vandenilinis kuras yra energijos nešėjas, kuris pagrinde gali būti panaudojamas vidaus degimo varikliuose arba kuro elementų (*angl. fuel cell*) įrenginiuose, aprūpinant energija įvairias transporto rūšis ar elektrinius prietaisus. Daugelyje atveju vandenilio panaudojimas paverčiant į mechaninę ar elektros energiją nesukelia aplinkos taršos padarinių. Tačiau išimtis yra taikoma vandenilio panaudojimui vidaus degimo varikliuose, drastiškai padidėja toksiškų azoto oksidų NO_x emisijų lygis. Gamtoje vandenilis kaip atskiras elementas randamas retai ir mažais kiekiais, todėl paprastai vandenilinis kuras išgaunamas iš vandens, tačiau tam reikia labai daug energijos. Šiuo metu vandenilis kaip kuras yra vystomas kelių transporte, tačiau jūrų transporte tai visiškai nauja. Laivyboje vandeniliu varomi propulsiniai kompleksai kol kas yra ankstyvoje projektavimo ar testavimo stadijose ir tik keli pasaulyje maži keleiviniai vidaus vandenų laivai yra eksploatuojami [20]. Bandant pritaikyti vandenilio technologijas jūrų transportui yra susiduriama ne tik su technologiniais iššūkiais, tačiau ir su silpna vandenilio infrastruktūra, reglamentų trūkumu susijusiu su vandenilio naudojimu laive.

Šiame amžiuje viena iš svarbiausių pasaulio vertybių yra žmogaus sveikata. Tačiau užtikrinti sveiką aplinką žmonių gyvenime yra neįmanoma, kol pasaulis kamuoja oro taršos ir globalinio

atšilimo sukeltais padariniais. Sausros, audros, potvyniai tai globalinio atšilimo pavojai, o širdies, kvėpavimo takų ligos – oro taršos pasekmės. Visa tai sukelia didėjanti CO₂, SO_x, NO_x ir kietųjų dalelių koncentracija ore. Prognozuojama, kad 2030 – 2050 metų laikotarpiu, kiekvienais metais klimato kaita pareikalaus papildomų 250 000 gyvybių ir nuo 2 iki 4 milijardų JAV dolerių papildomų išlaidų sveikatos, žemės ūkio sektoriuose [83].

Siekiant sumažinti globalinio atšilimo pasekmes ir užtikrinti švarią aplinką, būtina ieškoti taršą mažinančių sprendimų transporto sektoriuje. Remiantis moksliniais tyrimais, vandenilio pritaikymas laivyboje galėtų sumažinti ore didėjančios CO₂, SO_x, NO_x ir kietųjų dalelių koncentracijos dalį, atsakingą už jūrų transporto sektorių.

Darbo tikslas

Ištirti vandenilinio kuro perspektyvias panaudojimo technologijas jūrų transporte pagal energetinį, aplinkosauginį, eksploatacinio rentabilumo aspektą.

Uždaviniai

1. Išanalizuoti vandenilinio kuro panaudojimo technologijas jūrų transporte, vertinant Tarptautinės jūrų organizacijos (TJO) aplinkosauginius reikalavimus.
2. Ištirti vandenilinio kuro racionalias panaudojimo technologijas jūrų transporte energijos efektyvumo rodiklių aspektu.
3. Išanalizuoti efektyviausias vandenilinio kuro gamybos bei transportavimo technologijas, siekiant pritaikyti linijinėje jūrų transporto laivyboje.
4. Eskiziniame lygmenyje pateikti sprendimą vandenilinio kuro technologijos pritaikymui laive ir įvertinti jos panaudojimo eksploatacinius rodiklius.

Mokslinis naujumas

Remiantis atliktais analitiniais tyrimais, suformuluoti ir pagrįsti racionalūs vandenilio panaudojimo jūriniame sektoriuje technologiniai sprendimai. Įvertintas vandenilio technologijų aplinkosauginis ir energetinis efektyvumas, rentabilumas.

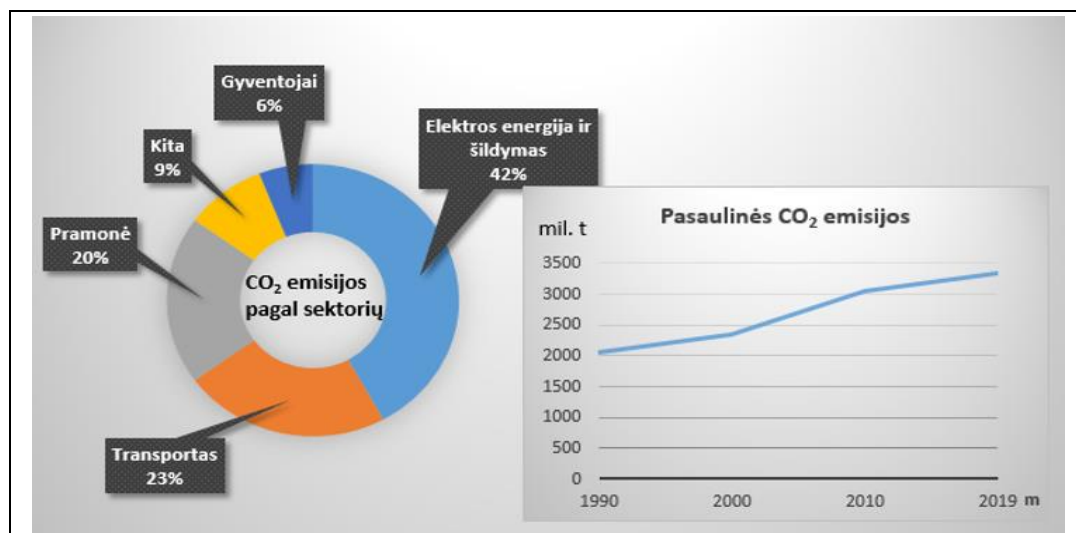
1. SITUACIJOS ANALIZĖ

1.1. VANDENILIO TECHNOLOGIJŲ PRITAIKYMO JŪRŲ TRANSPORTE GALIMYBIŲ ANALIZĖ

Klimato kaita yra viena iš svarbiausių šio amžiaus problemų reikalaujanti sprendimo, užkertant kelią globalinėms katastrofoms. Mokslininkų teigimu, šiltnamio dujų emisijos (anglies dioksidas CO₂, metanas CH₄, azoto oksidas N₂O) yra pagrindinė klimato kaitos priežastis, todėl šių emisijų mažinimas turi didelę reikšmę siekiant išlaikyti vidutinę žemės paviršiaus temperatūrą nepakitusia. Didžiausią poveikį klimato kaitai turi anglies dioksido koncentracijos padidėjimas atmosferoje. Kovoiant su klimato kaitos problema, 2016 metais buvo priimtas ir įsigaliojo Paryžiaus susitarimas, kurio pagrindinis tikslas yra išlaikyti vidutinės globalinės temperatūros kilimą žemiau 2°C šiame amžiuje ir tęsti pastangas sumažinant iki 1,5°C lyginant su iki pramoninio laikotarpio lygiu [77]. Į šį susitarimą patenka ir sausumos kelių transporto sektorius. Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) statistikos duomenimis, transporto sektorius sudaro 24% viso pasaulio CO₂ emisijų ir iš jų trys ketvirtadaliai tenka kelių transportui [52]. Visgi, suvaldyti klimato kaitą gali būti sudėtinga jei nebus imtasi drastiškų priemonių. Tikėtina, kad žmonių populiacija išaugs dar bent dviem milijardais iki 2050 metų, vadinasi bendras vartojimas padidės, kartu padidės ir kuro suvartojimas – CO₂ emisijos [77]. Nors daugelis pasaulio šalių ėmėsi prevencinių priemonių, siekiant sumažinti šiltnamio dujų emisijas transporto sektoriuje, pavyzdžiui įvedant automobilių taršos mokestį, emisijos vis tiek augo. 2018 metais pasaulio kelių transportas į aplinką išmetė $6 \cdot 10^9$ tonų anglies dioksido emisijų, kai 2000 metais šis skaičius siekė $4,2 \cdot 10^9$ tonų [52]. Siekiant laikytis klimato kaitos įsipareigojimų, atsižvelgiant į šiuos skaičius yra pastebimas didelis potencialas mažinti kelių transporto skleidžiamą taršą. Nors vidaus degimo varikliai tobulėja, o jų energetinis efektyvumas didėja, šių priemonių nepakaks drastiškai sumažinti kelių transporto emisijas tol, kol iškastinis kuras bus vartojamas plačiu mastu, todėl reikėtų ieškoti alternatyvių sprendimų, vienas iš jų galėtų būti vandenilinis kuras. Vandenilio dujos yra bekvapės, bespalvės ir laikomos nekenksmingomis žmogaus sveikatai ir ekosistemai. Tačiau vandenilis gali turėti neįdomių, neigiamų pasėkmių aplinkai, jei dideli kiekiai vandenilio dujų būtų išleidžiami į atmosferą. Kol kas tikslus poveikis aplinkai nėra nustatytas, tačiau manoma, kad dėl didelio kiekio vandenilio dujų nuotekio gamybos, transportavimo, sandėliavimo metu gali sulėtėti ozono sluoksnio regeneravimas, dėl vandenilio sukkelto drėkinimo ir vėsinimo efekto stratosferoje. Taip pat tikėtina, kad vandenilio dujos pagreitintų metano ir ozono dujų susijungimo reakciją, o jos savo ruožtu prisideda prie šiltnamio efekto [69].

Vandenilis buvo atrastas dar XVI a. šveicarų gydytojo ir filosofo Paracelso, kuris pastebėjo vandenilio išsiskyrimą vykstant metalų tirpimo reakcijai sieros rūgštyje. XIX a. pradžioje buvo išrasta kuro elementų (*angl. fuel cell*) technologija, o po kelių metų buvo sukurtas ir pirmasis vidaus degimo

variklis varomas vandenilio ir deguonies mišiniu. Nepaisant to, vandenilio technologijos kelių transporte pradėjo vystytis tik XXI a. pradžioje, o tai paskatino pasaulio šalių alternatyvių sprendimų paieška kovoje su iškastinio kuro suvartojimo ir išmetamųjų dujų augimo tendencija transporto sektoriuje. Savo ruožtu Europa, lyderiaujanti pasaulio vandenilio technologijose, skatina vandenilio technologijų ir infrastruktūros vystymąsi. Ambicingoje, 100 milijardų eurų finansuojamoje, Europos sąjungos bendrojoje mokslinių tyrimų ir inovacijų programoje „Horizontas 2020“, yra numatyta iniciatyva sukurti stiprų, inovatyvų ir konkurencingą Europos vandenilio energetikos sektorių [47]. Konservatyviais vertinimais prognozuojama, kad 2050 metais Europos vandenilio energetikos sektorius pajėgs pagaminti 2250 TWh vandenilinio kuro, o tai atstotų ketvirtadalį Europos sąjungos metinio energijos poreikio arba kitaip tariant aprūpintų 42 milijonus automobilių, 1,7 milijonų sunkvežimių, 500 tūkstančių autobusų [24].



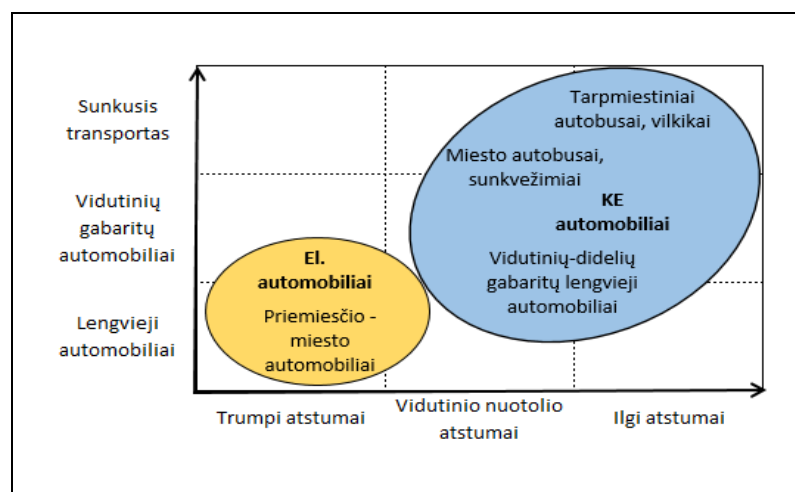
1 pav. Pasaulinės CO₂ emisijos pagal sektorių [52].

Sausumos kelių transporto sektoriaus dekarbonizacijos link, sparčiai populiarėja tokios alternatyvos kaip elektromobiliai, vandeniliu varomi automobiliai, kurie neišmeta į aplinką šiltnamio dujų ir kitų teršalų. Didžiausią paklausą turi elektromobiliai, kurių pardavimai per 2018 metus išaugo 63% ir bendrai sudarė 5 milijonus lengvųjų elektromobilių pasauliniu mastu [51]. Tuo tarpu vandenilio kuro elementų (*angl. hydrogen fuel cell vehicle*) automobilių parką sudaro vos 11 tūkstančių, iš kurių 2 tūkst. sudaro autobusai ir 1,5 tūkst. lengvieji sunkvežimiai [56]. Pagrindinis elektromobilių pranašumas prieš vandenilio kuro elementų automobilius yra tai, kad jiems nebūtina infrastruktūra, vairuotojai gali pasikrauti automobilius namuose, o tai gali trukti nuo 30 minučių iki 12 valandų priklausomai nuo automobilio baterijos talpos ir įkrovimo stotelės galingumo. Taip pat atsižvelgiant į elektros energijos kainą, elektromobilių eksploatacijos kaštai yra ženkliai mažesni, nes energijos efektyvumas viso gyvavimo ciklo metu yra itin aukštas ir siekia 70-90%, kai lyginant su vandenilio lengvaisiais automobiliais energijos efektyvumas siekia tik 25-35%, didžioji dalis energijos prarandama vandenilio gamybos, suspaudimo ar suskystinimo, transportavimo ir

automobilių užpildymo grandinėje [12]. Žinoma elektromobiliai taip pat turi ir trūkumų, vienas iš pagrindinių būtų mažas, vidutiniškai iki 350 km, kelionės atstumas su vienu įkrovimu, todėl elektromobiliai yra tinkamesni miesto, trumpų atstumų kelionėms. Įveikti ilgesnes distancijas yra nepatogu ir nepraktiška laiko atžvilgiu, kadangi įkrovimo laikas gali kelis kartus prailginti kelionę, todėl ilgiems atstumams įveikti pranašesni yra vandenilio kuro elementų automobiliai, kurie vidutiniškai gali nuvažiuoti 500-700 km atstumą su vienu užsipilimu, o užpylimas trunka iki 5 minučių [11]. Žinoma tokių automobilių kaina ir eksploatacija yra brangesnė, tačiau nuvažiavimo nuotolis yra patrauklus aspektas. Visgi, vandenilio kuro elementų automobiliams reikalinga infrastruktūra, kurią sudaro vandenilio gamybos, saugojimo ir pervežimo operacijos bei vandenilio degalinių įrengimas, o visa tai galiausiai atsigręžia į vartotoją. Nepaisant šių ekonominių barjerų, pastaraisiais 2019 metais bendras pasaulio vandenilio degalinių skaičius augo ir iš viso sudarė 432 degalines, 17% daugiau nei 2018 metais. Pirmaujančios šalys pagal lengvųjų automobilių vandenilio degalinių skaičių yra Japonija, kuri turi daugiau nei 100 degalinių, Vokietija – 83 degalines, JAV – 65 degalines [34, 39]. Žvelgiant į ateitį, degalinių skaičius didės. Dar 2018 metais pasaulio užsibrėžtas tikslas buvo iki 2030 įdiegti daugiau nei 3500 degalinių visame pasaulyje. Tačiau naujausiais duomenimis, vandenilio energetikos ministrų susirinkime Japonijoje, buvo priimtas sprendimas skatinti vandenilio energetikos vystymąsi transporto sektoriuje pasauliniu mastu. Japonija kaip pirmaujanti šalis vandenilio energetikoje, gavusi palaikymą iš 30 valstybių, įsipareigojo įkurti 10000 lengvųjų automobilių vandenilio degalinių per sekantį 10 metų laikotarpį. Visgi, sunku įvertinti ar toks plataus masto vandenilio technologijų diegimas bent jau lengvųjų automobilių sektoriuje yra perspektyvus, žinant, kad elektromobilių energijos efektyvumas viso gyvavimo ciklo metu (nuo elektros gamybos iki suvartojimo elektromobilyje) yra bent du kartus aukštesnis.

Vandenilio technologijų panaudojimas kelių transporte yra perspektyvus sprendimas, kai kalbama apie sunkiąsias transporto priemones. Pasaulio vandenilio tarybos atliktoje vandenilio konkurencingumo analizės ataskaitoje yra teigiama, kad vandenilio kuro elementų technologijos panaudojimas kroviniuose automobiliuose (3,5 – 44 t) yra rentabiliausias būdas dekarbonizuoti šį transporto sektorių. Svarbiausi technologijos privalumai kaip ir lengvųjų automobilių transporte išlieka patrauklus nuvažiavimo atstumas, kuris gali siekti daugiau nei 800 km, trumpas kuro bako užpylimo laikas ~ 15 minučių, eksploatacijos efektyvumo neįtakoja ekstremalios oro sąlygos, bendras visos jėgainės svoris nesiskiria nuo dyzelinės krovinių automobilių jėgainės, o tai reiškia, kad leidžiamoji gabenti krovinio masė išlieka nepakitusi lyginant su įprastais VDV krovininiais automobiliais. Šiuo atveju, elektriniai krovininiai automobiliai savo technologinėmis galimybėmis žymiai nusileidžia prieš kuro elementų technologiją, nes norint pasiekti panašų nuvažiavimo atstumą, elektriniams kroviniams automobiliams reikia sukaupti didelį kiekį elektros energijos, o tai galima padaryti tik didinant baterijų talpą ir kiekį, o to pasekoje bendra visos elektrinės jėgainės masė

padidėja kelis kartus lyginant su kuro elementų sistemos mase. Tokiu būdu krovininis automobilis praranda, priklausomai nuo sunkvežimio tipo, 20-40% keliamosios galios, t.y. leidžiamo pakrauti krovinio masės [12]. Taip pat reikia įvertinti, kad didinant baterijų talpą, ženkliai išauga tokios sistemos kaina, todėl šiuo atveju elektriniai krovininiai automobiliai, kol kas nėra konkurencingas sprendimas siekiant dekarbonizuoti sunkvežimių transportą. Logistikos sektoriuje, įkrovimo laikas yra labai svarbus aspektas, nes kiekviena minutė, kuomet krovininis automobilis yra išvedamas iš eksploatacijos verslo įmonėms kainuoja, pavyzdžiui įkraunant elektrinio krovininio automobilio baterijas su greituoju įkrovikliu, kurio galia siekia 500 kWh, vidutiniškai trunka 2 valandas, o tai yra nepriimtina, todėl vandenilio kuro elementų krovininiai automobiliai yra perspektyvesni. Vandenilio kuro elementų krovininiai automobiliai buvo sėkmingai įgyvendinti ir pristatyti demonstraciniuose projektuose. Pavyzdžiui, pirmasis pasaulyje savo klasėje, 35 tonų, kompanijos „ESORO“ autotraukinys buvo sėkmingai išbandytas, įveikiant 3500 km atstumą 2017 metais. Autotraukinys skirtas gabenti gendančius produktus, turi šaldytuvus kėbule ir priekaboje, bendras jėgainės galingumas siekia 250 kW, o nuvažiavimo atstumas – 400 km su vienu užpildymu [21]. Šiuo metu kompanijos „Toyota“ ir „Hino“ kartu vysto 25 tonų sunkvežimio projektą, kurio nuvažiavimo atstumas turėtų siekti 600 km, o kompanija „Nikola“ 2021 metais pradės mažos apimties 36 tonų vandenilio vilkikų gamybą, kurio jėgainės galingumas sieks 750 kW ir tikėtinas nuvažiavimo atstumas sieks 750-1200 km.



2 pav. Elektrinių ir vandenilio kuro elementų sausumos transporto priemonių perspektyvų palyginimo žemėlapis.

Kelių transporto sektoriuje, viešojo transporto autobusai yra viena iš kruopščiausiai išanalizuotų ir išbandytų vandenilio kuro elementų taikymo sričių, net nuo 1990 metų buvo pradėta taikyti šią technologiją. Nors vandenilis vis dar yra naudojamas autobusų vidaus degimo varikliuose, gamintojai, išvelgdami vandenilio panaudojimo pranašumą kuro elementuose, koncentruojasi į autobusų su elektros – kuro elementų sistema masinę gamybą. Jau dabar vos ne kiekvienas didysis

vakarų Europos miestas turi nuo kelių iki keliolikos sėkmingai eksploatuojamų vandenilio kuro elementų autobusų. Daugelis šių modernių autobusų turi 200 kW jėgainę ir gali įveikti 300 – 450 km atstumą su vienu užsipykimu. Taip pat svarbu paminėti, kad tokie autobusai suvartoja apie 8 – 9 kg vandenilio šimtui kilometrų, rezultate eksploatacija yra apie 40% energetiškai efektyvesnė negu lyginant su tradiciniais dyzeliniais autobusais [29]. Siekiant sumažinti šiltnamio dujų emisijas viešojo transporto sektoriuje, taip pat palankiai vertinami yra ir elektriniai autobusai. Nors šioje srityje vandenilio kuro elementų technologija turi panašius privalumus kaip ir prieš tai minėtame krovinių automobilių transporte, tačiau elektriniai autobusai taip pat yra laikomi perspektyviais, švarinant viešojo transporto sektorių, ypač maršrutams miesto viduje, kadangi nėra iškelto aukšto standarto, kalbant apie nuvažiavimo nuotolį su vienu įkrovimu.

Kovojant su šiltnamio dujų emisijomis sausumos kelių transporto sektoriuje yra naudojamos pažangios technologijos, baterijų, kuro elementų sistemos, kurių eksploatacinė tarša yra nulinė. Kiekvienai transporto rūšiai pateikti technologijų pritaikymo sprendimai, kurie jau yra plačiai panaudojami, leidžia išvelgti perspektyvą pritaikyti laivams, kadangi jūrų transporto sektoriuje šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų statistika nėra džiuginanti. Kasmet pasaulinis komercinis laivynas vidutinais suvartoja apie 300 mil. tonų iškastinio kuro ir tai sudaro apie 2,6% viso pasaulio anglies dvideginio CO₂ emisijų [49]. Todėl siekiant sumažinti iškastinio kuro suvartojimą ir su tuo tiesiogiai susijusią taršą yra griežtinami reikalavimai. Skirtingai nei pramonės ar sausumos kelių transporto sektoriuose, tarša iš laivų nėra reglamentuojama Paryžiaus susitarimu, šią taršą reglamentuoja Tarptautinė jūrų organizacija (TJO). Oro tarša iš laivų yra reguliuojama Tarptautinės konvencijos dėl teršimo iš laivų prevencijos šeštu priedu (MARPOL 73/78 Annex VI), kuri buvo priimta 1997 metais. Šios konvencijos tikslas apriboti oro teršalus esančius laivų išmetamosiose dujose, tokius kaip sieros oksidus SO_x, azoto oksidus NO_x, kietąsias daleles, iš laivų eksploatuojamų pasaulio vandenyne ir emisijų kontrolės zonose (ECA). Šie apribojimai yra taikomi komercine veikla užsiimantiems laivams plaukiojantiems po šios konvencijos šalies vėliava. Jūrų aplinkos apsaugos komitetas (MEPC) periodiškai peržvelgia MARPOL 73/78 konvenciją ir esant butinybei išleidžia pataisas – sugriežtina reikalavimus. Sieros oksidų ir kietųjų dalelių emisijų kontrolė yra taikoma kurui, pagrindiniams ir pagalbiniais varikliams, boileriams ir dujų generatoriams. Ši kontrolė yra skirstoma į dvi grupes ir apima dvi kontroliuojamas zonas, tai būtų emisijų kontrolės zonos, kurias sudaro Baltijos jūra, Šiaurės jūra, Karibų jūra, didžioji dalis Šiaurės Amerikos pakrančių, ir likusi teritorija už ECA zonų. Teritorijose už emisijų kontrolės zonos ribų iki 2012 metų buvo taikomas 4,5% sieros kiekio kure ribojimas, o nuo 2012 metų šis ribojimas buvo sugriežtintas iki 3,5% ir pagal naujausius pakeitimus, kurie įsigalios nuo Sausio 1 d. 2020 metų, taikomas sieros kiekio mažinimas pasauliniame kure iki 0,5%. ECA zonose reikalavimai yra dar griežtesni ir iki 2010 metų galiojo 1,5% sieros kiekio kure ribojimas, o nuo 2010 metų buvo sugriežtintas iki 1,0%. Šiuo metu ECA zonose

yra taikomas 0,1% sieros kiekio ribojimas, kuris įsigaliojo 2015 metais [67]. Jūriniams dyzeliniams varikliams įdiegtiems laive, kurių galingumas viršija 130 kW yra taikomas laipsniškas azoto oksidų emisijų ribojimas, kurį apibrėžia tryliktasis šešto priedo reglamentas (MARPOL 73/78 Annex VI Regulation 13). Azoto oksidų reguliavimas yra suskirstytas į tris pakopas pagal laivų pastatymo datą ir į tris grupes pagal variklio sūkių skaičių. Laivams pastatytiems po 2000 metų Sausio 1 d. yra taikomas pirmos pakopos NO_x reguliavimas, o laivams pastatytiems po 2011 metų Sausio 1 d. – antros pakopos reguliavimas. Išskirtinis trečios pakopos azoto oksidų reguliavimas yra taikomas laivams pastatytiems po 2016 metų Sausio 1 d. ir eksploatuojamiems Šiaurės Amerikos ir Karibų jūros ECA zonose. Nuo 2021 metų Sausio 1 d. įsigalios šio reglamento pataisa ir laivams pastatytiems po šios datos ir eksploatuojamiems Baltijos ir Šiaurės jūrų ECA zonose bus taikomas trečios pakopos azoto oksidų reguliavimas [67].

1 lentelė. MARPOL 73/78 Annex VI Regulation 13-14 [67].

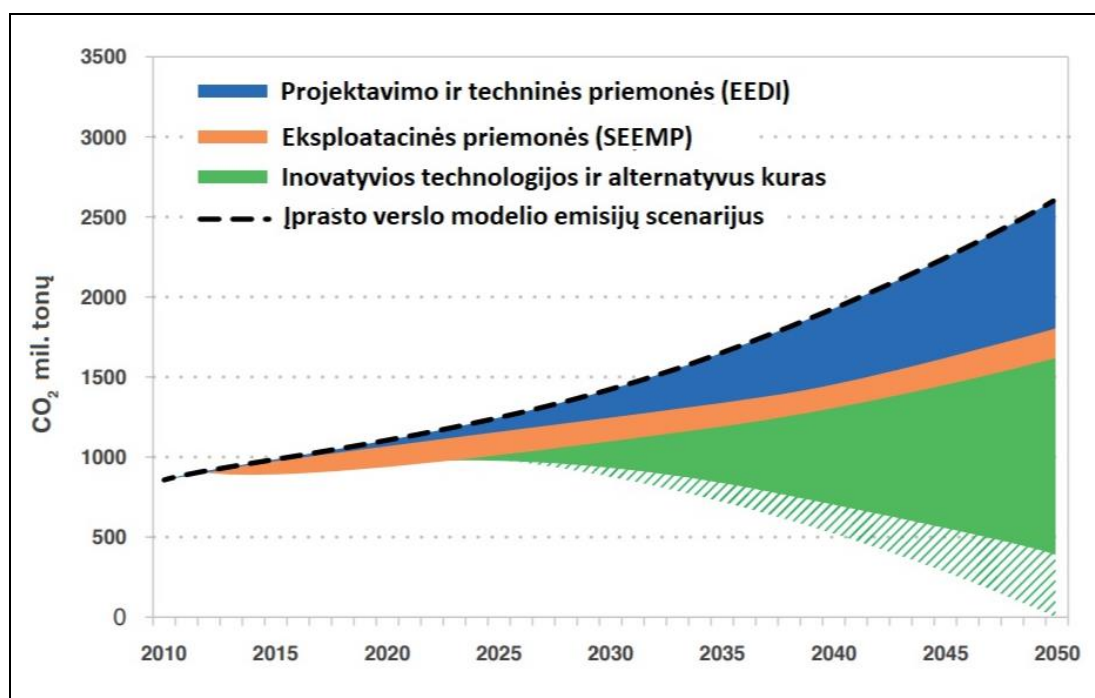
SO _x limitas (%) už ECA zonos ribų	SO _x limitas (%) ECA zonose	Laivo pastatymo data	NO _x limitai (g/kWh) pagal variklio sūkių skaičių (n = aps/min ⁻¹)		
			n < 130	n = 130-1999	n ≤ 2000
Iki 2012 m. 4,5%	Iki 2010 m. 1,5%	I pakopa, po 2000 m.	17,0	45n ^(-0,2) Pvz. 720 aps/min ⁻¹ – 12,1	9,8
Po 2012 m. 3,5%	Po 2010 m. 1,0%	II pakopa, po 2011 m.	14,4	44n ^(-0,23) Pvz. 720 aps/min ⁻¹ – 9,7	7,7
Po 2020 m. 0,5%	Po 2015 m. 0,1%	III pakopa, po 2016 m.	3,4	9n ^(-0,2) Pvz. 720 aps/min ⁻¹ – 2,4	2,0

Neskaitant tiesioginių SO_x, NO_x ir kietųjų dalelių taršos mažinimo priemonių, jūrų transportui yra taikomos ir kitos, techninės bei eksploatacinės taršos mažinimo priemonės. Pagal Jūrų aplinkos apsaugos komiteto nutarimą MEPC 203(62), MARPOL 73/78 Annex VI konvencija buvo papildyta nauju reglamentu įvedant energijos efektyvumo indeksą (EEDI) ir laivo energijos efektyvumo valdymo planą (SEEMP), kurie buvo priimti 2011 m., o įsigaliojo nuo 2015 m. Sausio 1 d [53]. Pagrindinis šių taršos mažinimo priemonių tikslas yra sumažinti taršą per kuro suvartojimo mažinimą. Energijos efektyvumo indeksas yra taikomas visiems pagrindiniams komercinio laivyno laivų tipams, pastatytiems nuo 2015 metų. Energijos efektyvumo indeksas apibrėžia laivo įrangos efektyvumą, kurio tikslas skatinti naudoti efektyvesnią, mažiau teršenčią įrangą ir variklius. Energijos efektyvumo

indeksas yra pateikiamas kiekvienam laivui atskirai remiantis laivo projektu ir yra išreikštas anglies dioksido CO₂ gramais vienai laivo talpos jūrmyliai. Pirmajame etape, pradedant nuo 2015 metų, CO₂ mažinimo lygis yra nustatytas 10%, remiantis pagal laivų pastatytų nuo 2000 iki 2010 metų energetinio efektyvumo vidurkį kaip atskaitos tašką. Palaipsniui, kas 5 metus šis rodiklis yra didinamas iki 30% iki 2030 metų. Kita taršos mažinimo priemonė apima laivo energijos efektyvumo didinimą, naudojant eksploatacines priemones. Laivo energijos efektyvumo valdymo planas (SEEMP) yra privalomas laivams virš 400 bendrojo tonažo. Šis planas padeda laivo savininkui stebėti ir sekėti laivo energetinio efektyvumo charakteristiką laikui bėgant ir leidžia ją pagerinti, panaudojant tokias priemones kaip laivo greičio mažinimas, tikslingas kelionės maršruto parinkimas atsižvelgiant į oro sąlygas, laivo korpuso ir sraigto dažnesnis valymas nuo apaugimo ir kavitacijos, naujos efektyvesnės įrangos įdiegimas, šilumos rekuperacinių sistemų įdiegimas, alternatyvaus kuro naudojimas. SEEMP ragina laivo savininką ir operatorių kiekviename plano etape apsvarstyti naujas technologijas ir jų valdymą, siekiant optimizuoti laivo eksploatacines savybes [53].

Nors į Paryžiaus susitarimą dėl klimato kaitos nėra įtrauktas tarptautinis jūrų transporto sektorius, tačiau savo ruožtu Tarptautinė jūrų organizacija įsipareigojo mažinti šiltnamio dujų emisijas iš laivų. Pateiktoje TJO šiltnamio dujų emisijų mažinimo strategijoje yra siekiama sumažinti komercinio laivyno CO₂ emisijas iki 40% iki 2030 m. ir toliau mažinti iki 70% iki 2050 m. lyginant su 2008 metų rodikliais, o bendrai skaičiuojant šiltnamio dujų emisijos neturėtų viršyti 50% iki 2050 metų [55]. Šiems tikslams įgyvendinti bus naudojamos taršos mažinimo priemonės, tokios kaip projektavimo ir techninės, eksploatacinės, inovatyvių technologijų ir alternatyvaus kuro panaudojimas. Remiantis TJO prognozėmis, jei nebus imtasi priemonių sumažinti taršai iš laivų, dėl augančios žmonių populiacijos ir didėjančių krovinių srautų, įprasto verslo scenariju šiltnamio dujų emisijos galėtų išaugti nuo 50% iki 250% iki 2050 metų, todėl jau dabar galime susidaryti nuomonę, kad priemonės ir reikalavimai sumažinti taršą bus palaipsniui griežtinami. Šiuo metu didžiausias dėmesys yra skiriamas energetinio efektyvumo indekso priemonės griežtinimui bei kuro suvartojimo duomenų registravimui. Jūrų aplinkos apsaugos komiteto MEPC 74-ojoje sesijoje 2019 m. Gegužės mėnesį buvo priimtas nutarimas pagreitinoti trečiojo etapo EEDI priemonės taikymą iš 2025 m. į 2022 m. Ši priemonė bus taikoma keliems laivų tipams, įskaitant dujovežius, konteinerinius ir generalinių krovinių laivus. Taip pat, 2016 m. TJO įvedė privalomus reikalavimus laivams virš 5000 bendrojo tonažo rinkti duomenis ir pranešti apie kiekvienos kuro rušies suvartojimą laive. Surinkti duomenys sudarys tvirtą pagrindą, kuriuo remiantis TJO galės priimti sprendimus dėl papildomų priemonių siekiant sumažinti emisijas [55]. Tarptautinė jūrų organizacija taip pat užsibrėžė ambicingą tikslą pereiti prie švarios laivybos iki XXI a. galo, vadinasi sumažinti šiltnamio dujų emisijas iki nulio. Visgi, šį tikslą pasiekti tradiciniais metodais, naudojant iškastinį kurą, yra neįmanoma užduotis, todėl

tik panaudojant inovatyvias technologijas ir alternatyvų kurą, kuris degdamas neišmeta į aplinką kenksmingų išmetamųjų dujų emisijų, būtų galima įgyvendinti švarios laivybos viziją.



3 pav. TJO CO₂ mažinimo strategija [55].

Atsižvelgiant į MARPOL Annex VI reglamentą eksploatuojamiems ir naujai statomiems laivams reikės ieškoti būdų kaip laikytis šio reglamento nuostatų. Azoto oksidų reguliavimas yra taikomas pagal laivo pastatymo metus, todėl esamiems laivams, kurie jau laikosi NO_x reikalavimų, šiuo atžvilgiu papildomų priemonių imtis neprireiks, tačiau naujai statomiems laivams nuo 2021 m. eksploatuojamiems Baltijos ir Šiaurės jūrose bus privaloma laikytis trečios pakopos azoto oksidų mažinimo reikalavimų. Tokiu atveju, laivų savininkai privalės investuoti į antrines azoto oksidų valymo technologijas, kaip SCR arba EGR, arba naudoti alternatyvų kurą, pavyzdžiui suskystintas gamtines dujas arba metanolį. Naudojant SGD azoto oksidų emisijos sumažėja iki 90% lyginant su dyzelinu (MDO), o naudojant metanolį azoto oksidų emisijas galima sumažinti iki 80%, tačiau abiem atvejais reikalinga tradicinio dyzelinio variklio modifikacija [4]. Kalbant apie sieros oksidų emisijų mažinimą taip pat galimi panašūs variantai arba ir toliau vartoti naftos likutinius produktus kaip mazutas, tačiau tam prireiks įdiegti valymo įrangą – skruberius, arba naudoti mažo sieringumo distilatus be papildomų variklių modifikacijų. Artimiausiu metu siekiant pasiekti TJO strategijos tikslo sumažinti CO₂ emisijas iki 40% iki 2030 m., su mazutu ar kitais dyzelino distilatais to pasiekti nepavyks, todėl tam prireiks kompleksinių sprendimų, pavyzdžiui EEDI ir SEEMP priemonių ir alternatyvaus kuro panaudojimo – SGD, biodyzelino, metanolio. Tačiau žvelgiant dar toliau, siekiant sumažinti CO₂ emisijas iki 70% iki 2050 m., net ir SGD, biodyzelino ar metanolio alternatyvos neužtikrins JTO užsibrėžto tikslo, tam prireiks panaudoti inovatyvias technologijas ir švarios kilmės kurą. Vienas iš galimų siūlymų būtų panaudoti kuro elementų technologiją ir vandenilinį kurą,

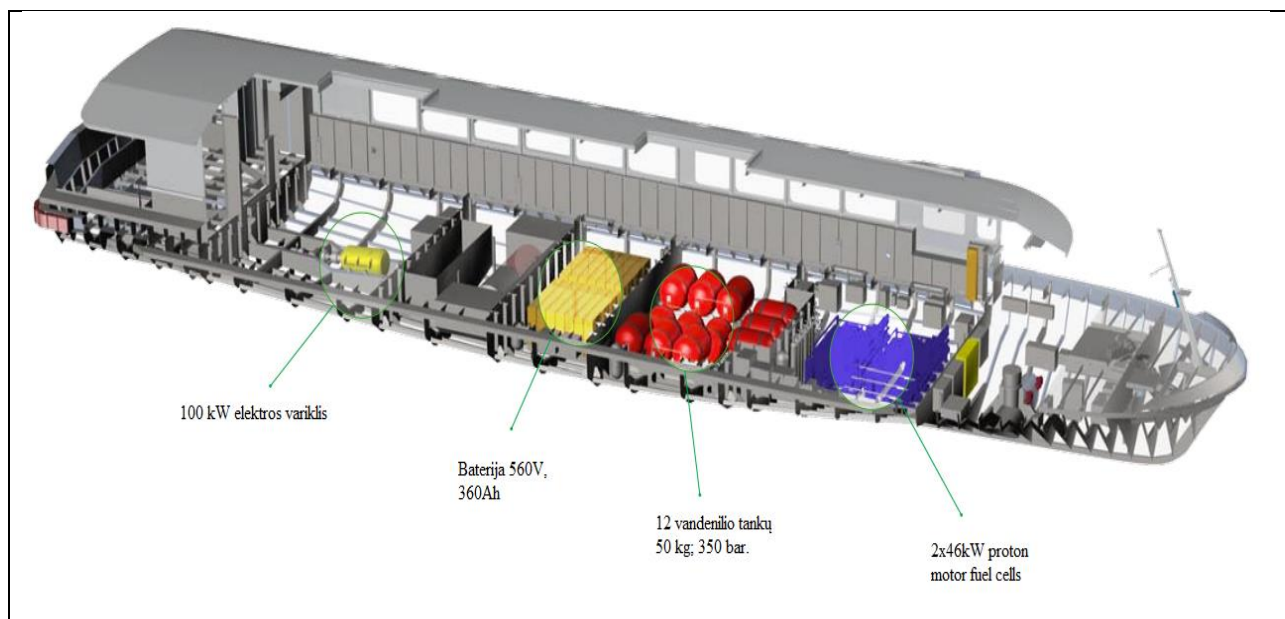
kadangi lyginant su kitomis kuro rūšimis yra matomas akivaizdus pranašumas (žr. 2 lent.). Vandenilį naudojant vidaus degimo varikliuose iki trijų kartų sumažėja CO₂ ir kietųjų dalelių emisijos, tačiau ženkliai išauga NO_x emisijos, todėl toks sprendimas būtų galimas tik su antrinėmis azoto oksidų valymo technologijomis. Kita vertus, vandenilį naudojant kuro elementuose neišsiskiria jokie teršalai tik vandens garai, todėl siekiant sumažinti taršą pagal TJO ateities strategiją, o vėliau ir visiškai pereiti prie švarios laivybos reikėtų orientuotis į vandenilinį kurą.

2 lentelė. Skirtingų kuro rūšių pagrindinės charakteristikos [4, 15].

Kuro rūšis	Šilumingumas, MJ/kg	Tankis, kg/m ³	Eksploatacinis kuro emisijų faktorius (g/kWh)			
			CO ₂	SO _x	NO _x	PM
Dyzelinas (MDO)	42,5	870	524	0,32	14,8	0,16
Gamtinės dujos (LNG)	44,4	450	412	0,003	1,17	0,027
Biodyzelinas (B100)	37,6	850	298	0	15,7	0,07
Metanolis (CH ₃ OH)	20,0	792	522	0	3,05	0
Vandenilis (H ₂) VDV	120,0	70,8 (LH ₂)	187	0	22,0	0,05
Vandenilis (H ₂) KE			0	0	0	0

Vandenilio panaudojimo galimybės kuro elementuose yra plačios, suteikiančios galimybę visiškai atsiskayti vidaus degimo variklių ir iškastinio kuro naudojimo laivuose ir gebančios pilnai aprūpinti laivą reikalinga elektros energija vartotojus, nuo smulkesnių buitinių prietaisų iki propulsinio komplekso elektros variklių. Kuro elementų technologijos panaudojimo rezultatai sausumos kelių transporte įrodo technologijos patikimumą ir pasirengimą pritaikyti šią technologiją jūrų transporte. Trumpai apžvelkime vieną iš kelių sėkmingai įgyvendintų „zero-emissions“ laivų projektų. Keleivinis - pramoginis vidaus vandenų laivas - prototipas „Alsterwasser“ talpinantis iki 100 keleivių buvo sėkmingai eksploatuojamas nuo 2010 iki 2013 metų Hamburgo mieste, Vokietijoje. Per tą laiką keleiviai galėjo mėgautis komfortiška, mažo triukšmo ir vibracijos kelione draugišku aplinkai laivu. Laive buvo sumontuoti du kuro elementų moduliai, kiekvieno galingumas siekė 46 kW, dvylika 350 barų slėgio vandenilinio kuro tankų, kurių bendra talpa siekė 50 kg, 560V ir 360Ah talpos akumuliatorius ir 100 kW elektros variklis, užtikrinantis laivo eigumą. Kuro

užpildymas trukdavo iki 12 minučių, o 50 kg vandenilinio kuro pakakdavo eksploatacijai iki trijų dienų [31].



4 pav. Laivo „Alsterwasser“ išplanavimas [20].

Sėkmingi kuro elementų technologijos pritaikymo vandens transporte demonstraciniai projektai paspartino šios technologijos vystimą jūrų transporto sektoriuje. Daugelis kuro elementus gaminančių įmonių kartu su laivų projektavimo ir statybos įmonėmis bei pasaulyje lyderiaujančiais laivų įrangos gamintojais siekia sukurti kuro elementų sistemas tinkamas laivams. Norvegų kompanija Havyard Group, dirbanti ties ateities laivybos projektais, kartu su partneriais ieško sprendimų kaip apjungti esamas vandenilio technologijas ir sukurti vieną sistemą, kurią galėtų įsigyti naujų laivų savininkai. Tikslas yra sukompaktuoti laivo jėgainės įrengimus, kuriuos sudarytų suskystinto vandenilinio kuro tankai ir 3,2 MW kuro elementų moduliai. Kompanija taip pat siekia pasiūlyti kuro elementų sistemą laivų jėgainių modernizacijai [35]. Kuro elementų gamintojai Ballard Power Systems pasirašė sutartį su ABB, kuri įsipareigojo sukompaktuoti kuro elementų modulius į kompaktišką sistemą, kuri užimtų tiek pat vietos kiek ir įprastas jūrinis dyzelinis variklis. Taip pat, kuro elementų gamintoja Nedstack bendradarbiaujant su General Electric siekia sukurti didelės galios kuro elementų jėgainę varomą vandeniliu, kurios būtų pritaikytos kruiziniams laivams, siekiant sumažinti kruizinių laivų skleidžiamą taršą.

Greta kuro elementų sistemų tobulinimo bei vystymo siekiant pritaikyti laivyboje, vyksta vandeniliu varomų laivų projektavimas ir jų įgyvendinimas. Europos Sąjunga, lyderiaujanti vandenilio technologijose, pagal mokslinių tyrimų ir plėtros programą „Horizontas 2020“ finansuoja dviejų vandenilio keltų statybą, kurie bus eksploatuojami Prancūzijoje ir Norvegijoje. Šiuo metu keltai projektavimo stadijoje, tačiau atskleistos detalės nurodo, kad keltai talpina 200 keleivių ir 60 automobilių, o laivo jėgainę sudarys 600 kW PEM kuro elementai. Tikimasi, kad keltai pradės

eksploataciją 2021 metų pavasarį [28]. Norvegų laivų statybos kompanija Ulstein pristatė ofšorinio laivo projektą, kuris tikėtina bus įgyvendintas iki 2022 m. Suprojektuotą laivo jėgainę sudarys 7,5 MW PEM kuro elementai [75]. Taip pat, JAV nacionalinė laboratorija suprojektavo 84 keleivių dydžio keltą ir mokslinių tyrimų laivą, kurie pilnai varomi vandeniliu panaudojant kuro elementų technologiją. Keltas šiuo metu statomas Kalifornijoje, o mokslinių tyrimų laivas laukia investuotojų. Mokslinių tyrimų laivo projekte nurodytą laivo jėgainę sudaro 1,8 MW PEM kuro elementai, o su pilnai užpildytais 2x5,5 t suskystinto vandenilio talpos tankais sumontuotais ant viršutinio denio laivas bus pajėgus eksploatuoti 14 dienų [27, 70].

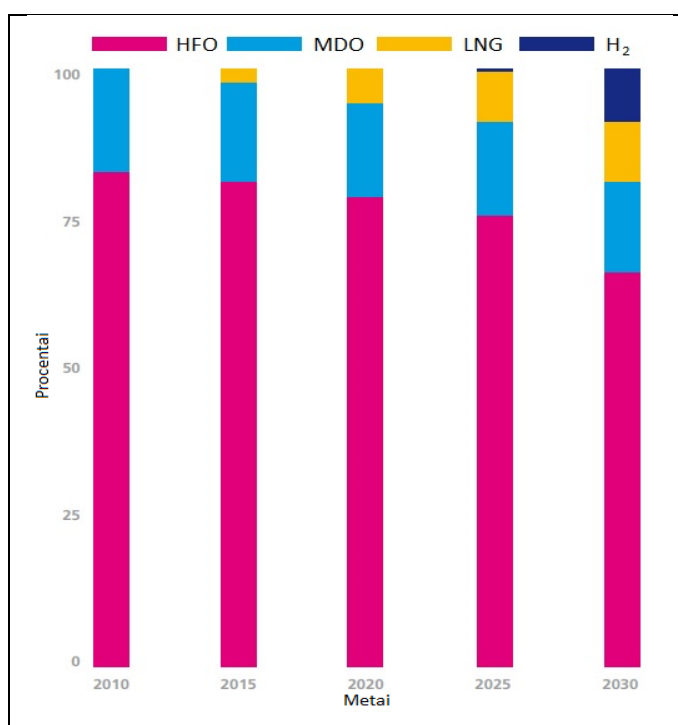
Tarptautinė jūrų organizacija yra nustatiusi gana griežtus reikalavimus susijusius su oro tarša iš laivų pagal MARPOL 73/78 Annex VI konvenciją. Istoriskai vertinant, pastebimas palaiptinis reikalavimų griežtinimas, o vertinant TJO ateities taršos mažinimo strategiją jūrų transporto sektoriuje, neatmetama, kad reikalavimai vis labiau griežtės ir pasieks momentą, kada tradicinis jūrinis dyzelinis variklis varomas mazutu ar dyzelino distilatais, net ir naudojant antrines SO_x ir NO_x valymo technologijas, nebeatitiks iškeltų TJO reikalavimų. Visgi, laikinų alternatyvų laikytis esamų ir busimų TJO reikalavimų yra. Pagal atliktą kuro rūšių palyginimo analizę, matome, kad galima būtų naudoti suskystintas gamtines dujas, metanolį ar biodyzeliną. Tačiau ilgalaikėje perspektyvoje vandenilinis kuras yra vienas iš tinkamiausių pasirinkimų aprūpinant laivo jėgaines energija, kadangi vienu iš galimų vandenilio panaudojimo atvejų vandenilis neišskiria toksiškų emisijų. Visgi, siekiant įvertinti vandenilinio kuro panaudojimo efektyvumą jūrų transporto sektoriuje būtina detalesnė technologijų analizė, todėl remiantis atliktos situacijos analizės rezultatais yra suformuoti sekantys uždaviniai:

- Išanalizuoti vandenilinio kuro panaudojimo technologijas jūrų transporte, vertinant tarptautinės jūrų organizacijos (IMO) aplinkosauginius reikalavimus.
- Ištirti vandenilinio kuro racionalias panaudojimo technologijas jūrų transporte energijos efektyvumo rodiklių aspektu.

1.2. JŪRŪ TRANSPORTO SEKTORIAUS VANDENILINIO KURO POREIKIO VERTINIMAS

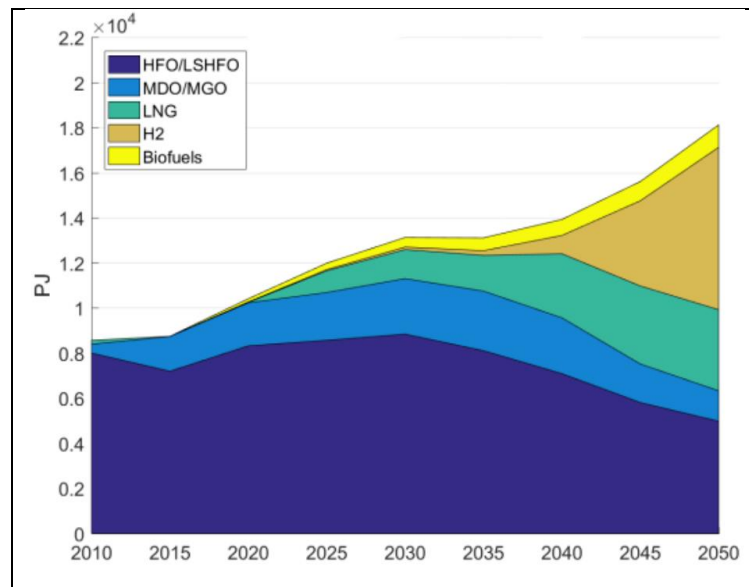
Jūrų transporto sektoriuje yra pastebimas judėjimas link švaresnės laivybos. Pasak Jungtinių Tautų atlikto tyrimo, bendras pasaulinio laivyno CO₂ emisijų išmetamumas į aplinką didėja, tačiau ne taip sparčiai kaip auganti jūrinė prekyba. Nuo 2013 iki 2018 metų jūrinė prekyba augo apie 20%, o per tą patį laikotarpį CO₂ emisijos iš laivų išaugo tik 13%. Šis rodiklis, pasak klasifikacinės bendrovės DNV GL, parodo jūrinio sektoriaus energetinio efektyvumo didėjimą [13]. Laivų pastatytų po 2013 metų energetinis efektyvumas yra ženkliai didesnis nei senesnių laivų ir tikimasi, kad laivai pastatyti per ateinančius kelerius metus bus dar efektyvesni. Tačiau ekspertų teigimu, nepaisant

didėjančio laivų energetinio efektyvumo, siekiant ateityje laikytis TJO reikalavimų, vandenilio technologijų naudojimas laivyboje yra neišvengiamas. „Kuro tendencijos jūrų transporte 2030“ ataskaitoje, parengtoje Londono universiteto UCL energetikos instituto mokslininkų bendradarbiaujant su Lloyd’s registro atstovais, yra pateikiami keli galimų prognozių scenarijai susiję su kuro suvartojimu jūrų transporto sektoriuje pagal kuro rūšį. Tyrimo ribos apima konteinerinių, sausakrūvių, generalinių krovinių ir tanklaivių kuro suvartojimą ir kuro rūšių pasiskirstymą laivybos sektoriuje. Pateiktoje, vienoje iš optimiškiausių pasaulio jūrų transporto kuro suvartojimo prognozių pagal kuro rūšį spėjama, kad jei tarptautinė jūrinė prekyba sparčiai augs ir bus skiriama daugiau dėmesio aplinkosaugai ir klimato kaitai, vandenilinio kuro suvartojimas pasaulinėje linijinėje laivyboje gali sudaryti apie 1% dalį 2025 metais ir pasiekti 9% dalį iki 2030 metų [61].



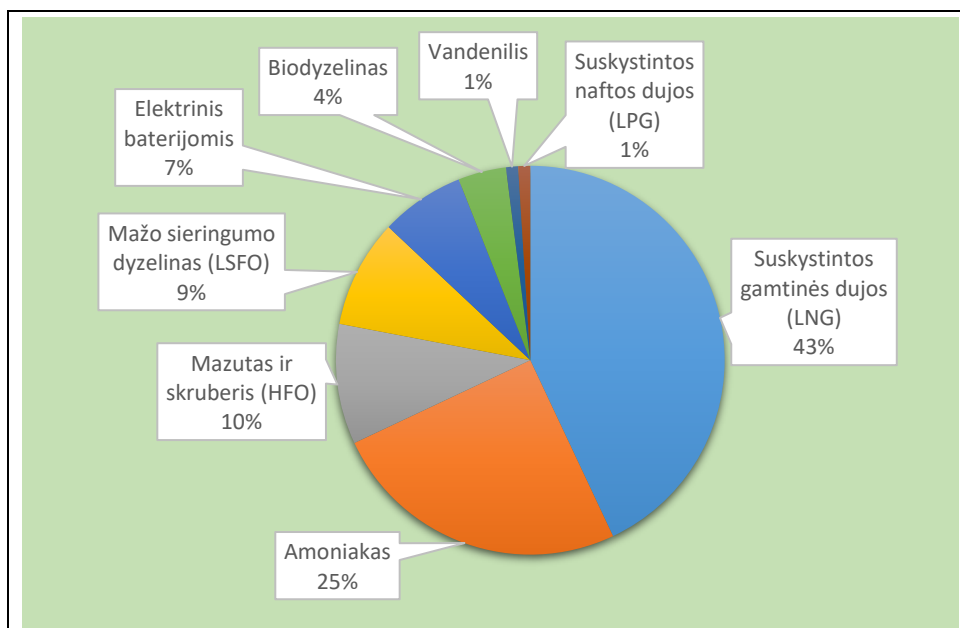
5 pav. Jūrų transporto sektoriaus kuro suvartojimo prognozė pagal kuro rūšį iki 2030 metų [61].

Kitame tyrime, remiantis „UMAS – tarptautinės laivybos CO₂ emisijos 2016“ medžiaga, viename iš kuro suvartojimo laivyboje prognozuojamų scenarijų iki 2050 metų spėjama, kad vandenilio suvartojimas jūrų transporte nuo 2035 metų gali didėti eksponentiškai ir iki 2050 metų pasiekti 40 % dalį viso jūrų transporto sektoriaus kuro poreikio. Kartu numatomas ir suskystintų gamtinių dujų vartojimo padidėjimas iki 19% 2050 metų laikotarpiui. Pagal šį scenarijų, skaičiuojama, kad CO₂ emisijos sumažės iki 39% – nuo 634 mil. tonų metinių CO₂ emisijų pagal 2014 metų lygį iki 387 mil. tonų per metus 2050 metų laikotarpiui, tačiau nebus pasiekiamas Tarptautinės jūrų organizacijos CO₂ mažinimo planas [10].



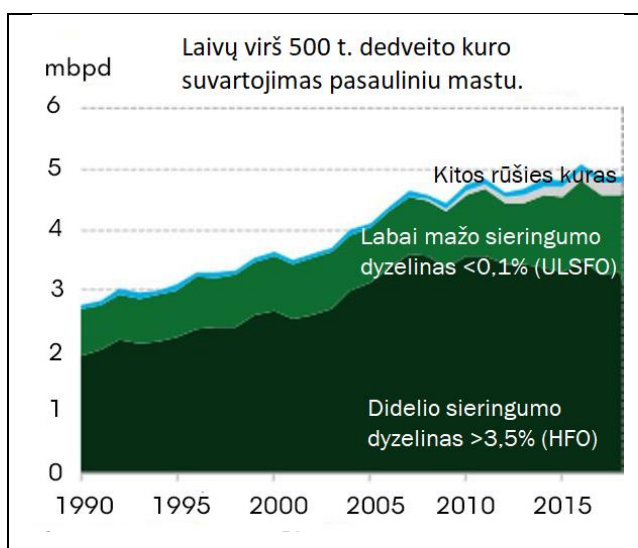
6 pav. Jūrų transporto sektoriaus kuro suvartojimo prognozė pagal kuro rūšį iki 2050 metų [10].

Klasifikacinė bendrovė DNV GL pagal Tarptautinės jūrų organizacijos ambicingą taršos mažinimo strategiją sudarė pesimistiškesnę jūrų transporto sektoriaus prognozė 2050 metams atsižvelgiant į vandenilio panaudojimą laivyboje (žr. pav. 7). Prognozė sudaryta remiantis pasaulinio laivyno energijos suvartojimu pagal kuro rūšį tendencijomis. 2050 metais numatoma, kad laivai naudojantys suskystintas gamtines dujas sudarys didžiausią dalį, net 43% viso pasaulio laivyno, o tai paskatins išsivysčiusi pasaulinė SGD infrastruktūra ir griežtėjantys taršos iš laivų reikalavimai. Taip pat numatoma, kad nuo 2040 metų sugriežtintų naujos statybos laivų reikalavimų, naujos statybos laivų jėgainės naudos amoniaką (NH_3), o 2050 metais jos sudarys 25% pasaulinio laivyno dalį. Vandenilio panaudojimą laikinai pakeis amoniakas, nes amoniako sandėliavimo technologija laive yra paprastesnė lyginant su vandenilio ir tikėtina, kad amoniako kaina nukonkuruos vandenilio kainą. Dėja, bet 2050 metais remiantis prognoze vandeniliu varomi laivai (pagrinde maži keleiviniai keltai, ofšoriniai aptarnavimo laivai) sudarys tik 1% pasaulinio laivyno, o tai nulems aukštos pradinės investicijos ir technologiniai suvaržymai. DNV GL ekspertai teigia, kad laivų, naudojančių vandenilio technologijas, atėjimas į rinką numatomas 2050 – 2060 metų laikotarpyje, o 2070 metais tokie laivai sudarys trečdalį pasaulinio laivyno. Ši prognozė remiasi pastebimais rinkos pokyčiais, priimtomis ir numatomomis taršos mažinimo prevencinėmis priemonėmis jūrų transporto sektoriuje. Pasak ekspertų, kad pasiekti tarptautinės jūrų organizacijos IMO užsibrėžtus tikslus, artimiausiu metu naujos statybos laivų rinka orientuosis į suskystintas gamtines dujas, o iki 2040 metų ši rinka pasieks piką. Vėliau, sekančius 30 metų vystantis infrastruktūrai numatomas amoniako rinkos proveržis laivybos sektoriuje, o dar vėliau ir iki amžiaus galo tikimasi vandenilio technologijų panaudojimo plačiu mastu.



7 pav. Pasaulinio laivyno energijos suvartojimas pagal kuro rūšį 2050 metais [13].

Įvertinus ateities prognozes dėl vandenilinio kuro vartojimo, tikėtina, kad pamažu augs vandenilinio kuro suvartojimas jūrų transporto sektoriuje, kuris gali sudaryti iki 40% dalį viso metinio kuro poreikio iki 2050 metų. Apytiksiu matematinio skaičiavimo metodu pasvarstykime apie vandenilio metinį poreikį tonomis prie prognozuojamų 40%. Vandenilinio kuro suvartojimo poreikiui apskaičiuoti panaudosime dyzelino metinio suvartojimo statistiką. Remiantis statistiniais duomenimis, laivų virš 500 tonų dedveito dyzelino suvartojimas viso pasaulio mastu siekia 4,8 milijonus barelių per dieną pagal 2018 metų statistikos duomenis [7]. Pavertus į tonas gauname, kad per dieną pasaulinis laivynas suvartoja apytiksliai 664 tūkstančius tonų, atitinkamai metinis suvartojimas siekia 242 milijonus tonų.



8 pav. Laivų virš 500 t. dedveito kuro suvartojimas per dieną pasauliniu mastu [7].

Apskaičiuojame suvartojamo dyzelino kiekį jūrų transporto sektoriuje:

$$M_d = \frac{M_b \cdot b}{1000} \cdot \frac{t_d}{1000} = \frac{4800000 \cdot 158,99}{1000} \cdot \frac{870}{1000} = 663942,2 \text{ t/d} \quad (1)$$

čia,

M_d – dyzelino masė, t;

M_b – dyzelino masė, bareliais;

b – 1 barelis pavertus į litrus;

t_d – dyzelino tankis, priimame sąlygą, kad vidutinis dyzelino tankis yra 870 kg/m^3 .

Būtina įvertinant, kad vandenilinio kuro šilumingumas beveik tris kartus didesnis nei dyzelino, dėl to vandenilio poreikis sumažėja. Apskaičiuojamas realus prognozuojamas vandenilinio kuro poreikis per dieną pagal prognozuojamą 40% dalį viso metinio kuro suvartojimo jūrų transporto sektoriuje remiantis prieš tai gautais dyzelino suvartojimo rezultatais:

$$M_v = \frac{M_d}{\frac{Hu_{H_2}}{Hu_D}} \cdot 40\% = \frac{663942,2}{\frac{120}{42,5}} \cdot 40\% = 94058,5 \text{ t/d} \quad (2)$$

čia,

M_v – vandenilio masė, t;

M_d – dyzelino masė, t;

Hu_{H_2} – vandenilinio kuro šilumingumas, 120 MJ/kg;

Hu_D – dyzelino šilumingumas, 42,5 MJ/kg;

Jei dar įvertintume laivo jėginių su dyzeliniais varikliais ir vandenilį naudojančiais kuro elementais technologinį efektyvumą, jūrų transporto sektoriaus metinis vandenilio poreikis sumažėtų. Priimame sąlygą, kad vidutinių apsučių, jūrinių dyzelinių variklių efektyvumas siekia iki 50% (Wartsila teigimu), o PEM kuro elementų (*angl. Proton exchange membrane fuel cell*) efektyvumas be šilumos rekuperacijos siekia 60% [20]. Tokiu atveju, palyginus vieną technologiją su kita, gauname, kad PEM kuro elementai sunaudoja 20% mažiau kuro:

$$\eta = \left(\frac{FC}{DE} - 1 \right) \cdot 100\% = \left(\frac{60\%}{50\%} - 1 \right) \cdot 100\% = 20\% \quad (3)$$

čia,

η – efektyvumas, %;

FC – PEM kuro elementų efektyvumas, %;

DE – Wartsila jūrinių dyzelinių variklių efektyvumas, %;

Apskaičiuojamas prognozuojamas vandenilio suvartojimas, taikant sąlygą, kad visas vandenilis bus panaudojamas kuro elementuose:

$$\begin{aligned}
 M_{vFC} &= M_v \cdot (100\% - \eta) = 94058,5 \cdot (100\% - 20\%) = \\
 &= 75246,8 \text{ t/d} \cdot 365 = 27465082 \text{ t/m}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

čia,

M_{vFC} – vandenilio suvartojimas kuro elementuose, t;

Atliktas preliminarus matematinis vandenilio suvartojimo vertinimas parodo, kad siekiant patenkinti pasaulinį laivų virš 500 tonų dedveito kuro poreikį, ateityje dyzeliną pakeičiant vandeniliniu kuru, kur bendras poreikis sudarytų 40% dalį viso laivybos sektoriaus metinio kuro poreikio, vandenilio poreikis galėtų siekti 75 tūkstančius tonų per dieną, atitinkamai, apskaičiavus metinis suvartojimas galėtų siekti 27,5 milijonus tonų. Vertinimas atliktas priimant prielaidą, kad laivai, kurie naudos vandenilinį kūrą, turės kuro elementų jėgaines.

Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) statistiniais duomenimis iš viso apie 69 milijonai tonų vandenilio yra pagaminama kasmet pasauliniu mastu ir iš jų apie 90% yra naudojama cheminėje, naftos perdirbimo ir metalurgijos pramonėje, o tik mažiau nei 10% visame pasaulyje pagaminto vandenilio, o tai sudaro <6,9 milijonus tonų, yra panaudojama transporto sektoriuje, pagrinde automobiliuose, autobusuose, traukiniuose [9]. Kol kas vandenilio panaudojimas laivybos sektoriuje nėra įtrauktas į statistiką, nes nėra laivų kurie būtų varomi vandeniliu. Tik labai maža dalis vandenilio, vienetinais atvejais, yra panaudojama su vandens transportu susijusiuose demonstraciniuose, bandomuosiuose projektuose. Vadinasi, siekiant vandenilio technologijų pritaikymo jūrų transportui reikės atitinkamai padidinti vandenilio gamybos apimtį. Galimai iki 2050 metų galėtų tekti padidinti nuo dabartinės 69 mil. t. vandenilio gamybos iki 96,5 mil. t. per metus, remiantis atliktu vandenilio poreikio jūrų transporto sektoriuje vertinimu, o tai sudaro apie 40% padidėjimą. Todėl būtina įvertinti, koku būdu efektyviausiai būtų galima gaminti bei transportuoti vandenilį skirtą jūrų transporto sektoriaus poreikiams. Tam yra suformuojamas sekantis uždavinys:

- Išanalizuoti efektyviausias vandenilinio kuro gamybos bei transportavimo technologijas, siekiant pritaikyti linijinėje jūrų transporto laivyboje.

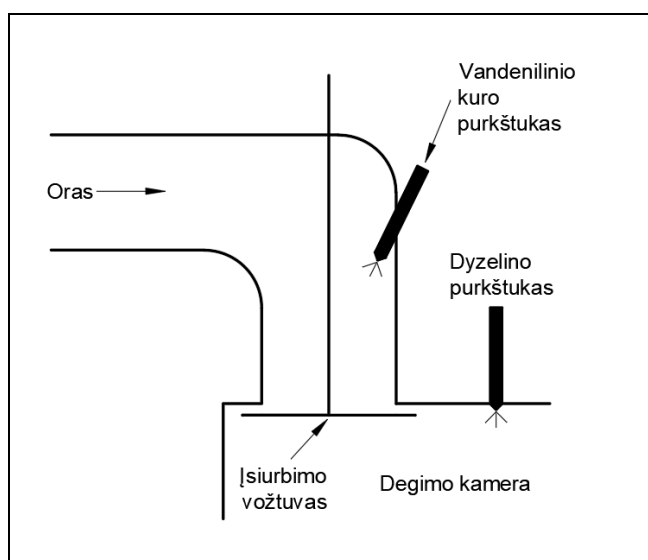
2. VANDENILIO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ

2.1. VANDENILIO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ PAGAL TJO APLINKOSAUGINIUS REIKALAVIMUS.

Vandenilinio kuro panaudojimas vidaus degimo varikliuose yra viena iš galimų alternatyvų. Vandenilio dujas maišant su dyzelinu yra pastebimi teigiami efektyvumo ir išmetamųjų dujų rodikliai, dėl vandenilio aukšto šilumingumo, didesnio liepsnos sklaidos greičio, puikaus susimaišymo su oru

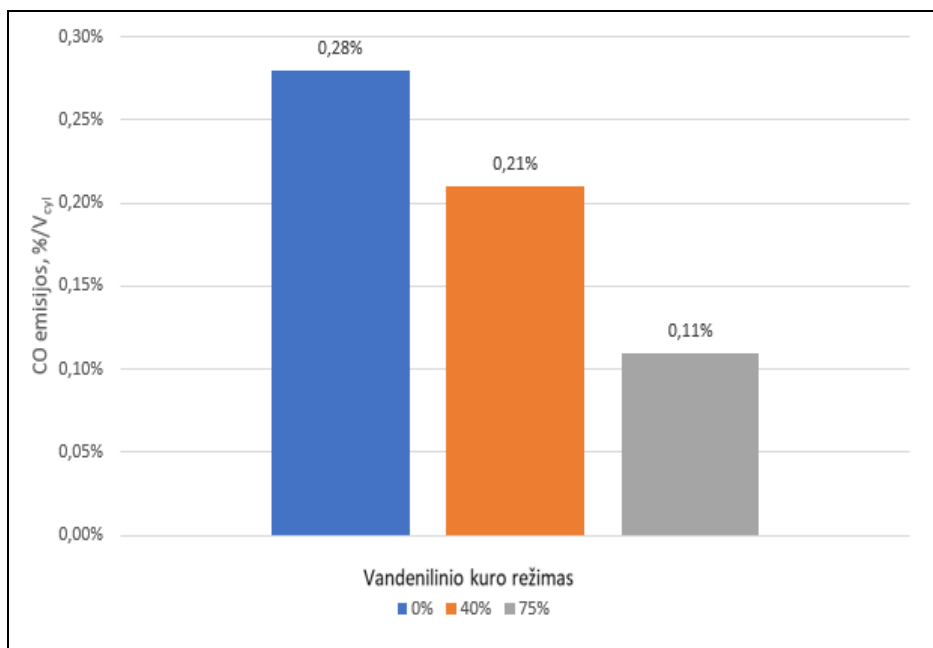
ir pačio vandenilinio kuro švarumo. Žinoma yra ir neigiama pusė, tai azoto oksidų (NO_x) emisijų padidėjimas dėl didesnės temperatūros cilindre.

Atliekant analizę dėl vandenilinio kuro panaudojimo kaip papildomam ar pagrindiniam energijos šaltiniui vidaus degimo varikliuose buvo ištirti įvairūs moksliniai šaltiniai [17; 18; 19]. Y. Karagoz „Effect of hydrogen addition at different levels on emissions and performance of diesel engine“ atliktame bandymų tyrime yra aprašomi dyzelinio variklio su vandenilio priedu darbo ir emisijų tyrimo rezultatai, kuriais toliau bus pasiremta, kad išanalizuoti vandenilinio kuro aplinkosauginių rodiklių pokytį, panaudojant vandenilį vidaus degimo varikliuose. Tyrimui buvo panaudotas supaprastinto tipo vieno cilindro, 1,16L tūrio, keturtaktis, $2700 \text{ aps/min}^{-1}$ variklis. Buvo tyriami trys skirtingi darbo režimai prie 100% variklio apkrovos su 0% vandenilio priedu, 40% vandenilio priedu ir 75% vandenilio priedu pagal energetinę vertę. 0% vandenilio reiškia, kad variklis buvo eksploatuojamas tik dyzelinu. Tyrimo metu buvo naudojamas 99,99% grynumo vandenilis. Dyzeliniame variklyje buvo atlikti keli minimalūs konstrukciniai pakitimai, tam kad būtų galimas vandenilinio kuro panaudojimas. Įsiurbimo kolektoriuje buvo įmontuotas dujų purkštukas, kuris reikalingas vandenilio dujų įpurškimui į cilindrą įsiurbimo ciklo metu.



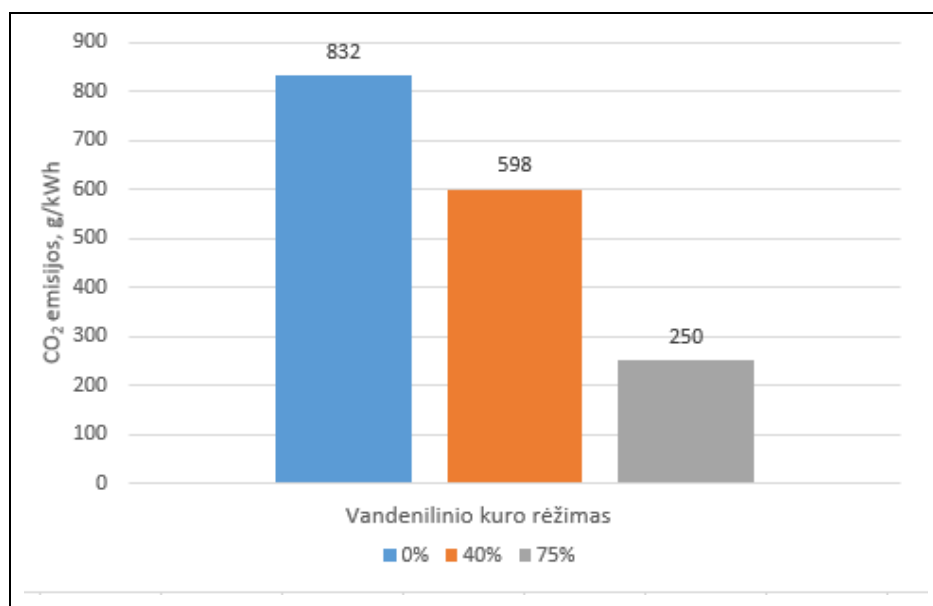
9 pav. Konstrukcinių pakitimų schema.

Tyrimo rezultatai parodė, kad anglies monoksido CO emisijų sumažėjimas buvo užfiksuotas iki 2,5 kartų prie 75% vandenilio darbo režimu. Anglies monoksido emisijos susiformuoja nepilnai sudegus kurui, todėl dėl vandenilio geresnių susimaišymo su oru savybių kuro mašinio degimo savybės pagerėja ir sumažina CO dujų susiformavimo galimybes. Taip pat, vandenilinis kuras neturi anglies atomų, todėl didinant vandenilio su dyzelinu santykį, mažėja anglies monoksidų emisijų kiekis [18].



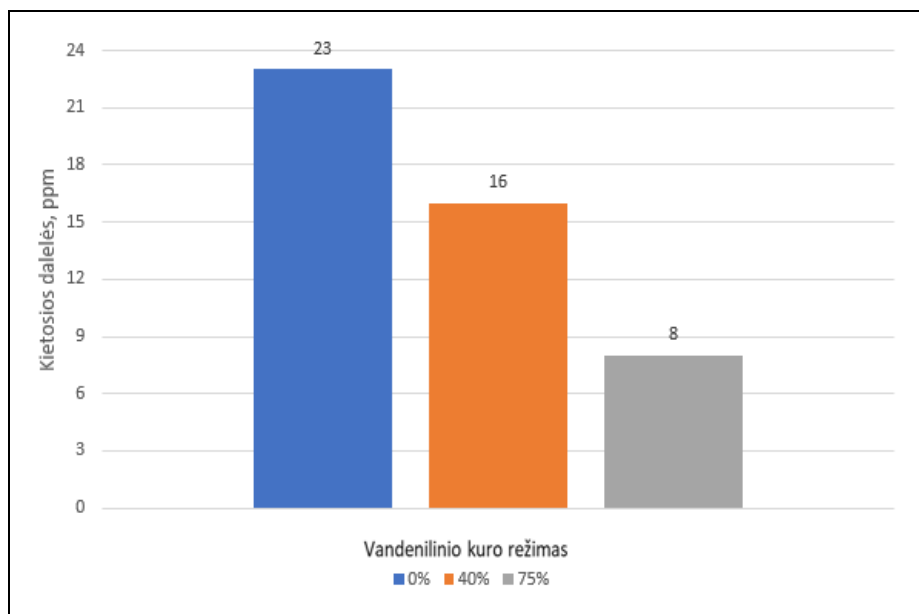
10 pav. Anglies monoksido CO emisijos [18].

Panaši tendencija matoma ir anglies dioksidų CO₂ emisijų susiformavime. Variklio eksploatacijos metu su 75% vandenilinio kuro priedu CO₂ emisijos sumažėjo daugiau nei 3 kartus, pagrinde tai lemia vandenilinio kuro švarumas. Kadangi vandenilinis kuras neturi anglies atomų, CO₂ emisijos susiformuoja degant dyzelinui, todėl didinant vandenilio santykį proporcingai mažėja anglies dioksidų emisijos.



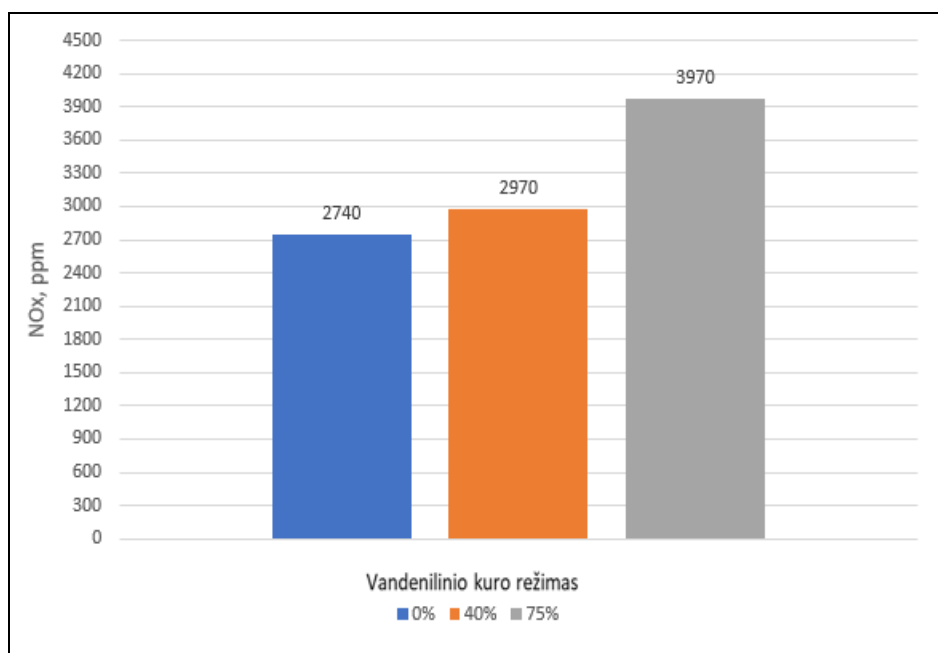
11 pav. Anglies dioksido CO₂ emisijos [18].

Panašus emisijų mažėjimas patebimas ir su kietosiomis dalelėmis. Kietųjų dalelių emisijos bandymo metu sumažėjo nuo 23 ppm iki 8 ppm (iki ~3 kartų) prie 75% vandenilinio kuro režimo.



12 pav. Kietųjų dalelių emisijos [18].

Tačiau su azoto oksidų emisijomis viskas atvirkščiai. Pastebėta, kad vidaus degimo varikliams dirbant su vandeniliu drastiškai padidėja azoto oksidų (NO_x) koncentracija dėl padidėjusios temperatūros ir slėgio cilindre. Azoto oksidus NO_x sudaro azoto monoksidas NO ir azoto dioksidas NO_2 . Azoto oksidai susiformuoja prie aukštų degimo kameroje esančių temperatūrų, todėl kylant temperatūrai cilindre kai kurie azoto atomai susijungia su deguonies atomais. Azoto oksidų emisijos priklauso nuo oro ir kuro santykio, suspaudimo laipsnio, variklio apkrovos. Eksperimento metu azoto oksidų emisijos padidėjo apytiksliai iki 1,5 karto.

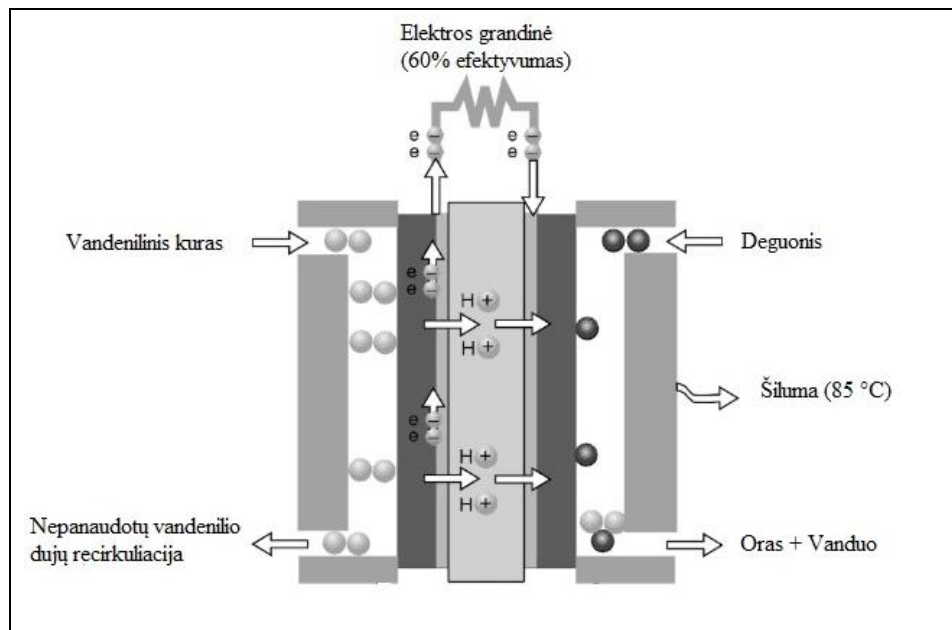


13 pav. Azoto oksidų (NO_x) emisijos [18].

Remiantis Tarptautinės jūrų organizacijos MARPOL 73/78 Annex VI taršos iš laivų konvencijos 13 ir 14 reglamentu vandenilio panaudojimas vidaus degimo varikliuose, kai kuriais

aspektais būtų tinkamas, siekiant laikytis taršos ribojimų. Pirmiausia, naudojant vandenilį „dual fuel“ varikliuose sieros oksidų ribojimo būtų laikomasi be išimčių, kadangi SO_x emisijos reglamentuojamas pagal sieros kiekį kure, o vandenilinis kuras sieros atomų neturi. „Dual fuel“ varikliuose dirbant vandeniliniu režimu, dyzelinas yra naudojamas iki 10% pagal tūrį, tam kad įvyktų savaiminis užsiliepsnojimas, ko vien gryno vandenilio mišiniu pasiekti nepavyktų dėl aukštos vandenilio užsiliepsnojimo temperatūros. Tokiu atveju, sieros oksidai susiformuotų tik nuo dyzelino dalies, todėl dyzelinui būtų taikomas sieros kiekio kuro ribojimas (nuo 2020 m. Sausio 1d. pasaulinis sieros kiekis kure 0,5%, nuo 2015 m. Sausio 1d. ECA zonose 0,1%). Remiantis vandenilio panaudojimo vidaus degimo varikliuose tyrimo rezultatais, CO₂ emisijos sumažėjo 70%, todėl atsižvelgiant į TJO anglies dvideginio emisijų mažinimo strategiją, naudojant vandenilį VDV būtų galima pasiekti 2050 metų tikslų (sumažinti 70% CO₂ emisijas jūrų transporto sektoriuje). Galiausiai, naudojant vandenilį VDV azoto oksidų emisijos padidėja 45% remiantis tyrimo rezultatais. Azoto oksidai yra toksiški ir kenksmingi aplinkai, todėl MARPOL 73/78 griežtai reglamentuoja NO_x emisijas, o kadangi 95% laivų naudoja naftinės kilmės kurą, azoto oksidų emisijų ribojimas pagrinde adresuojamas dyzeliniams varikliams, todėl NO_x padidėjimas 45% nuo griežtai apriboto dyzelinio variklio emisijų yra nepriimtinas ir neatitiktų keliamų NO_x ribojimo reikalavimų. Siekiant atitikti NO_x emisijų ribojimo reikalavimus, reikėtų įvesti papildomas azoto oksidų mažinimo priemones, tokias kaip išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema, SCR (cheminių reduktorių įpurškimas į išmetimo sistemą) sistema, įsiurbimo vožtuvo reguliavimo ar vandens įpurškimo į cilindrą sistemas.

Vandenilio panaudojimas kuro elementuose yra perspektyvus aplinkosauginiu požiūriu, nes neišsiskiria emisijos eksploatacijos metu. Skirtingai nei VDV, kuro elementų įrenginys naudoja vandenilinį kurą elektros gamybai. Technologija susideda iš dviejų elektrodų, katodo ir anodo. Į anodą paduodamas vandenilis, o į katodą – deguonis, sudaro sąlygas elektrocheminei reakcijai ir proceso metu išsiskiria elektra, bei vanduo ir šiluma. Kadangi sistema veikia elektrolizės principu, naudojant gryną vandenilį, neišsiskiria jokie teršalai, tik švari elektros energija. Vadinas, kuro elementų technologija atitinka visus, dabartinius keliamus MARPOL 73/78 Annex VI reikalavimus, o žvelgiant į ateitį taip pat atitinka TJO taršos mažinimo strategijos tikslus ir viziją iki 2100 metų pereiti prie švarios laivybos.



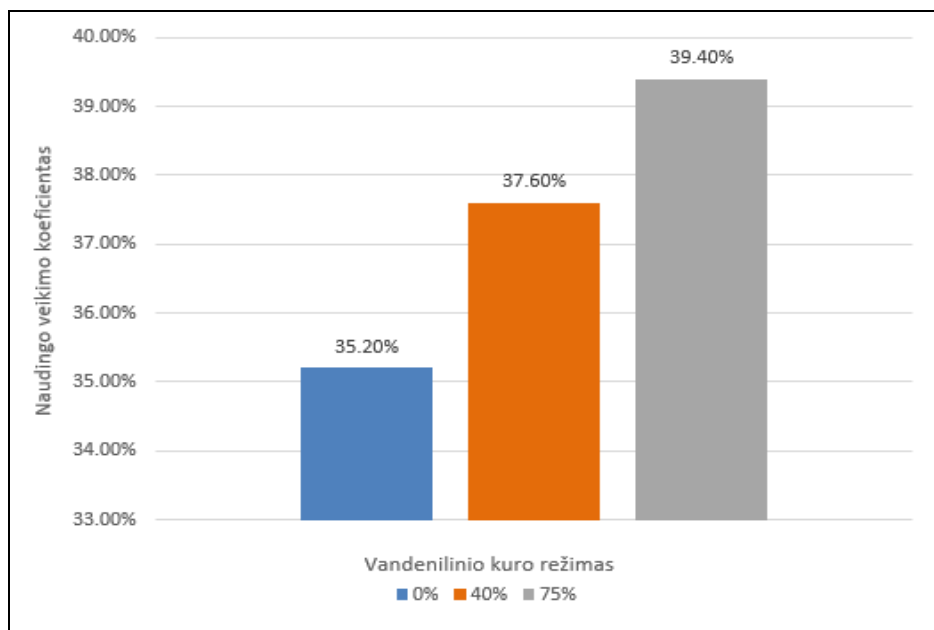
14 pav. Protonų mainų membranos kuro elementai (PEM) schema.

Apibendrinant bandymo rezultatus ir MARPOL 73/78 taršos reikalavimus, galime teigti, kad vandenilinio kuro panaudojimas dyzeliniame variklyje daugeliu atžvilgiu yra teigiamas, ženkliai sumažėja kietųjų dalelių, sieros oksidų, anglies oksidų emisijos, tačiau neigiamas veiksnys yra azoto oksidų padidėjimas, kuris stipriai sutrumpina augalų gyvenimo trukmę, neigiamai veikia žmogaus sveikatą ir svarbiausia ardo ozono sluoksnį. Literatūroje yra aprašomi įvairūs moksliniai tyrimai, kurių metu galima sumažinti azoto oksidų emisijas, koreguojant vandenilio dujų įpurškimo laiką, panaudojant EGR išmetamųjų dujų recirkuliacinį vožtuvą, pagalbinis išmetamųjų dujų valymo įrenginius SCR, tačiau buvo pastebėti kitų rodiklių pablogėjimai [17]. Taip pat, reiktų įvertinti, kad naudojant antrines sistemas azotų oksidų mažinimui eksploataciniai kaštai ženkliai padidėja, o tai konkurencingame versle nepriimtina. Todėl galime daryti išvadą, kad vandenilio panaudojimas vidaus degimo varikliuose nėra perspektyvus ir neatitinka ateities transporto sektoriaus, ypač jūrų transporte, keliamų aukštų reikalavimų. Kita vertus, vandenilinio kuro panaudojimas kuro elementų įrenginyje yra perspektyvus sprendimas, siekiant sumažinti taršą iš laivų, nes atitinka visus esamus ir būsimus taršos reikalavimus, nes neišskiria emisijų.

2.2. VANDENILIO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ PAGAL ENERGETINĮ EFEKTYVUMĄ

Vertinant vandenilio panaudojimą vidaus degimo varikliuose pagal energetinį efektyvumą yra pastebimas aukštesnis NVK nei lyginant su dyzelinu. Atliktuose moksliniuose tyrimuose naudojant vandenilinį kurą dyzeliniame variklyje pastebėta, kad naudingo veikimo koeficientas padidėja [17; 18; 19]. Remiantis konkrečiais tyrimo rezultatais, NVK padidėjo iki 12%, kai variklis dirbo 75%

vandenilinio kuro režimu lyginant su dyzelino darbo režimu [18]. Toks efektyvumo padidėjimas siejamas su vandenilio greitesniu užsiliepsnojimu nei dyzelino, taip pat efektyvesnio vandenilio dujų pasiskirstymo ir susimaišymo su oru cilindre bei didesnio vandenilinio kuro šilumingumu. Vidutinių apsukų, kelių tūkstančių kilovatų jūrinių dyzelinių variklių energetinis efektyvumas vidutiniškai siekia apie 45%, tad jei pritaikytume tyrimo rezultatus, tokio dyzelinio variklio efektyvumas panaudojant vandenilinį kurą siektų apie 50%.



15 pav. Naudingo veikimo koeficientas [18].

Vertinant vandenilio panaudojimą kuro elementuose pagal energetinį efektyvumą, remiantis atlikta šaltinių analize yra pastebimas pranašumas prieš vandenilio panaudojimą vidaus degimo varikliuose. Kuro elementų vidutinis energetinis efektyvumas svyruoja tarp 50% - 60%, o su šilumos kogeneracinėmis sistemomis gali siekti iki 85% [20]. Šiuo metu egzistuoja penki pagrindiniai, skirtingų konstrukcinių tipų kuro elementų įrenginiai. Daugiausiai žadantis kuro elementų tipas yra protonų mainų membranos (PEM) dėl žemos eksploatacijos temperatūros (60-100 °C), aukšto masės ir galios santykio, aukšto efektyvumo – apie 60%. Šios puikios charakteristikos nusako plačias pritaikymo galimybes pradedant nuo automobilių, laivų iki pastatų aprūpinimo elektros energija, todėl šio tipo kuro elementai komerciškai labiausiai vystomi. PEM kuro elementai naudoja platina padengtus elektrodus ir specialią polimero membraną, kuri veikia kaip elektrolitas ir leidžia prasiskverbti vandenilio jonams. Žemiau pateiktoje lentelėje yra palyginamos skirtingų tipų kuro elementų technologijų charakteristikos.

3 lentelė. Kuro elementų technologijos palyginimas [20].

Technologija	Įrenginio kaina	Modulio galingumas	Ilgaamžiškumas	Efektyvumas
Šarminis kuro elementas (AFC)	Žema	Iki 500 kW	Vidutinis	50% – 60% (elektrinis)
Fosforo rūgšties kuro elementas (PAFC)	Vidutinė	100 – 400 kW	Aukštas	40 % (elektrinis) 80% (su šilumos susigražinimu)
Išlydyto karbonato kuro elementas (MCFC)	Aukšta	Iki 500 kW	Vidutinis	50% (elektrinis) 85% (su šilumos susigražinimu)
Kieto oksido kuro elementas (SOFC)	Aukšta	20 – 60 kW	Vidutinis	60% (elektrinis) 85% (su šilumos susigražinimu)
Protonų mainų membranų kuro elementas (PEMFC)	Žema	Iki 120 kW	Vidutinis	55% – 60% (elektrinis)

Dabartinių rinkoje esančių kuro elementų įrenginių projektinis ilgaamžiškumas svyruoja nuo 10000 iki 40000 darbo valandų, o tai yra pakankamas lygis siekiant pritaikyti jūrų transporte. Tačiau dėl vis dar aukštos įrenginių kainos yra sudėtinga kuro elementams konkuruoti su vidaus degimo varikliais.

Įvertinus vandenilio technologijas pagal energetinį efektyvumą, nustatyta, kad vandenilinio kuro panaudojimas vidaus degimo varikliuose padidina NVK, pagal tyrimo rezultatus iki 12% lyginant su eksploatacija dyzelinu. Vidutiniškai dyzelinio variklio eksploatacija vandeniliu gali pasiekti 50% NVK, tačiau efektyvesnė vandenilio technologija būtų kuro elementai, nes technologijos energetinis efektyvumas siekia 55% - 60%.

Vandenilio technologijų pritaikymas jūrų transporto sektoriuje atneštų teigiamos naudos energetine, ekonomine ir aplinkosaugine prasme. Sumažėtų naftos ir kito iškastinio kuro gavyba ir suvartojimas, ir su tuo neigiamai susiję padariniai, pavyzdžiui floros ir faunos nykimas, užteršimas, globalinės katastrofos, teršalų koncentracijos padidėjimas ore, gyventojų sveikatos sutrikimai. Iš ekonominės pusės, padidėtų darbo vietų skaičius, kuriant ir tobulinant vandenilio technologijas, plėtojant infrastruktūrą. Kad geriau suvokti vandenilio technologijų integracijos į jūrų transporto sektoriaus svarbą, sudaryta SSGG (*angl. SWOT*) analizė. Išsamaus vertinimo detalės pateiktos žemiau esančioje lentelėje.

4 lentelė. Kuro elementų technologijos pritaikymo jūrų transporte SSGG analizė [20;31].

Vidiniai veiksniai	Stiprybės	Silpnybės
	<ul style="list-style-type: none"> • Aplinkosauginis efektyvumas, neišskiriamos emisijos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aukšta technologijų CAPEX ir kuro kaina.
	<ul style="list-style-type: none"> • Energetinis efektyvumas (kuro elementų sistemos efektyvumas ~ 60% be šilumos kogeneracinių sistemų. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ganėtinai mažas ilgaamžiškumas iki 40000 val.
	<ul style="list-style-type: none"> • Mažesnis triukšmas ir vibracija, kompaktiškesnis mašinų skyrius. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sudėtingas vandenilio transportavimas, saugojimas laive (žema suskystinto vandenilio temperatūra -253°C, mažas tankis).
	<ul style="list-style-type: none"> • Technologinis progresas (įdiegiant vandenilio technologijas jūrų transportui, paspartintume technologijos tobulėjimą, o kartu ir rentabilumą). 	<ul style="list-style-type: none"> • Nepritaikyta infrastruktūra laivybai (nėra terminalų, ofšorinio bunkeravimo paslaugų tiekėjų).
Išoriniai veiksniai	Galimybės	Grėsmės
	<ul style="list-style-type: none"> • Prailginti kuro elementų ilgaamžiškumą. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su saugumu susijusios grėsmės (vandenilio nuotekis galintis priversti prie gaisro, sprogimo)
	<ul style="list-style-type: none"> • Kurti ir tobulinti saugumo sistemas, užtikrinant saugią eksploataciją. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nepakankamos vandenilio gamybos apimtys (išaugus paklausai, gali pakilti produkto kaina).
	<ul style="list-style-type: none"> • Potencialas didinti gamybos apimtis (ypatngai švaraus vandenilio iš atsinaujinančių šaltinių). 	<ul style="list-style-type: none"> • Nepakankamai ištirti kuro elementų eksploataciniai rodikliai prie skirtingų jūrinių sąlygų.
	<ul style="list-style-type: none"> • Vystyti infrastruktūrą (ypatingai naujų terminalų statyba). 	<ul style="list-style-type: none"> • Trūksta reglamentų saugiam darbui su vandeniliu.

Kaip ir bet kurios kitos naujos technologijos įdiegimas, dažnu atveju pradžioje, turi daugiau silpnųjų pusių nei stipriųjų. Sudaryta vandenilio technologijų pritaikymo jūrų transporte SSGG analizė parodo, kad pagrindinės problemos yra aukšta technologijų ir kuro kaina, silpna infrastruktūra, sudėtingas vandenilio saugojimas laive bei transportavimas. Tačiau aukšta kuro elementų CAPEX kaina, su kiekvienais metais drastiškai mažėja, o įvairios mokslinių tyrimų ir plėtros programos tai tik paspartina [57]. Todėl pagrindinė problema išlieka terminalų ir ofšorinio vandenilio bunkeravimo paslaugų trūkumas, matomas tik nežymus progresas, tačiau didėjant laivų – vartotojų skaičiui, kartu vystysis ir linijinei laivybai pritaikyta infrastruktūra. Pagrindiniai privalumai

skatinantys vandenilio technologijas pritaikyti laivybai yra aukštas energetinis ir aplinkosauginis efektyvumas, nes sumažinti oro taršą iš laivų yra šio amžiaus prioritetas.

Išanalizavus įvairius mokslininkų atliktus tyrimus susijusius su vandenilio panaudojimu vidaus degimo varikliuose ir įvertinus eksploatacijos aplinkosauginius bei energetinius rodiklius, nustatyta, kad vandenilio panaudojimas vidaus degimo varikliuose nėra perspektyvus ateities sprendimas aplinkosauginiu ir rentabilumo aspektu, siekiant mažinti taršą iš laivų dėl azoto oksidų padidėjimo. Alikta kuro elementų analizė parodė, kad vandenilio panaudojimas kuro elementų technologijoje yra racionalus sprendimas, nes eksploatacijos metu nėra išskiriamos emisijos, o energetinis efektyvumas taip pat yra aukštesnis nei VDV. Kadangi nebuvo rasta mokslinių tyrimų susijusių su kuro elementų pritaikymu jūrų transportui, nuspręsta pritaikyti kuro elementų technologiją laive, todėl yra suformuotas sekantis uždavinys:

- Eskiziniame lygmenyje pateikti sprendimą vandenilinio kuro technologijos pritaikymui laive ir įvertinti jos panaudojimo eksploatacinius rodiklius.

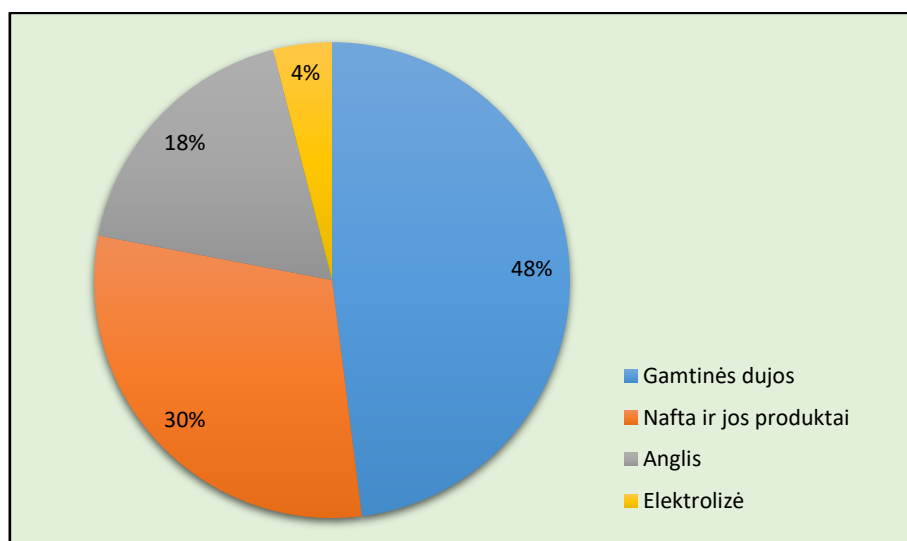
3. VANDENILIO GAMYBOS IR TRANSPORTAVIMO TECHNOLOGIJOS

3.1. VANDENILIO GAMYBOS TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ

Augant vandenilio technologijų populiarumui, plečiantis kuro elementų pritaikymo galimybėms, didėja vandenilio gamybos apimtys. Vertinant istorinius statistinius duomenis, nuo 1975 iki 2018 metų vandenilio gamybos apimtys išaugo daugiau nei 3 kartus, o nuo 2005 iki 2018 metų vandenilio gamyba išaugo 150% pasauliniu mastu ir teigiama, kad vandenilio sektorius išlaikys 8% vidutinį metinį vandenilio gamybos augimą iki 2050 metų [56]. Remiantis DNV GL skaičiavimais šiuo metu viso pasaulio vandenilio gamybos energijos metinis poreikis siekia apie 3% viso pasaulio pagamintos energijos metinio kiekio [13]. Plačiausias vandenilio panaudojimas pastebimas pramonės sektoriuje. Tarptautinės energetikos agentūros (IEA) statistiniais duomenimis iš viso apie 69 milijonai tonų vandenilio yra pagaminama kasmet pasauliniu mastu ir iš jų apie 90% yra naudojama cheminėje, naftos perdirbimo ir metalurgijos pramonėje. Daugiau nei 55% vandenilio panaudojama amoniako gamyboje, dar 30% vandenilio sunaudojama naftos perdirbimo gamyklose pašalinant sieros, azoto ir kitus teršalus iš galutinio produkto bei likę apie 5% metalų gamyboje. Tik mažiau nei 10% visame pasaulyje pagaminto vandenilio yra priskiriama transporto sektoriui. Kol kas vandenilio panaudojimas laivybos sektoriuje nėra įtrauktas į statistiką, nes nėra laivų kurie būtų varomi vandeniliu. Tik labai maža dalis vandenilio, vienetinais atvejais, yra panaudojama su vandens transportu susijusiuose demonstraciniuose, bandomuosiuose projektuose. Todėl yra numatoma

perspektyva atitinkamai padidinti vandenilio gamybos apimtis, kad būtų galima patenkinti vandenilinio kuro poreikį, siekiant vandenilio technologijų panaudojimo jūrų transporte.

Atsižvelgiant į augančią vandenilio paklausą pasaulyje yra pastebimas naujų vandenilio gamyklų statybų suaktyvėjimas ir padidėjęs gamybos technologinis galingumas. Remiantis Europos Sąjungos projektu „Horizontas 2020“, siekiant sukurti stiprų ir inovatyvų vandenilio energetikos sektorių, dedamos pastangos didinant švaraus, gryno vandenilio gamybą iš vandens, elektrolizės būdu. Danijoje, kompanija Everfuel gavo paramą didelės apimties, elektrolizės principu, 1000 MW vandenilio gamyklos statyboms, kur visas vandenilis bus skiriamas Danijos transporto sektoriui. Taip pat, Norvegijoje 2020 metais prasidės vandenilio gamyklos statybos ir bus užbaigtos iki 2023 metų. Ši gamykla, vandenilį gamins iš perteklinės hidroelektrinių pagamintos elektros energijos ir aprūpins regiono jūrų transporto sektoriaus poreikius. Tuo tarpu, Olandija svarsto galimybę statyti didžiausią pasaulyje vandenilio, gaminamo iš vėjo jėgainių pagamintos atsinaujinančios energijos, 250 MW, 45 tūkst. t per metus pajėgumo gamyklą [64]. 2020 metų pradžioje, iki šiol veikiančią didžiausią pasaulyje vandenilio gamyklą, 6 MW galingumo, elektrolizės būdu gaminančią vandenilį iš vėjo jėgainių atsinaujinančios elektros energijos, pranoko Japonijoje atidaryta 10 MW vandenilio gamykla iš saulės elektrinių pagamintos elektros energijos, kuri pagamintą kurą skirs transporto sektoriui. Šios elektrinės pajėgumas siekia 1000 tonų per metus [59]. Tačiau elektrolizės būdas gaminti vandeniliui nėra pats populiariausias ir rentabiliausias pasirinkimas šiomis dienomis. Pagal 2018 metų duomenis, elektrolizės būdu pagaminamas vandenilis sudaro tik 4% dalį viso pasaulyje pagaminto vandenilio, o taip yra dėl itin aukštos elektrolizatorių ir pačios elektros energijos kainos [57]. Visgi remiantis 2018 metais Tarptautinės atsinaujinančios energijos išteklių agentūros (IRENA) ataskaitoje pateikta statistika (žr. 3 pav.), daugiau nei 95% viso pasaulyje pagaminto vandenilio yra gaminama iš iškastinio kuro. Didžiausia dalis, net 48%, tenka vandenilio gamybai iš gamtinių dujų [57].



16 pav. Naudojami ištekliai vandenilio gamybai, pagal 2018 metų duomenis [57].

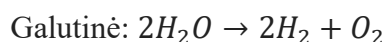
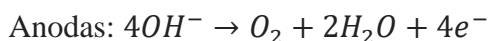
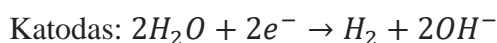
Garų metano reformingo (*angl. steam methane reforming – SMR*) gamybos būdas naudoja metano šaltinį kaip žaliavą, dažniausiai tai gamtinės dujos. Maždaug 700-1100 °C temperatūroje garas (H₂O) katalizatoriuje reaguoja su metanu (CH₄) ir pagal šią reakciją gaunamos sintetinės dujos: $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2$. Likęs anglies monoksidas yra surenkamas ir panaudojamas antroje reakcijoje, kai tiekiami vandens garai prie 350 °C temperatūros reaguoja su anglies monoksidu, deguonies atomai atskiriami nuo vandens garų ir oksiduojasi su anglimi papildomai išgaudami vandenilio dujas: $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$. Priklausomai nuo reikalavimų išgautas vandenilis gali būti papildomai išvalomas nuo priemaišų gaunant 99,99% produkto grynumą. Šiuo metu tokiu principu yra pagaminama beveik puse viso pasaulio produkcijos, o taip yra todėl, kad garų metano reformingas naudojant gamtines dujas yra rentabiliausias metodas ir pasiekia iki 80% efektyvumą [40]. Tačiau verta paminėti, kad naudojant iškastinį kurą vandenilio gamybai, produkto kaina tiesiogiai priklauso nuo gamtinių dujų rinkos kainos. Taip pat, gamtinės dujos nėra laikomos atsinaujinančiu šaltiniu ir laikui bėgant telkiniai išseks, o svarbiausia šis gamybos būdas yra labai taršus CO₂ atžvilgiu.

Sekantis panašus būdas yra dalinė oksidacija, naudojant anglį, likutines naftos frakcijas kaip žaliavą. Šis būdas nereikalauja naudoti katalizatoriaus. Žaliava yra išgarinama labai aukštose temperatūrose 1300-1500 °C ir paduodamas deguonis suformuoja anglies monoksidą (CO), anglies dioksidą (CO₂), vandenį (H₂O), vandenilį (H₂), metaną (CH₄), vandenilio sulfidą (H₂S). Dalis dujų proceso metu yra sudeginama šilumokaičiuose, kad išlaikyti reikiamą temperatūrą. Toks būdas taip pat išskiria didelį kiekį CO₂ gamybos proceso metu. Dėl papildomų reakcijos ir produkto išvalymo nuo priemaišų veikslių ir aukštesnės palaikomos temperatūros reaktoriuje, vandenilio gamybos efektyvumas siekia iki 70% ir visumoje yra brangesnis gamybos metodas negu lyginant su garų metano reformingu. Apie 30% viso pasaulio vandenilio produkcijos yra pagaminama naudojant likutinę naftą kaip žaliavą, o apie 18% - anglį [57].

Žiūrint iš atsinaujinančių išteklių perspektyvos vandenilis gali būti gaminamas iš biomasės naudojant termocheminį procesą tokį kaip garų reformingą, dujinimą. Biomasės išgarinama yra laikoma kaip vienas iš galimų švaraus, neteršėnčio aplinkos vandenilio gamybos būdų, kadangi gamybos metu nesusidaro CO_x emisijos, nes į reaktorių nėra paduodamas vanduo ar deguonis. Tačiau dėl neefektyvios žaliavos produkcijos gamybos nėra laikoma rentabiliu gamybos sprendimu lyginant su kitais metodais. Gaminant vandenilį iš biomasės yra išgaunamas ne tik vandenilis, bet ir likutiniai produktai, tokie kaip klijai, trašos, etanolis, įvairios rūgštys. Vandenilio gamybos efektyvumas neperkopia 50% ribos [42].

Pasauliui orientuojantis į atsinaujinančias švrios kilmės kuro gamybos technologijas, turbūt daugiausiai žadantis vandenilio gamybos būdas yra elektrolizė iš vandens. Apie 4 % viso pasaulio vandenilio yra pagaminama kasmet būtent šiuo būdu. Elektrolizė yra procesas, kurio metu nuolatine

srovė teka per du elektordus panardintus į vandenį, nutraukiant vandens molekulių cheminį ryšį, kas leidžia išgauti atskirus vandenilio ir deguonies elementus.



Elektrolizės procesas vyksta kambario temperatūroje ir laikomas švariausiu metodu vandenilio gamybos technologijose, nes viso proceso metu yra išskiriamas grynas vandenilis ir deguonis. Deguonis vėliau surenkamas ir panaudojamas kitose pramonės šakose. Šios technologijos energetinis efektyvumas siekia iki 60%. Tačiau šiam metodui reikia didelio kiekio elektros energijos. Šiomis dienomis didžiausias dėmesys yra sutelktas į vadinamą „žaliąjį vandenilį“. Tai elektrolizės būdų pagamintas vandenilis, kurio gamybos grandinėje pagaminta elektra tiekama iš atsinaujinančių šaltinių tokių kaip saulės ar vėjo. Tokiu būdu visoje vandenilio gamybos grandinėje nėra išskiriama CO₂ ar kitų toksiškų emisijų, tačiau palyginti su kitomis vandenilio gamybos technologijomis, šio pagaminto vandenilio kaina yra iki kelių kartų aukštesnė.

Žemiau pateiktoje lentelėje bendrai aptariami taikomų pagrindinių vandenilio gamybos metodų privalumai ir trūkumai.

5 lentelė. Vandenilio gamybos metodų apžvalga.

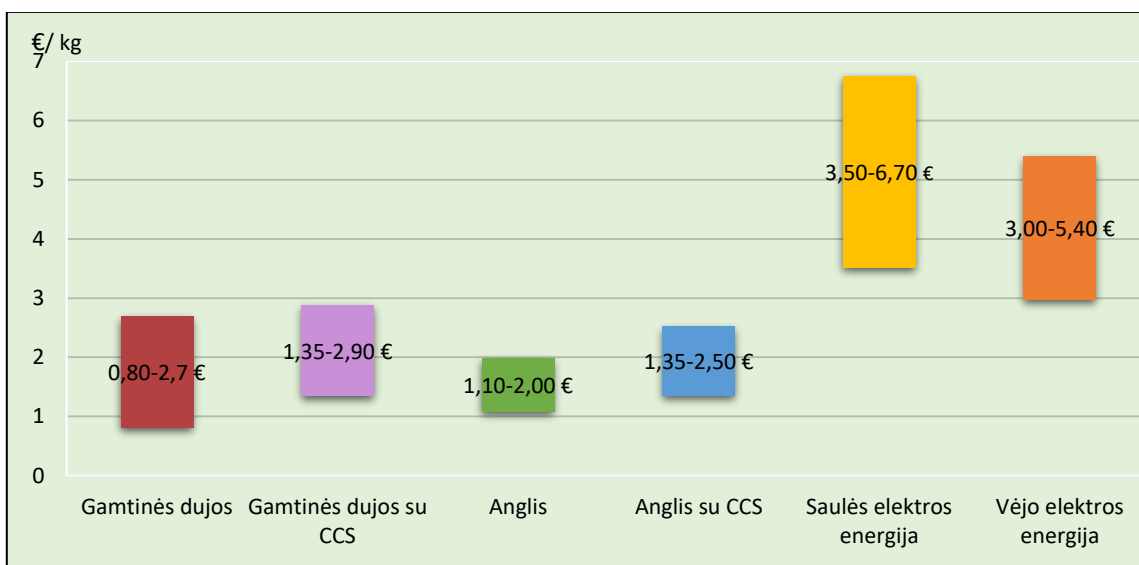
Taikomas metodas	Privalumai	Trūkumai
Garų gamtinių dujų reformingas	Žemiausia kaina, efektyvumas iki 80%.	Aukšta įrenginių pastatymo kaina, aukšta eksploataavimo ir aptarnavimo kaina, būtinas žaliavos apdorojimas, didelis kiekis CO ₂ .
Anglies arba naftos išgarinimas	Vidutinė kaina, efektyvumas iki 70%.	Aukštos eksploataavimo temperatūros, daugiau tarpinių procesų, didelis kiekis CO ₂ ir kitų teršalų.
Biomasės išgarinimas	Laikomas atsinaujinančiu šaltiniu, minimalus CO ₂ susidarymas.	Aukšta produkto kaina, aukšta reaktoriaus pastatymo kaina, nepakankami žaliavos rezervai.
Vandens elektrolizė	Atsinaujinantis šaltinis, naudojant saulės, vėjo energiją gamyba neišskiria emisijų.	Ypatingai aukšta produkto kaina, žemas efektyvumas iki 60%.

Atlikta vandenilio gamybos analizė parodo, kad efektyviausias vandenilio gamybos metodas yra garų metano reformingas iš gamtinių dujų, tačiau aplinkosauginiu požiūriu toks gamybos būdas

laikomas taršiausiu. Pagrindinis aspektas yra anglies monoksido CO, anglies dvideginio CO₂ ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų padidėjimas. Gaminant vandenilį garo metano reformingo būdu priklausomai nuo žaliavos kokybės, proceso metu yra išskiriama nuo 9 iki 12 tonų CO₂ pagaminant 1 toną vandenilio [81]. Vaizdžiai tariant, dabartiniu metu pagal pasaulinio vandenilio gamybos mastą, per metus yra išskiriama tiek pat anglies dvideginio CO₂ kiek išskiria visa Vokietija per tą patį laikotarpį. Todėl reikėtų atkreipti dėmesį, kad didinant vandenilio gamybos apimtį iš gamtinių dujų iki jūrų transporto suvartojimo masto, ženkliai padidėtų šiltnamio dujų emisijos, o tai šiuolaikinėje visuomenėje yra nepriimtina. Visgi, egzistuoja sprendimai siekiant sumažinti anglies dujų išsiskyrimą neprarandant gamybos efektyvumo. Tam yra naudojama pagalbinė anglies surinkimo ir saugojimo (*angl. carbon capture and storage – CCS*) sistema, kuri efektyviai sumažina anglies emisijas iki 90% [33]. Šiuo metu yra eksploatuojamos keturios didelio masto vandenilio gamyklos gaminančios vandenilį iš anglies ar metano šaltinių su sėkmingai įdiegtomis anglies surinkimo ir saugojimo sistemomis. Kaip pavyzdys, nuo 2000 metų Jungtinėse Amerikos Valstijose įsikūrusi gamykla pagamina 470 tūkstančių tonų per metus švaraus vandenilio iš rudosios anglies. Taip pat, dar viena JAV vandenilio gamykla pradėjo veiklą 2013 metais, kuri pagamina 180 tūkstančių tonų per dieną vandenilio iš gamtinių dujų naudojant garo metano reformingo principą. Tuo tarpu Kanadoje yra statomos dvi vandenilio gamyklos, kurių numatomas pajėgumas bus 87 tūkst. tonų ir 290 tūkst. tonų per metus. Viena gamykla gamins vandenilį iš gamtinių dujų, o kita iš asfalteno likutinio produkto naudojant išgarinimo (*angl. gasification*) metodą [33].

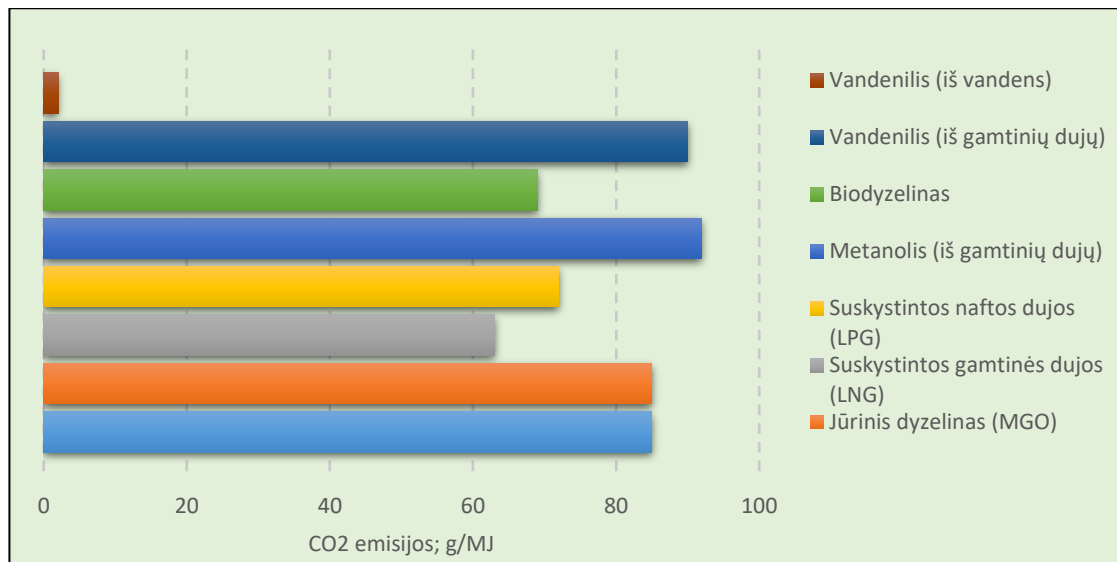
Naudojant pagalbines valymo sistemas tokias kaip anglies surinkimo ir saugojimo CCS, išauga galutinio produkto kaina, nes reikalingos papildomos investicijos tokios sistemos įdiegimui ir remontiniam aptarnavimui. Tačiau nereikėtų daryti išankstinių prielaidų, kad vandenilio gamyklos naudojančios CCS sistemą yra mažiau konkurencingos nei gamyklos be tokių sistemų. Remiantis vandenilio gamybos kainų palyginimu pagal skirtingų išteklių panaudojimą (žr. pav. 4), matomas nežymus kainų skirtumas tarp gamyklose pagaminto vandenilio iš gamtinių dujų su CCS sistema ir be. Labai panaši situacija ir tarp gamyklose pagaminto vandenilio iš anglies su CSS sistema ir be. Priešingai, kai kuriais atvejais gamyklos be CCS sistemos pagamina vandenilį aukštesne kaina negu gali pasiūlyti gamyklos su CCS sistema. Pagrindinė priežastis lemianti pagaminto produkto kainos padidėjimą gamyklose be CCS sistemos yra anglies mokestis. Šis mokestis nėra taikomas visose pasaulio valstybėse, tačiau didžioji dauguma industrinių šalių ir regionų taiko šį mokestį gamykloms, kurios viršija metines šiltnamio dujų emisijų normas. Šios normos ribos nustatomos kiekvienos šalies individualiu sprendimu. Pavyzdžiui, Kanada taiko anglies mokestį toms įmonėms, kurios per metus išmeta daugiau kaip 25 000 tonų CO₂, o tokio mokesčio kaina 2019 metais siekė 13,5 €/tCO₂. Europa naudoja kiek kitokį principą, sukūrė taršos leidimų prekybos sistemą. Kiekvienais metais gamykloms yra skiriamas nustatytas kiekis taršos leidimų vienetų, tačiau jis neviršija 50% ribos nuo bendro visos

europos išmetamų emisijų nustatyto kiekio. Metų gale įmonės privalo gražinti taršos leidimo vienetus. 1 taršos leidimas atitinka 1 toną CO₂, o tokio leidimo kaina 2019 metais siekė 20-25 €/tCO₂. Jei įmonei trūksta arba lieka leidimų, ji gali pirkti arba parduoti aukcione [82]. Šalys, taikydamos šiltnamio dujų taršos mokestį, siekia, kad įmonės investuotų į taršos mažinimo technologijas, o tos kurios neatras lėšų investicijoms, laikui bėgant taps nebe konkurencingomis, nes beveik kiekvienais metais mokesčio įkainis yra didinamas. Tik išskirtiniais atvejais, ten kur nėra taikomas taršos mokestis ir žaliavos rinkos kaina yra žema, vandenilio gamybos kaina gali siekti mažiau nei 1 €/kg. Vis dėlto sunkiausia rinkoje įsitvirtinti yra vandeniliui pagamintam elektrolizės būdu iš atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Pagal vandenilio gamybos kainų palyginimo diagramą (žr. 4 pav.), vandenilio gamybos kaina naudojant vėjo elektrinių elektros energiją, priklausomai nuo regiono, svyruoja nuo 3,0 – 5,4 €/kg, o naudojant saulės elektrinių elektros energiją kaina gali siekti 3,5 – 6,7 €/kg. Remiantis 2018 metais Tarptautinės atsinaujinančios energijos išteklių agentūros (IRENA) ataskaitos informacija, vandenilis pagamintas iš atsinaujinančios elektros energijos šaltinio būtų konkurencingas rinkoje, jei pasiektų 2,35 €/kg gamybos kainos lygį [57].



17 pav. Vandenilio gamybos kainų palyginimas naudojant skirtingus išteklius pagal 2018 metų duomenis [40;2].

Vandenilis yra pripažįstamas kaip švarios kilmės kuras, tačiau jis taip pat gali būti labai taršus anglies dvideginio (CO₂) atžvilgiu, priklausomai nuo to, koku būdu vandenilis yra gaminamas. Vandenilio gamyba iš gamtinių dujų, anglies ar naftos išskiria proceso metu didelį kiekį CO₂ dujų, tačiau vandenilio gavyba iš vandens elektrolizės būdu praktiškai neišskiria šių šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Žemiau pateiktame grafike yra vertinamas jūrų transporte naudojamų skirtingų kuro rūšių gyvavimo ciklo (nuo gamybos iki transportavimo į laivą (*angl. well-to-tank*) bendras CO₂ išsiskyrimas.



18 pav. Skirtingo kuro CO₂ emisijų vertinimas pagal gyvavimo ciklą (*angl. well-to-tank*) laivyboje [14].

Matome, kad švariausiu laikomas kuras yra vandenilis, kuris gaminamas elektrolizės būdu iš vandens, įvertinta, kad elektros energija vandenilio gamybai yra gaunama iš atsinaujinančių saulės, vėjo ir kitų šaltinių. Labai nedidelė dalis CO₂ šiame gyvavimo cikle yra išskiriama transportavimo metu, kadangi naudojami kroviniai automobiliai, vamzdiniai. Kitu atveju, kai vandenilis išgaunamas iš metano šaltinio (gamtinių dujų) be papildomos anglies dioksido sugavimo ir saugojimo sistemos CCS arba garo reformingo (išgarinimo) proceso metu potencialiai išsiskiria daugiau CO₂ gyvavimo ciklo metu nei lyginant su mazutu ar dyzelino distilatais.

Žvelgiant į ateitį, siekiant mažinti teršalų išmetamumą į aplinką jūrų transporto sektoriuje vandenilis kaip atsinaujinantis energijos šaltinis būtų tinkamiausias pasirinkimas. Išanalizavus gamybos metodų efektyvumą, taršos aspektus ir pagaminto vandenilio kainą, galime teigti, kad vandenilio gamyba garo metano reformingo būdu iš gamtinių dujų šiuo metu yra rentabiliausias gamybos metodas, gamybos kaina siekia 0,80 – 2,70 €/kg H₂, tačiau ateityje kaina turėtų praporingai augti dėl pasaulyje griežtėjančių CO₂ emisijų taršos mokesčių taikomų gamykloms. Taip pat, šis metodas yra neefektyviausias pagal aplinkosauginius rodiklius, kadangi išsiskiria nuo 9 iki 12 tonų CO₂ emisijų. Rezultate toks gamybos metodas nėra priimtinas siekiant pritaikyti jūrų transporto sektoriuje, nes gyvavimo ciklo metu išskiriama daugiau CO₂ nei lyginant su dyzelinu ar kitu iškastiniu kuru. Tarpinis variantas pagal rentabilumą ir aplinksauginį aspektą būtų vandenilio gamyba garo metano reformingo būdu iš gamtinių dujų su anglies surinkimo ir saugojimo sistema CCS, gamybos kaina siekia 1,35 – 2,90 €/kg H₂, arba išgarinimo metodu iš anglies ar naftos produktų su CCS sistema, gamybos kaina siekia 1,35 – 2,50 €/kg H₂, o aplinkosauginiu požiūriu abiem atvejais anglies surinkimo ir saugojimo sistema sumažina iki 90% CO₂ emisijų gamybos procese, todėl pradiniam etape, pereinamuoju laikotarpiu tokia vandenilio gamyba būtų priimtina. Visgi iš aplinkosauginės

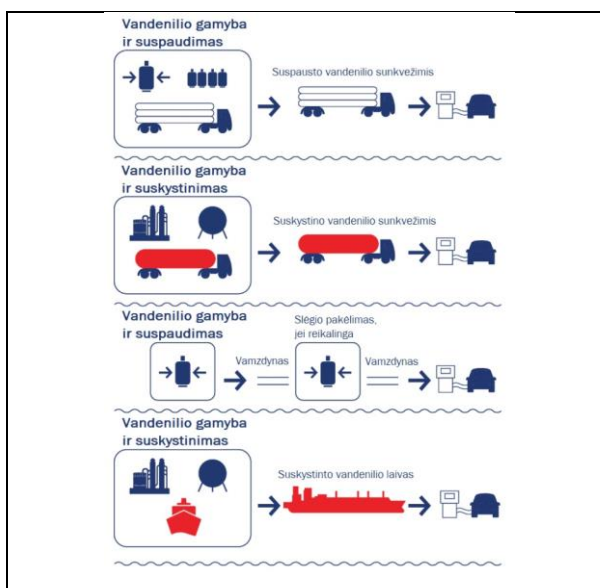
pusės, pats patraukliausias variantas būtų vandenilio gamyba elektrolizės būdu naudojant iš atsinaujinančių šaltinių pagamintą elektros energiją, nes gamybos proceso metu nėra išskiriamos šiltnamio dujų emisijos. Tačiau vertinant rentabilumo aspektu, vandenilio gamybos kaina yra aukščiausia iš visų analizuotų gamybos būdų ir siekia 3,0 – 6,7 €/kg, prognozuojama, kad dėl tobulėjančios elektrolizatorių technologijos bei augančios paklausos žaliojo vandenilio kaina nukris iki konkurencingos 2,35 €/kg ribos. Ateities perspektyvoje, siekiant padidinti vandenilio gamybos apimtį iki jūrų transporto sektoriaus suvartojimo, vertėtų orientuotis į vandenilio gamybą elektrolizės būdu naudojant atsinaujinančios elektros energiją.

3.2. VANDENILIO TRANSPORTAVIMO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ

Vandenilio transportavimas yra svarbus tiekimo grandinės elementas. Transportuoti vandenilį galima trimis būdais – vamzdynais, krovinių automobiliais ar laivais suskystinus ar suspaudus vandenilio dujas. Vamzdynais vandenilis transportuojamas panašiai kaip ir gamtinės dujos, suslėgtos prie aukšto 20-200 barų slėgio priklausomai nuo vamzdžių diametro, kad padidinti transportavimo našumą, tačiau toks transportavimo būdas labai brangus, nes reikalingos didelės investicijos vamzdynams įrengti ir prižiūrėti. Šis transportavimo būdas ekonomiškai naudingas tik tada, kai produktas transportuojamas ilgomis distancijomis ir dideliais kiekiais. Remiantis Europos vandenilio asociacijos paskaičiavimais pasaulinis vandenilio vamzdynų tinklas siekia beveik 5000 kilometrų. Didžiausią dalį šio tinklo sudaro atskiros vamzdynų linijos tarp vandenilio gamintojų ir stambių vartotojų tokių kaip naftos perdirbimo įmonės. Palyginimui, pasaulinį gamtinių dujų vamzdynų tinklą sudaro 1,2 milijonai kilometrų [40]. Kadangi vandenilio vamzdynams įrengti reikalingas milžiniškas finansavimas iš valstybės tiek ir iš privataus sektoriaus, o tokį susitarimą neretai pasiekti būna sudėtinga, todėl yra svarstomos galimybės išnaudoti jau esamą gamtinių dujų vamzdynų tinklą vandenilio transportavimui ankstyvoje vandenilio infrastruktūros stadijoje. Teoriškai vandenilio dujas sumaišius su gamtinėmis dujomis, maksimaliai iki 20% pagal tūrį, saugiai galima transportuoti gamtinių dujų vamzdynų tinklu be papildomų vamzdžių modifikacijų. Tačiau toks transportavimo metodas padidintų galutinio produkto kainą, nes būtų reikalingos papildomos investicijos įdiegiant vandenilio įpurškimo į vamzdynų sistemą stotis, taip pat ir įdiegiant separavimo stotis, kad atskirti vandenilį nuo gamtinių dujų. Skaičiuojama, kad taikant tokį vandenilio transportavimo būdą, vandenilio transportavimo kaštai svyruotų nuo 0,14 €/kg iki 0,26 €/kg per 100 km [22]. Transportuoti gryną vandenilį gamtinių dujų vamzdynais, neatliekant vamzdynų modifikacijos, negalima dėl saugumo aspektų. Vandenilis tiesiogiai kontaktuodamas su plieniu įsiskverbia į lydinį ir susijungia su anglies atomais sudarydamas metano poras, kurios progresuodamos pasireiškia plieno įtrūkimais. Dėl šio reiškinio transportuojant gryną vandenilį gamtinių dujų vamzdynais, vamzdžiuose atsiranda

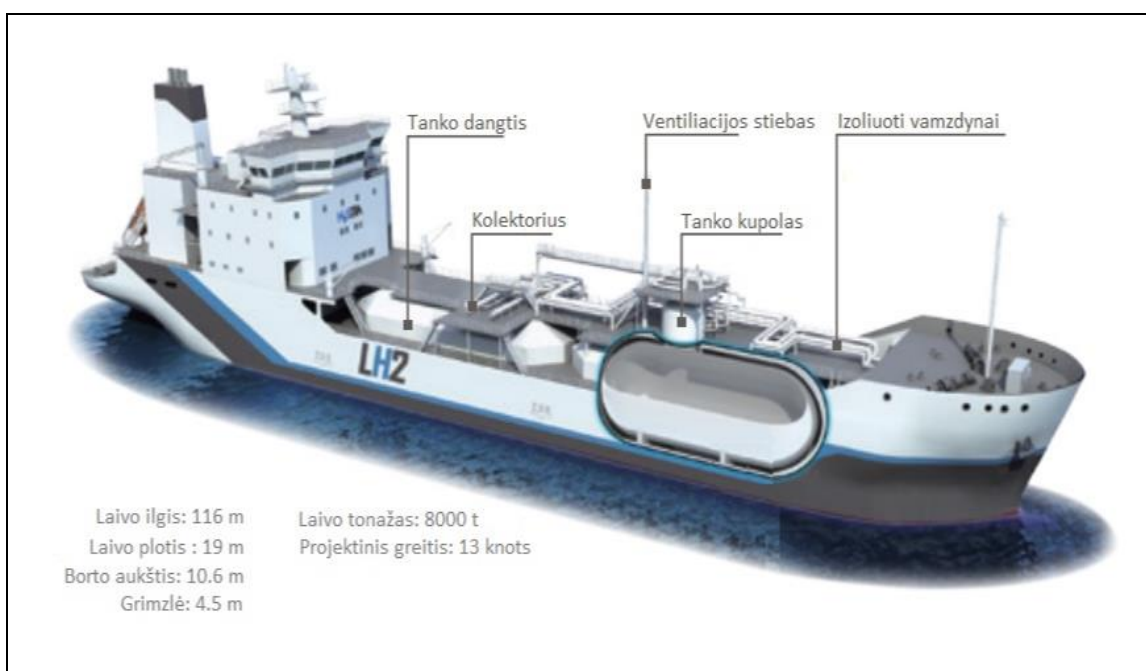
plyšiai pro kuriuos įvyksta produkto nutekėjimas į atmosferą. Tam, kad išvengti vandenilio sąveikos su vamzdyno plienine sienele, galima galvanizuoti vamzdyno sienelės vidinį paviršių, tačiau reikėtų įvertinti, kad šiame etape atsiranda papildomos išlaidos pritaikant esamą gamtinių dujų vamzdynų sistemą vandenilio transportavimui [80].

Ekonomiškesnis vandenilio transportavimo būdas nedideliais kiekiais yra kroviniais automobiliais. Krovininiais automobiliais vandenilį transportuoti galima dujiniame arba suskystintame pavidale. Dujiniame pavidale vandenilio transportavimas galimas sunkvežimių cisternas užpildant suspaustomis iki 200 barų arba iki 500 barų slėgio vandenilio dujomis. 200 barų sistemos cisternos paprastai būna sudarytos iš keletos horizontaliai vienas ant kito sukrautų, per visą priekabos ilgį, slėginių indų. Priklausomai nuo priekabos konstrukcijos ir gamintojo, į priekaba galima pakrauti apie 400-700 kg vandenilio. 500 barų sistemos priekabos konstrukcija sudėtingesnė, priklausomai nuo gamintojo, priekaboje vertikalčiai yra išdėstyti apie 70-90 vienetų 50 litrų slėginių indų. Tokioje priekaboje įprastai telpa apie 1100 kg vandenilio krovinio, o jo pilnas iškrovimas trunka mažiau nei valandą [73]. Transportavimo kaštai svyruoja nuo 0,50 €/kg iki 0,60 €/kg per 100 km [22]. Suskystintas vandenilis, žemiau virimo temperatūros -253°C , yra transportuojamas krovininiais automobiliais kriogeninėse cisternose. Cisterną gaubianti izoliacija padeda išlaikyti žemą temperatūrą cisternos viduje ir neleidžia aplinkos šilumai petekti į vidų. Toks pilnai pakrautas krovininis automobilis, priklausomai nuo gamintojo, gali pervežti iki 3500 kg vandenilio. Taikant šį transportavimo metodą transportavimo kaštai siekia 0,15 – 0,16 €/kg per 100 km [22]. Paprastai, suskystinto vandenilio transportavimo būdas maršrutui iki 4000 km yra ekonomiškesnis nei lyginant su transportavimu slėginiuose induose. Tačiau jei vidutiniškai kelionės maršrutas užtrunka ilgiau, nei kad įveikiant 4000 km atstumą, tada krovinys nebeišlaiko savo pirminės temperatūros ir sparčiai pradeda garuoti (pereitį į dujinį pavidalą), sukeldamas slėgio pakilimą cisternoje [73].



19 pav. Vandenilio transportavimo metodai.

Didėjant pasaulinei vandenilinio kuro paklausai atsirastu poreikis vandenilį transportuoti vandenynais ir jūromis. Tai būtų galima užtikrinti vandenilį transportuojant laivais – vandenilio transporteriais. Tokie laivai savo konstrukcija labai panašūs į suskystintų gamtinių dujų (toliau SGD) transporterius, neretai yra projektuojami su vienu ar keliais krovininiais tankais. Vandenilio transporteriai lyginant su SGD transporteriais pasižymi sudėtingesne ir geriau izoliuota krovininių tankų konstrukcija dėl suskystinto vandenilio žemesnės temperatūros (-253°C) nei SGD (-162°C). Atlikti moksliniai tyrimai parodė, kad ekonomiškiausias vandenilio gabenimas laivais yra suskystintame pavidale dėl vandenilio didesnio tūrio ir tankio santykio. Įvertinti suskystinto vandenilio transportavimo kaštus yra sudėtinga, nes pasaulyje nėra vandenilio transporterių, kuriais galima būtų remtis, o mokslinių tyrimų metodika yra pasenusi ir neatitinka dabartinių kriterijų, tačiau suskystinto vandenilio transportavimo kaštai neturėtų ženkliai skirtis nuo SGD transportavimo kaštų. Iki 2019 m. gruodžio mėnesio pasaulyje nebuvo eksploatuojamų vandenilio transportinių laivų, tačiau situacija greitai metu pasikeis. Kompanija „Kawasaki Heavy Industries, Ltd“ Japonijoje nuleido ant vandens pirmąjį suskystinto vandenilio transporterį, tikimasi, kad laivo statybos bus užbaigtos iki 2020 metų galo. Laivas, pavadinimu „Suiso Frontier“, turės vieną, 1250 m³, nerūdyjančio plieno, dvigubos sienelės, izoliuotą vakuumu, krovininį tanką, kuriame bus gabenamas suskystintas vandenilis iš Australijos vandenilio gamyklos į Japonijos Kobės uostą. Vieno reiso distancija sieks iki 9000 km, o tai sudaro apie 16 kelionės dienų prie laivo 13 mazgų projekcinio greičio. Transporteris apytiksliai pajėgs pasikrauti 88 t suskystinto vandenilio, o paskaičiuoti krovinio nugaravimo nuostoliai per dieną sieks iki 0,2 % nuo tūrio. Svarbu paminėti, kad laivo jėgainė bus aprūpinama dyzelinu ir nebus susieta su nugaravusio (boil-off) vandenilio dujų panaudojimu [44].



20 pav. Vandenilio transporteris „Suiso Frontier“.

Atsiradus vandenilio paklausai jūrų transporto sektoriuje, laivų užpildymas vandeniliu yra galimas terminaluose, su bunkeravimo laivais arba kroviniais automobiliais. Šiuo metu vandenilio terminalų pasaulyje nėra, nes nėra laivų vartojančių vandenilį. Todėl ten, kur nėra tinkamos infrastruktūros, laivų aptarnavimas numatomas nuo krantinės panaudojant suskystinto vandenilio kroviniais automobiliais. Kroviniais automobiliais patogiu ir ekonomiškai pervežti nedidelius kiekius vandenilio ir tokia sistema taikoma aptarnaujant vandenilio degalines ir kitas pramonės šakas vandenilį pervežant iš gamybos vietos. Praktiškai tokia pati sunkvežimių sistema naudojama bunkeruojant laivus suskystintomis gamtinėmis dujomis. Kompanija Linde Gas vykdo vandenilio transportavimą sunkvežimiais ir gali pasiūlyti tiek suslėgto tiek suskystinto vandenilio bunkeravimo paslaugas [73]. Numatomi pirmieji klientai pasinaudosiantys Linde Gas paslauga, tai Europos Sąjungos projekto finansuojami vandeniliniai keltai „Flagships“, kurie bus eksploatuojami Prancūzijos ir Norvegijos regionuose. Pasak projekto autorių, kadangi kol kas nėra bunkeravimo stočių Prancūzijos ir Norvegijos regionuose, vandenilinis kuras bus gabenamas tiesiai iš Vokietijos [28]. Kompanija Moss Maritime kartu su partneriais, remiami Norvegijos vyriausybės, sukūrė 9000 m³ suskystinto vandenilio bunkeravimo laivo projektą, kuris tiektų prekybinių laivų bunkeravimo paslaugas. Pasak projekto autorių, šiuo metu toks laivas rinkoje nereikalingas, tačiau vos tik vandenilio rinka išaugs, bunkeravimo laivo projektas bus įgyvendintas.

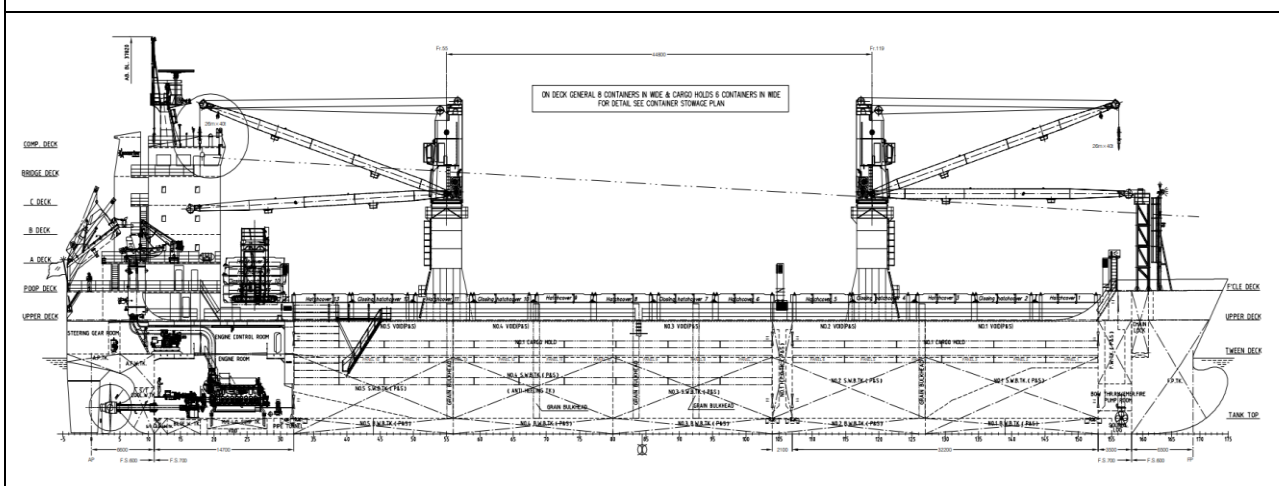
Vandenilio tiekimo grandinės rentabilumas priklauso nuo tikslingai pasirinkto vandenilio transportavimo metodo. Mažiems produkto kiekiams ir trumpiems atstumams transportuoti paprastai ekonomiškiausia naudoti pervežimą kroviniais automobiliais, tačiau jei kiekiai dideli ir ilgalaikiai, vertėtų apsvarstyti transportavimą vamzdynais. Didėjant vandenilio paklausai ir plečiantis infrastruktūrai, ypač tiekiant vandenilį į terminalus laivams, vandenilio transportavimas vamzdynais būtų perspektyviausias transportavimo būdas, įmaišant vandenilį į esamą suskystintų gamtinių dujų vamzdynų tinklą, taip būtų išvengiama aukšta vamzdynų įrengimų Capex kaina.

4. VANDENILIO TECHNOLOGIJOS PRITAIKYMO LAIVE ESKIZINIS SPRENDIMAS

4.1. VANDENILIO KURO ELEMENTŲ LAIVO JĖGAINĖS ANALIZĖ

Nyderlandų kompanijai „Noordriver Shipping“ priklausantis generalinių krovinių laivas, pavadinimu „LIEKE“, buvo pasirinktas modernizacijos eskiziniame sprendime įgyvendinti. Tyrimo tikslas – teoriniame lygmenyje pritaikyti vandenilio technologijas laivo jėgainės energijos poreikiui užtikrinti, naudojant vandenilinį kurą ir palyginti laivo eksploatacinius rodiklius. Kadangi šiame darbe buvo minima vandenilio technologijų pažanga ir pritaikymas naujos statybos, trumpais atstumais eksploatuojamų, Ro-Ro ir kituose keleiviniuose laivuose, bet nebuvo apžvelgti vandenilio

technologijas naudojantys prekybinio laivyno projektai, nuspręsta pasirinkti generalinių krovinių laivą įgyvendinant tyrimo tikslą.



21 pav. Laivas „LIEKE“.

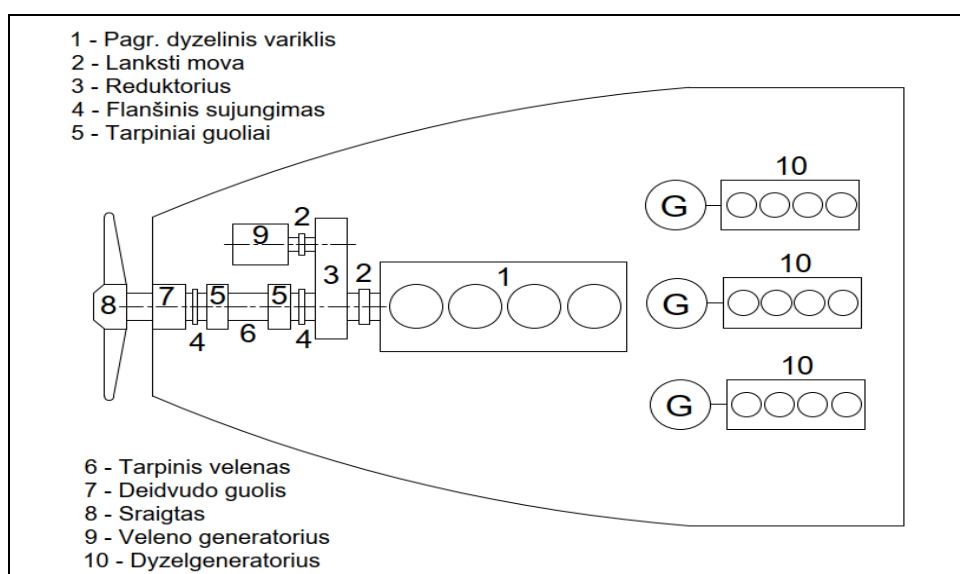
6 lentelė. Laivo pagrindiniai duomenys.

Objektas	Duomenys
Laivo pavadinimas	LIEKE
Pastatymo metai	2011
Laivo vėliava	Olandijos
Klasifikacinė bendrovė	Bureau Veritas
IMO numeris	9591820
Laivo ilgis (LOA)	122,20 m

6 lentelės tęsinys.

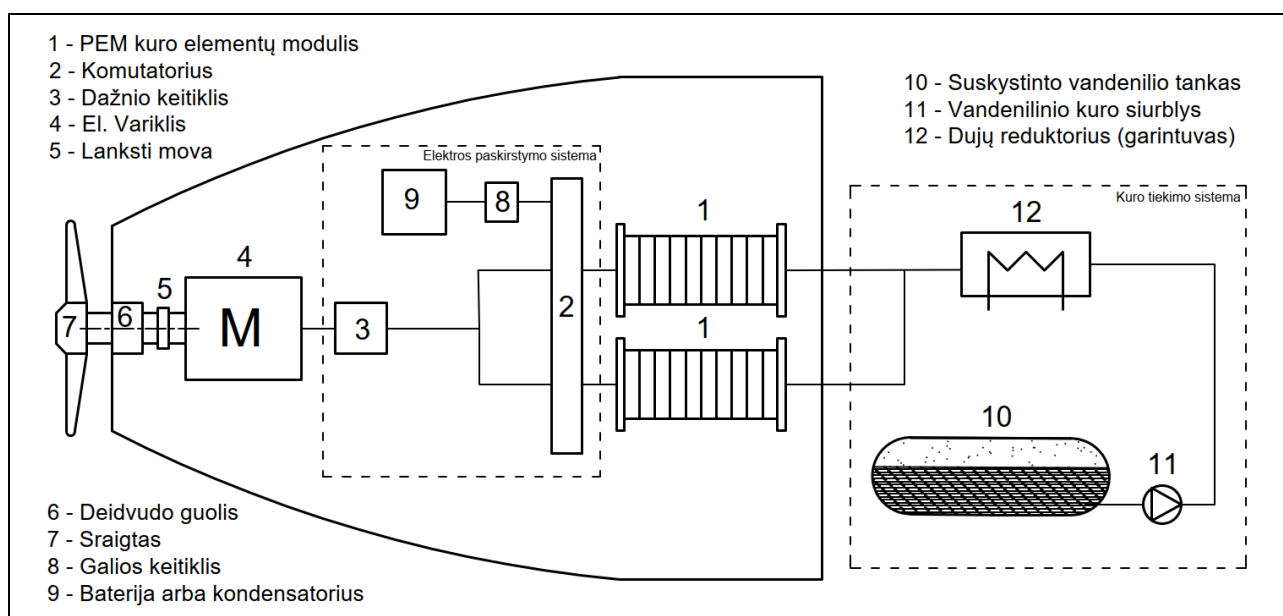
Laivo plotis	19,80 m
Borto aukštis	10,70 m
Grimzlė	7,20 m
Krovininis triumas nr. 1	4942 m ³ (32,2x15,3x11,0 m)
Krovininis triumas nr. 2	8332 m ³ (50,4x15,3x11,0 m)
Pagrindinis variklis	Hyundai 8H32/40P 4000 kW 750 rpm
3x Dyzelgeneratoriai	300 kW (kiekvienas)
1x Veleno generatorius	350 kW
Pavairavimo mechanizmas	350 kW
Laivo greitis (85%)	14 mazgų
Atstumas (85%)	10000 jūrmylių
Kuro tankai (HFO)	640 m ³

Siekiant detaliau išanalizuoti kuro elementų laivo jėgainės skirtumus nuo tradicinės vidaus degimo variklių laivo jėgainės, yra atliekamas palyginimas eskiziniame lygmenyje. Žemiau esančiame paveikslėlyje yra pateikta dyzelinės laivo jėgainės schema, dėl supaprastinimo aspektų pagalbinės kuro, tepimo, aušinimo, paleidimo sistemos nėra aptariamoms. Esama laivo „Lieke“ jėgainė susideda iš propulsinio komplekso, 3 dyzelgeneratorių ir veleno generatoriaus. Propulsijos kompleksas susideda iš pagrindinio variklio, reduktoriaus, velenų linijos, sraigto. Analizuojamo laivo propulsijos kompleksas yra sudėtingesnis nei vandenilio propulsijos kompleksas, kadangi yra ilgesnė veleno linija, sudaryta iš iriamojo ir tarpinio veleno, kuriai reikalingi tarpiniai guoliai, reduktorius ir jungiamieji elementai – lanksčios movos.



22 pav. Dyzelinės laivo jėgainės schema.

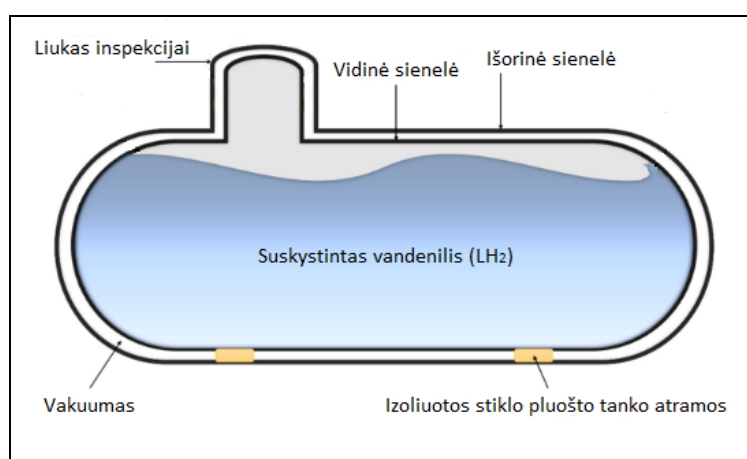
Konvertuojant laivo jėgainę eksploatacijai vandeniliu, šių agregatų skaičius sumažėtų arba iš vis būtų atsisakyta. Vandenilio kuro elementų laivo jėgainė pagrinde sudaryta iš kuro elementų, o propulsijos kompleksą sudaro elektros variklis, veleno linija ir sraigtas. Kadangi propulsijos elektros variklis turi platų apskukų diapazoną, jam nereikalingas reduktorius. Taip pat sutrumpėja veleno linija, nėra tarpinio veleno ir guolių, visumoje sumažėja movų ir flanšinių sujungimų skaičius. Dėl šių pakitimų mašinų skyrius yra kompaktiškesnis, ženkliai sumažėja vibracija ir triukšmas. Žvelgiant iš elektrinės pusės, vandenilio laivo jėgainė yra sudėtingesnė, reikalingas dažnio keitiklis, kuris užtikrina elektros variklio apsisukimų reguliavimą, taip pat atsiranda papildomas agregatas super kondensatorius arba baterija, kurie kaupia perteklinę elektros energiją. Vandenilio kuro tiekimo sistema susideda iš vandenilio kuro tanko, kriogeninių temperatūrų siurblio ir dujų reduktoriaus – garintuvo, kuris reikalingas suskystintą vandenilį paversti į dujas.



23 pav. Kuro elementų laivo jėgainės schema.

Racionaliausi vandenilio sandėliavimo būdai jūrų transporte yra suspaustame arba suskystintame būvyje. Vandenilis turi labai mažą tankį tiek dujiniame, tiek skystame pavidale. Dujiniame pavidale vandenilio tankis siekia $0,09 \text{ kg/m}^3$ prie 20°C ir 1 bar slėgio, tokiomis sąlygomis 1 kg vandenilio dujų sudaro 11 m^3 tūrio. Tankis gali būti padidintas iki $70,8 \text{ kg/m}^3$ kai vandenilis yra suskystinamas iki virimo temperatūros -253°C tačiau net ir tokiomis sąlygomis tokio pačio kiekio vandenilinis kuras užimtų 11 kartų daugiau vietos lyginant su dyzelinu. Naudojant suspaudimo būdą, vandenilis nepasiekia tokių gerų rezultatų kaip suskystintas, tačiau suspaudus vandenilį iki 700 bar slėgio, jo tankis padidėja iki 36 kg/m^3 (20 kartų mažesnis nei benzino) [41]. Komerciniuose laivuose daugiausia dėmesio yra skiriama kriogeniniams suskystinto vandenilio tankams, dėl galimybės talpinti beveik dvigubai didesnę vandenilio kiekį lyginant su slėginiais tankais. Dabartinėje, pradinėje

vandenilio laivyno vystymosi stadijoje, suskystinto vandenilio tankai yra gaminami, santikinei mažos talpos, cilindrinės formos „IMO type C“ tipo. Tokio tipo tankai užtikrina konstrukcijos stiprumą ir sumažina įtrūkimų susidarymą, sėkmingai atlaiko tanko konstrukcijos susitraukimą-išsiplėtimą, atsirandantį dėl temperatūrų pokyčių užpildymo-išpylimo metu. Taip pat, šio tipo tankai nėra tiesiogiai susiję su laivo korpusu, tankai pastatomi ant lanksčių, amortizuojančių atramų, taip išvengiant greitesnio laivo korpuso nuovargio ir įtrūkimų, atsirandančio būtent dėl ankščiau minėtos temperatūrinės deformacijos. Dažnu atveju, „C“ tipo tankai naudojami laivuose, kaip kuro tankai arba kaip transportiniai tankai suskystinto vandenilio pervežimui, bunkeravimui mažesniais kiekiais. Šiuo metu didžiausias pasaulyje, 1250 m³, „C“ tipo suskystinto vandenilio tankas, skirtas pervežti vandenilį, yra gaminamas kompanijos „Kawasaki Heavy Industries“ gamykloje, kuris bus sumontuotas pirmajame pasaulyje suskystinto vandenilio transporteryje. Efektyviausiais ir patikimiausiais tankais laikomi „B“ tipo, sferos formos. Šie tankai naudojami suskystinto vandenilio sandėliavimui sausumoje, taip pat ir pervežimui jūromis vandenilio transporteriuose. Tokios formos tankas leidžia tolygiai pasiskirstyti paviršiaus įtempiams, sumažindamas įtrūkimų ar tanko lūžimo riziką. Taip pat vidinio paviršiaus sąlyčio plotas su suskystintu vandeniliu yra pats mažiausias iš galimų geometrinių formų, o tai sumažina nugaravimo nuostolius. Šiuo metu didžiausi pasaulyje sferiniai suskystinto vandenilio tankai, kurie eksploatuojami jau daugiau kaip 30 metų yra naudojami JAV ir Japonijos kosmoso tyrimų agentūrose, 3200 m³ ir 540 m³ atitinkamai. Tačiau laivyboje eksploatuojamų sferinių suskystinto vandenilio tankų kol kas nėra, nes nėra rinkoje poreikio didelės apimties suskystinto vandenilio tarpžemyniniams pervežimams. Tačiau kompanija „Kawasaki Heavy Industries“ yra parengusi 160 000 m³ suskystinto vandenilio transporterio projektą ir ateityje, kai pasaulinė vandenilio infrastruktūra atitinkamai išaugs, projektas bus realizuotas [71].



24 pav. Suskystinto vandenilio „IMO Type C“ tanko schema.

Daugumos suskystinto vandenilio tankų konstrukcija yra panaši ir ne daug kuo skiriasi nuo suskystintų gamtinių dujų tankų konstrukcijos. Esminis skirtumas tai, kad suskystinto vandenilio

tankas turi atlaikyti daugiau kaip -253°C žemesnę temperatūrą, o SGD -162°C , todėl tai priveda prie tanko izoliacijos pokyčių. Suskystinto vandenilio tankai yra gaminami dvigubų plieno sienelių, tarp kurių yra šiluminė izoliacija, kuri dažniausiai susideda iš aliuminio, silicio ar perlito dalelių ir vakuomo, kad sumažinti šiluminius nuostolius, kurie priveda prie produkto nugaravimo. Tankuose įmontuotas apsauginis vožtuvas išleidžia nugaravusį vandenilį iš tanko, taip apsaugodamas tanką nuo galimo pavojingo slėgio susidarymo. Vandenilio nugaravimas priklauso nuo tanko dydžio, formos ir izoliacijos. Nugaravimo praradimai gali svyruoti nuo 0,1% iki 2% per dieną. Skaičiuojama, kad dienos nuostoliai 100 m^3 tanke siekia apie 0,2%, o didėjant tūriui, nugaravimo nuostoliai atitinkamai mažėja.

Šiame eskiziniame sprendime numatomas suskystinto vandenilio kuro tankas bus „ISO Type C“ tipo, o jo instaliacijos vieta – triume. Tačiau prieš parenkant vandenilio kuro tanką, reikia įvertinti kokios talpos turėtų būti tankas, kad užtikrintų suprojektuotą laivo plaukiojimo atstumą. Vertinimas atliekamas remiantis preliminariais skaičiavimais.

Remiantis laivo pagrindiniais duomenimis, apskaičiuojamas maksimalus mazuto kiekis, tonomis:

$$M_{HFO} = V_{HFO} \cdot t_{HFO} = 640 \cdot 0,87 = 556,8\text{ t} \quad (5)$$

čia,

M_{HFO} – mazuto masė, t;

V_{HFO} – mazuto tankų tūris, m^3 ;

t_{HFO} – mazuto tankis, kg/m^3 ;

Apskaičiuojame koks vandenilio kiekis atitinka maksimalų mazuto kiekį remiantis kuro šilumingumo parametrais:

$$M_{H_2} = \frac{M_{HFO}}{\frac{Hu_{H_2}}{Hu_{HFO}}} = \frac{556,8}{\frac{120}{42,5}} = 197,2\text{ t} \quad (6)$$

čia,

M_{H_2} – vandenilio masė, t;

Hu_{H_2} – vandenilio šilumingumas, MJ/kg;

Hu_{HFO} – mazuto šilumingumas, MJ/kg;

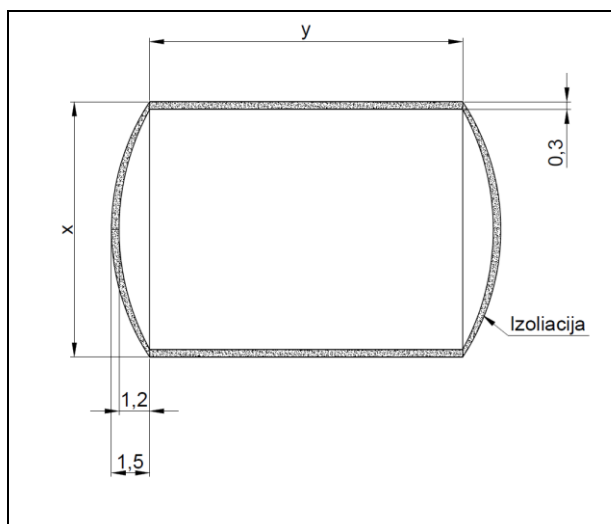
Apskaičiuojame suskystinto vandenilio tūrį pagal gautą vandenilio masę:

$$V_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{t_{H_2}} = \frac{197,2}{0,0708} = 2785,3\text{ m}^3 \quad (7)$$

čia,

V_{H_2} – vandenilio tūris, m^3 ;

t_{H_2} – vandenilio tankis prie -253°C , kg/m^3 ;



25 pav. „ISO Type C“ vandenilio tankas.

„ISO Type C“ suskystinto vandenilio kuro tanko užimamo tūrio triume skaičiavimai, remiantis suskystinto vandenilio kiekio tūriu. Projektuojama, kad kuro tankas bus pastatytas laivapriekio triume lygegreciai diametraliniai plokštumai ir bus nepriklausomas nuo laivo korpuso, siekiant užkirsti kelią laivo korpuso galimiems įtrūkimams, dėl kuro tanko susitraukimo-išsiplėtimo, atsirandančio dėl temperatūros pokyčių tanko užpildymo-išleidimo metu. Kadangi triumo plotis yra 15,3 m, kuro tanko laikančiajai konstrukcijai iš šonų paliekami po 0,4 m tarpai, tad pačio kuro tanko maksimalus galimas plotis $x=14,5$ m. Priimant sąlygą, kad maksimaliai triumo vietos kuro tankui galime skirti apie 20%, maksimalus galimas kuro tanko ilgis $y=16,5$ m. Remiantis 23 pav. kuro tanko brėžiniu, apskaičiuojame kiek vandenilio talpins projektuojamas kuro tankas. Vidinio tanko tūrio skaičiavimai atliekami dviem etapais, cilindrinės dalies tūrio skaičiavimas ir sferoidinės dalies tūrio skaičiavimas.

Cilindrinės dalies tūrio skaičiavimas atliekamas panaudojant cilindro tūrio formulę:

$$V_c = \pi R^2 H = 3,14 \cdot 6,95^2 \cdot 13,50 = 2047,54 \text{ m}^3$$

$$R = \frac{x}{2} - 0,3;$$

$$H = y - 1,5 \cdot 2; \quad (8)$$

čia,

R – cilindro spindulys, m;

H – cilindro ilgis, m;

Sferoidinės dalies tūrio skaičiavimas atliekamas panaudojant sferoido tūrio formulę:

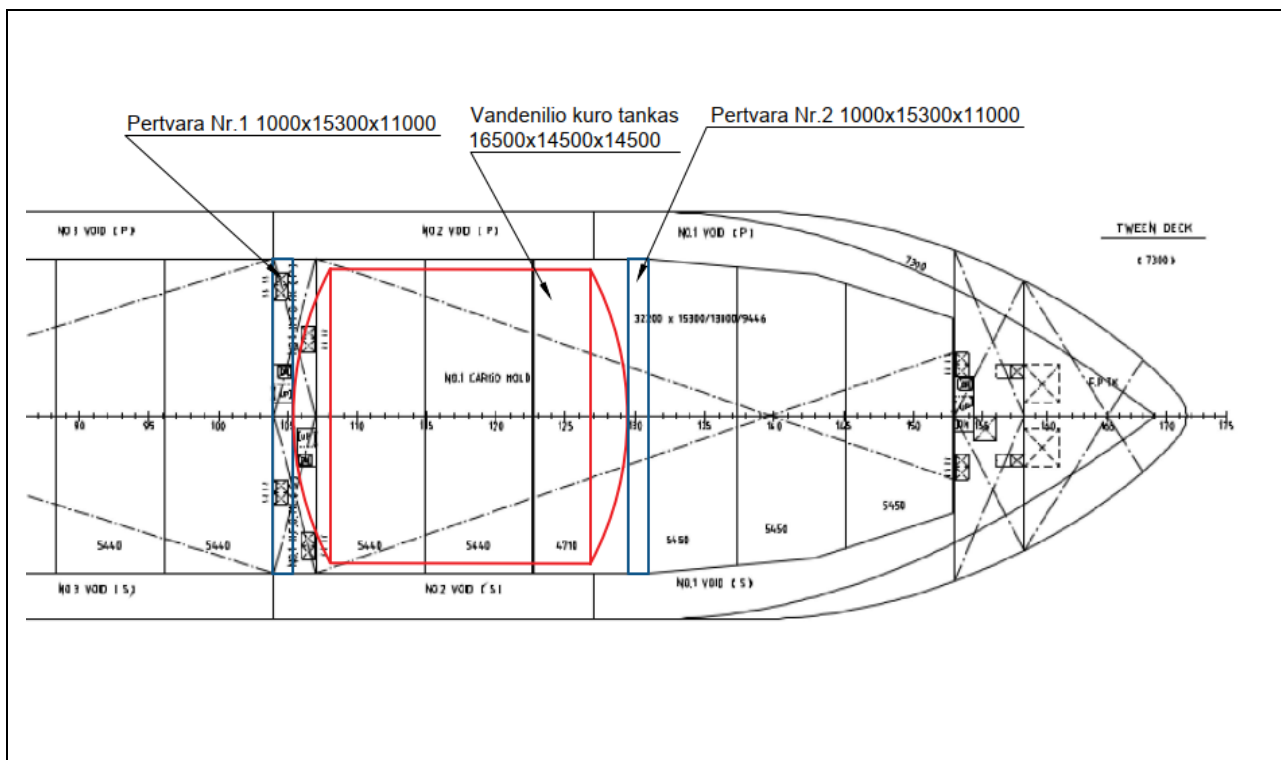
$$V_s = \frac{4}{3} \pi R_1 R_2 R_3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 6,95 \cdot 6,95 \cdot 1,2 = 242,67 \text{ m}^3 \quad (9)$$

čia,

R – sferoido spindulys, $R_1 = R_2 = \frac{x}{2} - 0,3$; $R_3 = 1,2$;

Apskaičiuojamas bendras vidinis tanko tūris:

$$V_{H2} = 2047,54 + 242,67 = 2290,2 \text{ m}^3 \quad (10)$$



26 pav. Kuro tanko vietos laive eskizas.

Suprojektuotas kuro tankas turėtų būti atitvertas triumo pertvaromis iš abiejų pusių, kad nekontaktuotų su gabenamu kroviniu. Pertvaros (1000x15300x11000 mm) su tuneliu nusileisti iki triumo apačios inspekcijai ir krovos paruošiamiesiems darbams. Mazuto kuro tankai (2000x15300x11000 mm) esantys 24 pav. kairėje, pertvaros nr.1 vietoje būtų panaikinti, nes nebereikalingi, ir tokiu būdu būtų papildomai sutaupoma vietos triume. Suprojektuotas suskystinto vandenilio kuro tankas, atsižvelgiant į maksimalių matmenų ribojimus, yra 18% mažesnis nei buvo paskaičiuotas prie 10000 jūrmylių laivo projektinio maksimalaus plaukiojimo atstumo su vienu kuro užpylimu, tačiau su šiuo suprojektuotu suskystinto vandenilio kuro tanku laivas vienu užpylimu galės įveikti 8200 jūrmylių, o tai yra pakankamas laivo autonomiškumas, atsižvelgiant į laivo plaukiojimo rajoną. Jei laivo savininko netenkintų vandenilio kuro tankų užimamas triumo tūris (t.y. 20% viso laivo triumų tūrio) kuro tanko tūrį galima būtų mažinti, tačiau reikėtų detaliau išanalizuoti plaukiojimo maršrutus ir į juos patenkančias vandenilio bunkeravimo terminalus, kad laivas nebūtų išvestas iš eksploatacijos dėl kuro trūkumo reiso metu.

Kuro elementų parinkimas pakeičiant pagrindinį variklį yra atliekamas atsižvelgiant į reikiamą galią. Esamos laivo jėgainės bendra galia, susumavus dyzelgeneratorių, veleno generatoriaus ir pagrindinio variklio galias, siekia 5250 kW, todėl parenkant kuro elementus reikia išlaikyti tą pačią galią, kad laivo savybės nepakistų. Vandenilio kuro elementų tinkančių jūrų

transportui rinkoje šiuo metu nėra, tačiau pasaulyje žinomos kompanijos, kaip ABB, Ballard Power Systems, General Electric, Havyard Group ir kitos, ties tuo dirba ir siekia pristatyti sukomplektuotas kuro elementų sistemas tinkančias laivams. Todėl šiuo atveju parenkame rinkoje esamus „Hydrogenics“ kompanijos kuro elementų modulius skirtus sunkiajam kelių transportui. Iš principo, šie kuro elementų moduliai skirtąsi nuo ateityje pasiūlytų jūrų transportui sprendimų tik gabaritais ir galingumu, tačiau technologinės ir eksploatacinės savybės išliktų panašios. Hydrogenics HyPM-HD 180 vieno modulio galia siekia 198 kw, o naudingo veikimo koeficientas – 55% [43]. Reikiamam galingumui pasiekti atitinkamai pasirenkamas modulių kiekis sudarytų 26,5 vnt. Kuro elementų laivo propulsijos komplekse vietoj pagrindinio dyzelinio variklio yra parenkamas elektros variklis. Propulsijos elektros variklių gamintojų rinkoje yra iš tiesų daugybė, kurie gali pasiūlyti įvairaus galingumo ir apsisukimų diapazono elektros variklių. Šiuo atveju, dėl tinkamiausių charakteristikų pasirenkame „Hyundai Electric“ kompanijos HIN1 509 indukcinį, 3950 kW elektros variklį [46]. Išanalizavus gamintojų pateiktas charakteristikas, galime įvertinti bendrą agregatų užimamo tūrio ir masės skirtumą su VDV laivo jėgaine.

7 lentelė. Laivo jėgainės agregatų tūrio ir masės duomenys.

Agregatas	Svoris, kg	Matmenys, mm	Bendras svoris, kg	Bendras tūris, m ³
Pagrindinis variklis Hyundai 8H32/40P	43500	6545x1460x4605	43500	44,00
Dyzelgeneratoriai 3xCummins X15	1724	1711x1067x1234	5172	6,75
Kuro elementai Hydrogenics HyPM-HD 180 – 26,5 vnt.	720	1582x1085x692	19080	31,47
Elektros variklis Hyundai Electric HIN1 509	8100	2490x2055x2360	8100	12,07

Išanalizuotų pagrindinių kuro elementų laivo jėgainės agregatų svoris yra 79% mažesnis nei lyginant su dyzelinės laivo jėgainės agregatais, o bendras kuro elementų laivo jėgainės agregatų užimamas tūris yra 16% mažesnis. Jei įvertintume ilgesnę velenų liniją, reduktoriaus ir veleno generatoriaus užimamą erdvę ir svorį, kuro elementų laivo jėgainės užimamas tūris ir masė dar labiau sumažėtų.

4.2. LAIVO EKSPLOATACINIŲ RODIKLIŲ TYRIMAS

Laivo eksploatacinių rodiklių skaičiavimai atliekami remiantis pagrindinio dyzelinio propulsijos variklio kuro suvartojimu ir kuro šilumingumo parametrais. Tam, kad supaprastinti eksploatacinių rodiklių skaičiavimus pagalbinės sistemos (dyzelgeneratoriai, veleno generatorius) nėra įtrauktos. Kad atlikti pagrindinio variklio bendrą kuro suvartojimo skaičiavimą viso reiso metu, parenkame maršrutą iš Antverpeno uosto, Belgijoje į Norvegijoje esantį Bergeno uostą. Tokiu būdu bus galima tiksliau palyginti laivo eksploatacinius rodiklius. Kadangi uosto teritorijoje laivo greitis įprastai yra mažesnis negu atviroje jūroje, maršrutas yra išskaidomas į tris zonas. Uosto teritorijose laivo greitis yra nustatytas pagal toje zonoje praplaukusių realių laivų greičio vidurkį.



27 pav. Maršrutas iš Antverpeno į Bergeno uostą.

8 lentelė. Maršruto pagrindiniai duomenys.

	Antverpeno uosto zona (I)	Jūrinė zona (II)	Bergeno uosto zona (III)
Atstumas	8 NM	600 NM	6 NM
Laivo greitis	8 kt	14 kt	8 kt
Kelionės laikas	1 val.	42,8 val.	0,75 val.

Atliekame skaičiavimus remiantis kelionės laiku, varikliui tenkančia apkrova ir specifinio kuro suvartojimo duomenimis paimtais iš variklio techninės dokumentacijos [45]. Kadangi variklio apkrovos nuo greičio priklausomybė yra kūbinė, nustatoma variklio apkrova prie 8 mazgų laivo greičio:

$$A = \frac{v_1}{v_2} = \frac{8}{14} = 0,57^3 = 0,185 \quad (11)$$

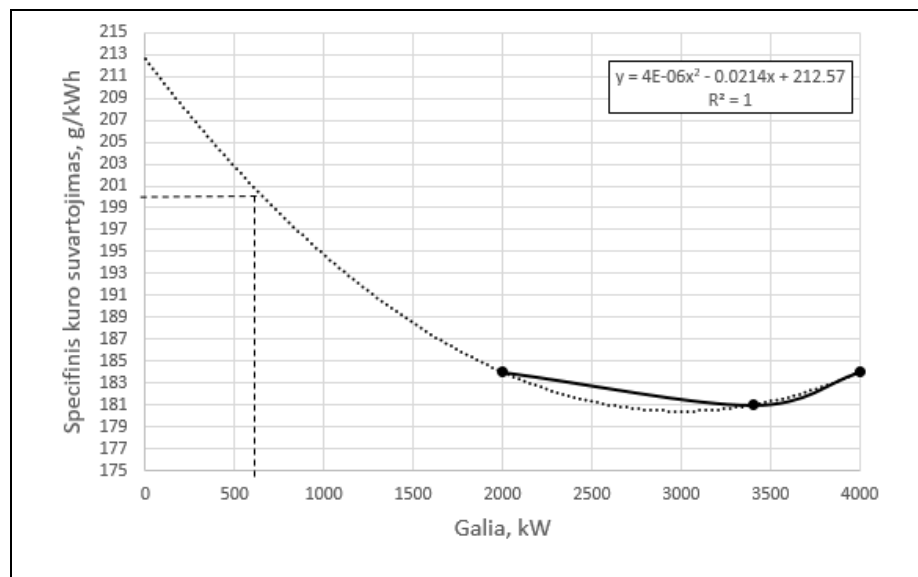
čia,

A – variklio apkrova, %;

v_1 – laivo greitis, kt;

v_2 – laivo greitis prie 85% apkrovos, kt;

Variklio techninėje dokumentacijoje nėra pateiktas specifinio kuro suvartojimas prie apskaičiuotos 18,5% variklio apkrovos, todėl įvedus žinomus specifinio kuro suvartojimo parametrus „excel“ programoje ir įtraukus daugianarę (polinominę) krypties liniją nustatome specifinį kuro suvartojimą prie 18,5% variklio apkrovos.



28 pav. Specifinio kuro suvartojimo nustatymas prie 18,5% variklio apkrovos.

9 lentelė. Dyzelino kuro suvartojimo rezultatai.

	I atkarpa	II atkarpa	III atkarpa
Variklio apkrova	18,5%	85%	18,5%
Variklio galia	629 kW	3400 kW	629 kW
Specifinis kuro suvartojimas	200 g/kWh	181 g/kWh	200 g/kWh
Bendras kuro suvartojimas (S)	126 kg	26339 kg	94 kg

$$S = P \cdot b_e \cdot t = 629 \cdot 0,2 \cdot 1 = 125,8 \text{ kg} \quad (12)$$

čia,

S – pagr. variklio bendras kuro suvartojimas, kg;

P – variklio galia, kW;

b_e – specifinis kuro suvartojimas, g/kWh;

t – laikas, h;

Atitinkamai surandamas sekančių maršruto atkarpų kuro suvartojimas. Atlikti skaičiavimai pagal pasirinktą maršrutą parodė, kad laivo pagrindinis variklis viso reiso metu, kuris bendrai trunka 44,5 val., suvartoja 26559 kg dyzelino MDO. Remiantis gautais rezultatais galime įvertinti, kiek vandenilinio kuro pareikalaus kuro elementų propulsijos kompleksas įveikti tą patį maršrutą. Skaičiavimus atliekame panaudojant proporcijos metodą pagal kuro rūšių šilumingumo ir naudingo veikimo koeficientų charakteristikas. Rezultatai pateikiami sekančioje lentelėje.

Apskaičiuojame pagrindinio variklio naudingo veikimo koeficientą:

$$\eta_d = \frac{3600}{b_e \cdot H_u} = \frac{3600}{0,181 \cdot 42500} = 0,47 \quad (13)$$

čia,

η_d – pagr. dyzelinio variklio naudingo veikimo koeficientas;

b_e – specifinis kuro suvartojimas, g/kWh;

H_u – žemutinis kuro šilumingumas kJ/kg;

Apskaičiuojame VDV laivo propulsinio komplekso iki sraigto naudingo veikimo koeficientą:

$$\eta_{LPK(vdv)} = \eta_d \cdot \eta_r \cdot \eta_g = 0,47 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,437 \quad (14)$$

čia,

η_{LPK} – laivo propulsijos komplekso iki sraigto naudingo veikimo koeficientas;

η_r – reduktoriaus naudingo veikimo koeficientas, 0,95;

η_g – veleno linijos guolių naudingo veikimo koeficientas, 0,98;

Apskaičiuojame kuro elementų laivo propulsinio komplekso iki sraigto naudingo veikimo koeficientą:

$$\eta_{LPK(ke)} = \eta_{ke} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_g = 0,55 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,512 \quad (15)$$

čia,

η_{ke} – kuro elementų naudingo veikimo koeficientas;

η_{el} – propulsijos elektros variklio naudingo veikimo koeficientas, 0,95 [46];

η_g – veleno linijos guolių naudingo veikimo koeficientas, 0,98;

Toliau apskaičiuojame vandenilinio kuro suvartojimą reiso metu remiantis NVK ir kuro žemutinio šilumingumo skirtumais.

$$S_v = S \cdot \frac{\eta_d}{\eta_{ke}} \cdot \frac{H_{uMDO}}{H_{uH_2}} = 26559 \cdot \frac{0,44}{0,51} \cdot \frac{42500}{120000} = 8115 \text{ kg} \quad (16)$$

čia,

S_v – vandenilinio kuro suvartojimas, kg;

S – dyzelino suvartojimas, kg;

H_{uMDO} – dyzelino žemutinis kuro šilumingumas kJ/kg;

H_{uH_2} – vandenilio žemutinis kuro šilumingumas, kJ/kg;

10 lentelė. Kuro suvartojimo ir eksploatacinių kaštų rezultatai.

	Dyzelinas (MDO)	Vandenilis H ₂		
Žemutinis kuro šilumingumas (H _u)	42,5 MJ/kg	120,0 MJ/kg		
Laivo propulsijos komplekso iki sraigto NVK (η_{LPK})	44%	51%		
Kuro suvartojimas (S)	26559 kg	8115 kg		
Kuro kaina	0,55 €/kg	3,0 €/kg	2,0 €/kg	1,5 €/kg
Bendra suma	14607 €	24345 €	16230 €	12172 €

Įvertiname, kiek toksiškų emisijų pateko į aplinką laivui vykstant iš Antverpeno uosto į Bergeno uostą. Apskaičiuojame CO₂ emisijų kiekį remiantis CO₂ reakcijos formule:

$$M_{CO_2} = \frac{CO_2}{C} \cdot 0,87 = \frac{44}{12} \cdot 0,87 = 3,19 \text{ kg}, \quad (17)$$

$$E_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot S = 3,19 \cdot 26559 = 84723 \text{ kg}, \quad (18)$$

čia,

M_{CO_2} – anglies dioksido masė degant 1 kg dyzelino, kg;

CO_2 – anglies dioksido molekulinė masė;

C – anglies molekulinė masė;

0,87 – anglies masės procentas dyzeline;

S – kuro suvartojimas reiso metu, kg;

E_{CO_2} – anglies dioksido emisijos reiso metu, kg;

Apskaičiuojame SO_x emisijų kiekį remiantis procentine dalimi kure. Kadangi pasirinktas maršrutas yra ECA zonoje, sieros kiekis kure pagal TJO reikalavimus negali viršyti 0,1%.

$$E_{SO_x} = S \cdot 0,1\% = 26559 \cdot 0,001 = 26,6 \text{ kg}, \quad (19)$$

čia,

E_{SO_x} – sieros oksidų emisijos reiso metu, kg;

Apskaičiuojame NO_x emisijų kiekį remiantis TJO azotų oksidų ribojimo reikalavimais. Kadangi laivas pastatytas 2011 metais jam yra taikomas antros pakopos azoto oksidų ribojimas ir yra apskaičiuojamas pagal MARPOL 73/78 Annex VI NO_x Tier II pateiktą formulę:

$$M_{NO_x} = 44n^{(-0,23)} = 44 \cdot 750^{(-0,23)} = 9,6 \text{ g/kWh}$$

$$E_{NO_x} = P \cdot M_{NO_x} \cdot t = 629 \cdot 0,0096 \cdot 1 = 6,04 \text{ kg} \quad (20)$$

čia,

M_{NO_x} – azoto oksidų masė pagal MARPOL 73/78 Annex VI NO_x Tier II, g/kWh;

E_{NO_x} – azoto oksidų emisijos reiso metu, kg;

n – variklio sūkių skaičius, aps/min⁻¹;

Atitinkamai apskaičiuojame sekančių dviejų maršruto atkarpų azoto oksidų emisijas ir jas susumuojame. Apskaičiuojame PM emisijų kiekį remiantis kietųjų dalelių eksploataciniu kuro emisijų faktoriumi pateiktoje šio darbo 2 lentelėje.

$$E_{PM} = P \cdot PM \cdot t = 629 \cdot 0,00016 \cdot 1 = 0,10 \text{ kg} \quad (21)$$

čia,

E_{PM} – kietųjų dalelių emisijos, kg;

PM – kietųjų dalelių ekplotacijos kuro emisijų faktorius, g/kWh;

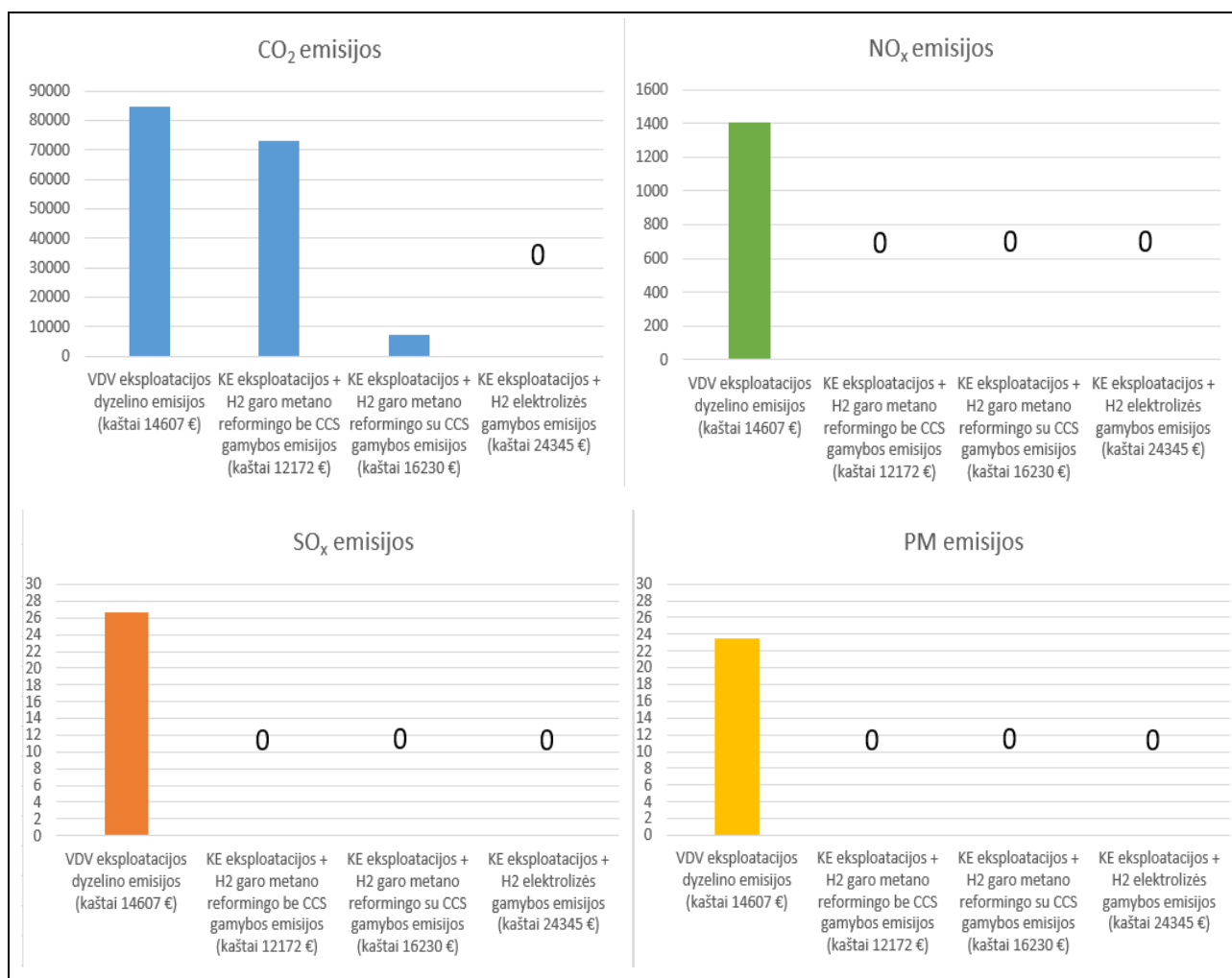
P – variklio galia, kW;

t – laikas, h;

Atitinkamai apskaičiuojame sekančių dviejų maršruto atkarpų keitųjų dalelių emisijas ir jas susumuojame, o gautus rezultatus surašome į 10 lentelę.

11 lentelė. Emisijų išsiskyrusių reiso metu rezultatai.

	CO ₂	SO _x	NO _x	PM
VDV dyzelino emisijos, kg	84723	26,6	1407,6	23,5
KE eksploatacijos + H ₂ garo metano reformingo be CCS gamybos emisijos, kg	73035	~0	0	~0
KE eksploatacijos + H ₂ garo metano reformingo su CCS gamybos emisijos, kg	>7303	~0	0	~0
KE eksploatacijos + H ₂ elektrolizės gamybos emisijos, kg	0	0	0	0



29 pav. Laivo eksploatacinių rodiklių rezultatų grafinis vaizdavimas.

Vandenilio kuro elementų laivo propulsijos komplekso naudingas veikimo koeficientas vertinant iki sraigto siekia 51%, o esamos tradicinio laivo propulsijos komplekso iki sraigto NVK – 44%. Kadangi laivo propulsijos komplekso iki sraigto NVK skirtumas sudaro 7%, o vandenilio kuro šilumingumas beveik tris kartus didesnis nei dyzelino, eksploatuojant laivą vandeniliu yra suvartojama mažiau kuro. Remiantis laivo eksploatacinių rodiklių rezultatų vaizdine medžiaga, taikant 1,5 €/kg vandenilio pagaminto garo metano reformingo būdu iš gamtinių dujų kainą, eksploatacijos kaštai yra mažesni nei su dyzeline jėgaine, tačiau dėl emisijų išsiskyrusių vandenilio gamybos metu, aplinkosauginiu požiūriu tokia eksploatacija yra nepriimtina, nes CO₂ emisijos artimos dyzelino (MDO) CO₂ emisijoms. Taikant 2,0 €/kg vandenilio pagaminto garo metano reformingo būdu iš gamtinių dujų su CCS valymo sistema kainą, eksploatacijos kaštai išauga, tačiau įvertinant griežtėjančius TJO reikalavimus dyzelinėms jėgainėms, kas ateityje galimai gali pabranginti eksploatacijos kainą per Capex valymo sistemas ar Opex švaresnio dyzelino distilato naudojimą, vandenilio kuro elementų laivo jėgainės eksploataciniai kaštai yra priimtini. Vertinant aplinkosauginį aspektą, vandenilio gamybos metu išsiskiria nuo 8% CO₂ emisijų lyginant su MDO

CO₂ emisijomis, todėl šis variantas galėtų būti naudojamas pereinamuoju laikotarpiu. Prie 3,0 €/kg vandenilio pagaminto elektrolizės būdu iš atsinaujinančios elektros energijos kainos, laivo eksploatacija pabrango 67%, todėl tokia laivo eksploatacija yra ekonomiškai neefektyvi, nors aplinkosauginiu požiūriu neišsiskyrė toksiškos ir šiltnamio dujų emisijos.

IŠVADOS

Vandenilinis kuras yra viena iš realių perspektyvų siekiant pritaikyti jūrų transportui dėl aplinkosauginių reikalavimų griežtėjimu, pradedant nuo SO_x, NO_x, CO₂ emisijų mažinimo. Vandenilio technologijų pritaikymo procesas laivyboje prasidėjo nuo pramoginių vidaus vandenių laivų, tačiau trūksta kompleksinio vertinimo linijinei laivybai. Išanalizavus vandenilio technologijų pritaikymo perspektyvas jūrų transportui aplinkosauginiu, energetiniu ir rentabilumo aspektais, galime daryti šias išvadas:

1. Vertinant TJO aplinkosauginius reikalavimus, pagrįsta, kad vandenilio panaudojimas VDV nėra racionalus sprendimas, nes azoto oksidai NO_x padidėja iki 45% lyginant su dyzelinu, nors ir yra pastebimas kitų aplinkosauginių rodiklių pagerėjimas. Kitą vertus, vandenilio panaudojimas kuro elementuose yra perspektyvus, nes atitinka TJO oro taršos iš laivų reikalavimus ir ateities oro taršos mažinimo strategiją, nes neišskiria emisijų.
2. Vandenilio technologijas vertinant pagal energetinį efektyvumą, nustatyta, kad panaudojant vandenilį VDV naudingas veikimo koeficientas padidėja iki 12% lyginant su dyzelinu ir rezultate, bendras jūrinio dyzelinio variklio NVK siekia apie 50%. Nepaisant to, vandenilio panaudojimas kuro elementuose yra efektyvesnis, NVK siekia iki 60%.
- 3.1. Siekiant vandenilio technologijų pritaikymo linijinėje jūrų transporto laivyboje, išanalizavus gamybos metodų efektyvumą, taršos aspektus ir pagaminto vandenilio kainą, gauti šie rezultatai:
 - Aukštas gamybos rentabilumas – garo metano reformingas iš gamtinių dujų (0,80 – 2,70 €/kg H₂), tačiau taršiausias, nes išskiriama 9-12 t. CO₂ pagaminant 1 t. vandenilio.
 - Vidutinis gamybos rentabilumas – garo metano reformingas su anglies surinkimo ir saugojimo sistema CCS (1,35 – 2,90 €/kg H₂), gamybos tarša sumažinama iki 90%.
 - Žemas gamybos rentabilumas – elektrolizė iš atsinaujinančios elektros energijos (3,0 – 6,7 €/kg H₂), patraukliausias aplinkosauginiu aspektu, nes gamybos proceso metu nėra išskiriamos šiltnamio dujų emisijos.
- 3.2. Ištirta, kad vandenilio transportavimo rentabilumas priklauso nuo tikslingai pasirinkto vandenilio transportavimo metodo. Dėl didelio vandenilio poreikio laivyboje, rentabiliausia vandenilį būtų transportuoti vamzdynais.
4. Pritaikius eskizinius sprendimus konvertuojant linijinės laivybos laivo jėgainę veikimui vandeniliu ir atspausdinavus eksploatacinius rodiklius, nustatyta:
 - Vandenilio kuro elementų laivo propulsijos komplekso iki sraigto NVK yra 7% didesnis negu VDV propulsijos komplekso, o vandenilinio kuro suvartojimas yra 3,27 karto mažesnis negu jūrinio dyzelino (MDO). Vandenilio kuro elementų laivo jėgainė neišskiria

emisijų, tačiau dėl skirtingų vandenilio gamybos būdų visumoje gali atsirasti CO₂ emisijos, jei vertinsime visą gyvavimo ciklą nuo gamybos iki suvartojimo.

- Ekonomiškiausia laivo eksploatacija prie 1,5 €/kg vandenilio kainos, eksploatacijos kaštai 20% mažesni negu eksploatuojant laivą dyzelinu, tačiau CO₂ emisijos artimos dyzelinui.
- Laivo eksploatacija prie 2,0 €/kg vandenilio kainos būtų 11% brangesnė lyginant su dyzelinu, o CO₂ emisijos sudarytų apie 8% dyzelino anglies dvideginio emisijų.
- Laivo eksploatacija prie 3,0 €/kg vandenilio kainos pabrangtų 67%, tačiau aplinkosauginiu požiūriu neišskirtų išmetamųjų dujų emisijos.

REKOMENDACIJOS

Išanalizavus vandenilio technologijų pritaikymo perspektyvas jūrų transportui aplinkosauginiu, energetiniu ir rentabilumo aspektais, pateikiamos šios rekomendacijos:

1. Siekiant sumažinti oro taršą iš laivų, verta orientuotis į vandenilinio kuro panaudojimą kuro elementuose, nes eksploatacijos metu neišsiskiria išmetamųjų dujų emisijos, o dėl šios technologijos energetinio efektyvumo pranašumo prieš VDV (apie 20% aukštesnio NVK), rezultate suvartojama mažiau kuro.
- 2.1. Siekiant vandenilio pritaikymo jūrų transporte ateityje, vertėtų orientuotis į vandenilio gamybą elektrolizės būdu:
 - Teigiamas aspektas – naudojant atsinaujinančią elektros energiją, vandenilio gamybos metu neišsiskiria CO₂ emisijos.
 - Neigiamas aspektas – dabartinis vandenilio gamybos pajėgumas sudaro 4% viso pasaulio vandenilio gamybos, o vandenilio kaina yra nekonkurencinga, todėl būtinas kainos sumažinimas ir gamybos pajėgumų padidinimas iki jūrų transporto sektoriaus poreikio.
- 2.2. Siekiant vandenilio pritaikymo jūrų transporte pereinamuoju laikotarpiu, galima būtų vandenilį gaminti garo metano reformingo arba išgarinimo metodu su CCS sistema:
 - Teigiamas aspektas – konkurencinga kaina, dideli gamybos pajėgumai.
 - Neigiamas aspektas – naudojama žaliava yra iškastinis kuras (pagrindė gamtinės dujos), gamybos metu išsiskiria CO₂ emisijos.
3. Ateities laivus, pagal MARPOL 73/78 Annex VI konvencijos aplinkosauginius reikalavimus ir TJO oro taršos mažinimo strategiją, rekomenduojama būtų eksploatuoti su kuro elementų jėgainėmis naudojant žaliajį vandenilį. Tačiau remiantis atliktu eksploatacinių rodiklių tyrimu, šiuo metu tokia eksploatacija yra nerentabili, todėl reikalingas vandenilinio kuro pagaminto elektrolizės būdu kainos mažinimas bent iki 2,0 €/kg.

LITERATŪRA

1. ABB and Ballard bring hydrogen to the seas. Prieiga per internetą: <<https://fuelcells.io/abb-ballard-hydrogen-ships/>>
2. Academic press. Hydrogen production cost 2019. Prieiga per internetą: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-production-cost>>
3. Air Pollution and Climate Secretariat. Air pollution from ships. Prieiga per internetą: <<http://www.airclim.org/air-pollution-ships>>
4. Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. Prieiga per internetą: <<https://core.ac.uk/reader/132196720>>
5. Ballard fuel cell module Fcvelocity-HD technical data sheet. Prieiga per internetą: <https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocity-hd.pdf?sfvrsn=2debc380_4>
6. Battery electric vs hydrogen fuel cell efficiency comparison. Prieiga per internetą: <<https://insideevs.com/news/406676/battery-electric-hydrogen-fuel-cell-efficiency-comparison/>>
7. BloomerNEF. Global consumption of marine bunkers 2019. Prieiga per internetą: <<https://about.bnef.com/blog/imo-2020-global-shipping-oil-refiners-brace-sea-change/>>
8. Bryan Comer, Naya Olmer, Xiaoli Mao, Biswajoy Roy, Dan Rutherford. Black carbon emissions and fuel use in global shipping 2015. Prieiga per internetą: <https://www.hfofreearctic.org/wp-content/uploads/2018/01/Global-Marine-BC-Inventory-2015_ICCT-Report_15122017_vF-2.pdf>
9. Certifhy. Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups. Prieiga per internetą: <http://www.certifhy.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf>
10. CO₂ emissions from international shipping. Possible reduction targets and their associated pathways 2016. Prieiga per internetą: <<https://u-mas.co.uk/LinkClick.aspx?fileticket=na3ZeJ8Vp1Y%3D&portalid=0>>
11. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. Prieiga per internetą: <<https://core.ac.uk/download/pdf/297158.pdf>>
12. Development of business cases for fuel cells and hydrogen applications for regions and cities. Prieiga per internetą: <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/171121_FCH2JU_Application-

- Package_WG1_Heavy%20duty%20trucks%20%28ID%202910560%29%20%28ID%202911646%29.pdf>
13. DNV GL Maritime forecast to 2050. Prieiga per internetą: <<https://eto.dnvgl.com/2019/Maritime/#maritime-top>>
 14. DNV GL. Maritime fuel cell applications: Technologies and ongoing developments 2018. Prieiga per internetą: <http://www.jterc.or.jp/koku/koku_semina/pdf/180221_presentation-01.pdf>
 15. DNV-GL comparison of alternative marine fuels. Prieiga per internetą: <https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2019/09/19-09-16_Alternative-Marine-Fuels-Study_final_report.pdf>
 16. DNV-GL. The future of shipping 2014. Prieiga per internetą: <https://issuu.com/dnvgl/docs/dnv_gl_-_the_future_of_shipping/113>
 17. Effect of hydrogen – diesel dual fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines 2016. Prieiga per internetą; <<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1687814016664458>>
 18. Effect of hydrogen addition at different levels on emissions and performance of a diesel engine 2018. Prieiga per internetą: <<http://www.eds.yildiz.edu.tr/AjaxTool/GetArticleByPublishedArticleId?PublishedArticleId=2520>>
 19. Effect of hydrogen-diesel dual fuel combustion on the performance and emission characteristics of a four stroke-single cylinder diesel engine 2015. Prieiga per internetą: <<https://waset.org/publications/10001272/effect-of-hydrogen-diesel-dual-fuel-combustion-on-the-performance-and-emission-characteristics-of-a-four-stroke-single-cylinder-diesel-engine>>
 20. EMSA European Maritime Safety Agency. Study on the use of fuel cells in shipping 2018. Prieiga per internetą: <<https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/2018-01/EMSA%20Study%20on%20the%20use%20of%20Fuel%20Cells%20in%20Shipping.pdf>>
 21. ESORO: heavy-duty fuel cell truck. Prieiga per internetą: <<https://fuelcelltrucks.eu/project/esoro/>>
 22. ETSAP Hydrogen storage and transportation 2014. Prieiga per internetą: <https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P12_H2_Feb2014_FINAL%203_CRES-2a-GS%20Mz%20GSOK.pdf>

23. Europe hydrogen technology roadmap 2018. Prieiga per internetą:
<https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/2018-10/Public_HE%20Tech%20Roadmaps_full%20pack_0.pdf>
24. Europe's hydrogen revolution: the promise of power without pollution 2020. Prieiga per internetą: <<https://www.euronews.com/2020/01/24/europe-s-hydrogen-revolution-the-promise-of-power-without-pollution>>
25. European Commission Community Research. Hydrogen energy and fuel cells. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hydrogen-report_en.pdf>
26. European Commission Directive on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure – Fuel price comparison 2017. Prieiga per internetą:
<<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-01-fuel-price-comparison.pdf>>
27. First hydrogen fuel ferry fleet in US 2019. Prieiga per internetą:
<<https://arstechnica.com/information-technology/2019/06/group-to-fund-and-operate-first-hydrogen-fuel-ferry-fleet-in-the-us/>>
28. Flagships H₂ ferry presentation 2019. Prieiga per internetą:
<<https://flagships.eu/2019/10/04/presenting-the-flagships-h2/>>
29. Fuel cell electric buses knowledge base. Prieiga per internetą: <<https://fuelcellbuses.eu/>>
30. Fuel cell hydrogen consumption rate. Prieiga per internetą:
<http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/15-16/H2Power/fuel-cell-measurements.html>
31. Fuel cell solutions for maritime applications: possibilities and challenges 2018. Prieiga per internetą:
<http://ieahydrogen.org/pdfs/WHEC_Sepideh_Jafarzadeh_Fuel_cell_solutions_for_ma.aspx>
32. GE report. Fuel cell partnership to slash cruise ship emissions. Prieiga per internetą:
<<https://www.ge.com/reports/ocean-green-fuel-cell-partnership-to-slash-cruise-ship-emissions/>>
33. Global carbon capture and storage Institute report 2019. Prieiga per internetą:
<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Global-CCS-Institute_Response-to-the-National-Hydrogen-Strategy-Issues-Papers_July-2019-002.pdf>
34. Global market for hydrogen fueling stations 2019. Prieiga per internetą:
<<https://www.globenewswire.com/news-release/2019/03/19/1756821/0/en/Global-Market-for-Hydrogen-Fueling-Stations-Report-2019-In-2018-77-New-Hydrogen-Stations-Went-into-Operation-Globally.html>>

35. Havyard Group developing fuel cell system for large ships 2019. Prieiga per internetą: <<https://www.electrive.com/2019/11/11/havyard-developing-fuel-cell-system-for-ships/>>
36. Hydrogen council. Hydrogen scaling up – a sustainable pathway for the global energy transition 2017. Prieiga per internetą: <<https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>>
37. Hydrogen energy ministerial meeting report 2019. Prieiga per internetą: <<https://www.meti.go.jp/press/2019/09/20190927003/20190927003-5.pdf>>
38. Hydrogen Europe. Hydrogen technology roadmap 2018. Prieiga per internetą: <https://hydrogeneurope.eu/sites/default/files/2018-10/Public_HE%20Tech%20Roadmaps_full%20pack_0.pdf>
39. Hydrogen gas stations 2019. Prieiga per internetą: <<https://www.electrive.com/2020/02/19/83-fuel-cell-gas-stations-went-online-in-2019/>>
40. Hydrogen production technologies: current state and future developments. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/313163457_Hydrogen_Production_Technologies_Current_State_and_Future_Developments>
41. Hydrogen storage, distribution and cleaning 2017. Prieiga per internetą: <<https://pdfs.semanticscholar.org/6fe6/0508d56e6756c6f139e60ba4eca589ec96da.pdf>>
42. Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications 2014. Prieiga per internetą: <[https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/hydrogen-the-future-transportation-fuel-from-production-to-VaOkuzM9Ne?>](https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/hydrogen-the-future-transportation-fuel-from-production-to-VaOkuzM9Ne?)
43. Hydrogenics fuel cell module HYPM-HD 180 technical data sheet. Prieiga per internetą: <<http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/HyPM-180-SpecSheet.pdf>>
44. Hystra – Technology Research Association. CO₂ free hydrogen energy supply chain 2019. Prieiga per internetą: <<http://www.hystra.or.jp/dist/pdf/pamphlet-en.pdf>>
45. Hyundai 8H32/40 variklio techniniai duomenys. Prieiga per internetą: <http://www.hyundai-engine.com/about/images/EMD_programme.pdf>
46. Hyundai electric propulsion motor technical documentation. Prieiga per internetą: <<http://www.hyundai-electric.com/elec/en/biz/bizPower3.jsp>>
47. Horizon Europe programme 2020. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/info/horizon-europe-next-research-and-innovation-framework-programme_en>
48. Ibrahim Dincer and Canan Acar. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability 2016. Prieiga per internetą: <<https://www.isjaee.com/jour/manager/files/784-1194-1-SM.pdf>>

49. ICCT International Council On Clean Transportation. Greenhouse gas emissions from global shipping 2013 – 2015. Prieiga per internetą:
<https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf>
50. IEA Hydrogen. Global trends and outlook for hydrogen 2017. Prieiga per internetą:
<http://ieahydrogen.org/pdfs/Global-Outlook-and-Trends-for-Hydrogen_WEB.aspx>
51. IEA report – global EV outlook 2019. Prieiga per internetą:
<<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>>
52. IEA report – tracking transportation 2019. Prieiga per internetą:
<<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019>>
53. IMO energy efficiency measures. Prieiga per internetą:
<<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>>
54. IMO International Maritime Organization. Sulphur oxides (Sox) and particulate matter (PM) regulation 14. Prieiga per internetą:
<[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)>
55. IMO strategy for reduction of greenhouse gas emissions from ships. Prieiga per internetą:
<<http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>>
56. International energy agency report. The future of hydrogen. Prieiga per internetą:
<<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>
57. International renewable energy agency. Hydrogen from renewable power – technology outlook 2018. Prieiga per internetą: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf>
58. IRENA. Solutions to decarbonise shipping. Prieiga per internetą: <https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Renewable_Shipping_Sep_2019.pdf>
59. Japanese launch world's largest-class hydrogen production unit 2020. Prieiga per internetą:
<<https://www.power-eng.com/2020/03/11/japanese-launch-worlds-largest-class-hydrogen-production-unit/#gref>>
60. Journal of Fuel Cell Science and Technology. Hydrogen fuel: opportunities and barriers 2009.

61. Lloyds Register and UCL Energy Institute. Global marine fuel trends 2030. Prieiga per internetą: <<http://www.lrqa.es/Images/25416-global-marine-fuel-trends-2030.pdf>>
62. MEPC 72/17/Add 1 Annex 11. Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships 2018. Prieiga per internetą: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Documents/Resolution%20MEPC.304%2872%29%20on%20Initial%20IMO%20Strategy%20on%20reduction%20of%20GHG%20emissions%20from%20ships.pdf>>
63. Niels Freese. CO₂ emissions from international maritime shipping 2017. Prieiga per internetą: <http://orbit.dtu.dk/ws/files/158911010/Working_Paper_4_Emissions_from_Shipping.pdf>
64. Norway to build hydrogen production facility to support marine transportation. Prieiga per internetą: <<https://www.h2-view.com/story/norway-to-build-hydrogen-production-facility-to-support-marine-transportation/>>
65. Office of Energy Efficiency and Renewable energy. Hydrogen storage. Prieiga per internetą: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>>
66. Performance, emissions and combustion characteristics of CI engine fueled with hydrogen 2015. Prieiga per internetą: <http://www.ijirset.com/upload/2015/icmeet/62_29_MET518.pdf>
67. Prevention of Air Pollution from Ships MARPOL Annex VI. Prieiga per internetą: <<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>>
68. Rahul Mahtani. Investigatin the use of hydrogen as an alternative fuel 2010. Prieiga per internetą: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.1182&rep=rep1&type=pdf>>
69. Review of hydrogen atmospheric impacts. Prieiga per internetą: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/760538/Hydrogen_atmospheric_impact_report.pdf>
70. Sandia National Laboratories. The “Zero-V” project. Prieiga per internetą: <https://theicct.org/sites/default/files/6_Klebanoff_ZeroV.pdf>
71. The design of liquefied gas carriers. Prieiga per internetą: <<https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>>
72. The effect of vessel speed on fuel consumption and exhaust gas emissions. Prieiga per internetą: <<https://thescipub.com/pdf/10.3844/ajeassp.2016.1046.1053.pdf>>

73. The Linde Group. Hydrogen transport efficiency. Prieiga per internetą:
<<https://www.thenewsmarket.com/global/technology/latest-news/linde-raises-the-bar-for-hydrogen-transport-efficiency/s/3bcca99c-ef75-47c3-b443-320b5129f2c6>>
74. The motorship insight for marine technology professionals. From LNG to hydrogen. Prieiga per internetą: <<https://www.motorship.com/news101/alternative-fuels/from-lng-to-hydrogen-the-pitfalls-and-the-possibilities>>
75. Ulstein offshore construction vessel concept 2019. Prieiga per internetą:
<<https://www.electrive.com/2019/11/20/ulstein-presents-fuel-cell-installation-ship-concept/>>
76. United Nations Conference On Trade And Development UNCTAD. Handbook of statistics 2018. Prieiga per internetą: <https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/tdstat43_en.pdf>
77. United Nations Conference On Trade And Development UNCTAD. Review of maritime transport 2018. Prieiga per internetą:
<https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf>
78. United Nations Conference On Trade And Development UNCTAD. Review of maritime transport 2017. Prieiga per internetą:
<https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf>
79. Wikipedia. Environmental impact of shipping. Prieiga per internetą:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_shipping#Greenhouse_gas_pollutants>
80. Wikipedia. Hydrogen embrittlement. Prieiga per internetą:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement>
81. Wikipedia. Hydrogen fuel. Prieiga per internetą:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_fuel>
82. World bank group. State and trends of carbon pricing 2019. Prieiga per internetą:
<<http://documents.worldbank.org/curated/en/191801559846379845/pdf/State-and-Trends-of-Carbon-Pricing-2019.pdf>>
83. World health organization. Prieiga per internetą: <<https://www.who.int/airpollution/en/>>
84. World maritime university. The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies. Prieiga per internetą:
<https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1617&context=all_dissertations>
85. Zemships. One hundred passengers and zero emissions. Prieiga per internetą:
<http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships_Brochure_EN.pdf>