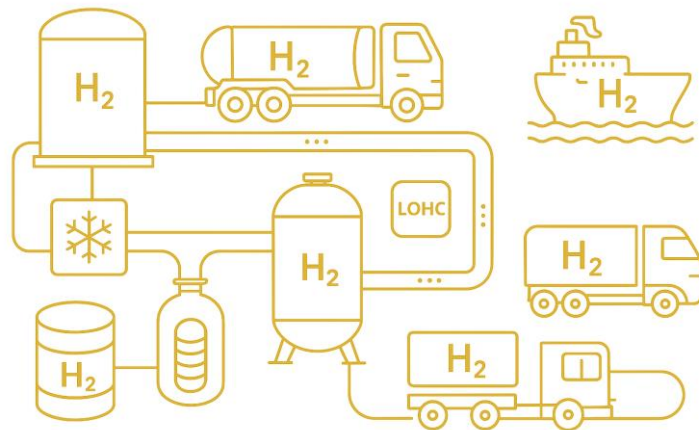




Vandenilio transportavimo galimybių vertinimas

Užsienio praktikos apžvalga

Lietuvos energetikos agentūra

Parengė: Dr. Indrė Gečaitė

2025

Turinys

Ižanga.....	3
Vandenilio saugojimas	4
Suslėgto vandenilio dujų saugojimas (CGH₂)	5
Vandenilio saugojimas požeminėse struktūrose	5
Skysto vandenilio saugojimas (LH₂).....	6
Kriogeniškai suslėgto vandenilio saugojimas (CCH₂).....	7
Vandenilio saugojimas skystuosiuose organiniuose vandenilio nešikliuose (LOHC)	8
Vandenilio saugojimas kaip degalai (sintetiniai).....	9
Amoniakas.....	9
Metanolis	10
Apibendrinimas.....	11
Vandenilio transportavimas	11
Vandenilio kelių transportas.....	13
Suslėgto dujinio vandenilio priekaba	14
Skystojo vandenilio priekaba.....	14
Vandenilio transportavimas vamzdynais	15
Vandenilio gabenimas jūra	16
Vandenilio transportavimas amoniako ar metanolio pavidalu	17
Literatūros šaltiniai	24

Ižanga

Svarbi pasaulinės energetikos sistemos giliosios dekarbonizacijos dalis yra plataus masto vandenilio naudojimo plėtra, siekiant pakeisti iškastinį kurą visuose sektoriuose – pramonėje, elektros energijos sektoriuje, transporte ir šildyme. Todėl, be vandenilio gamybos sąnaudų mažinimo, itin svarbu sukurti veiksmingą ir tinkamą infrastruktūrą vandenilio saugojimui, transportavimui ir paskirstymui. Žaliasis vandenilis gali padėti dekarbonizuoti ne tik pramonę ar transportą, bet ir užtikrinti lankstumą sistemose, kuriose dominuoja nepastovūs atsinaujinantys šaltiniai, tokie kaip vėjas ir saulė. Tačiau vandenilis, tai ne tik gamybos, bet ir logistikos iššūkis: jį reikia saugoti, transportuoti ir tiekti ten, kur jo reikia, ir tai atlikti saugiai, efektyviai ir ekonomiškai pagrįstai.

Šiame kontekste vandenilio transportavimo ir saugojimo būdų įvairovė tampa esminiu veiksniu, lemsiančiu jo vaidmenį energetikos transformacijoje. Nuo suslėgtų dujų ar skysto vandenilio iki pažangių sprendimų, tokių kaip skystieji organiniai vandenilio nešikliai (LOHC), amoniakas ir metanolis bei metaliniai hidratai. Svarbus akcentas yra ir požeminis saugojimas. Tačiau kiekvienas metodas turi savo privalumų ir trūkumų. Tinkamas jų derinimas gali tapti kertiniu žingsniu kuriant patikimas ir lanksčias vandenilio tiekimo grandines tiek vietiniu, tiek tarptautiniu mastu.

Vandenilio saugojimas yra svarbus siekiant užtikrinti sistemos lankstumą, sezoninių perteklių išlaikymą ir patikimą tiekimą pramonės bei energetikos sektoriams. Trumpalaikiam saugojimui dažniausiai naudojamos suslėgtų (CGH₂) ar skysto (LH₂) vandenilio talpyklos. Tačiau norint sukaupti didesnius kiekius, ypač sezoniniam balansavimui, būtinos didelio masto alternatyvos, tokios kaip požeminės saugyklos (druskos ertmės, senos dujų gavybos vietos ar pan.) ar energiją chemiškai kaupiantys sprendimai, kaip LOHC ar metanolis/amoniakas. Kiekvienas jų pasižymi skirtingu energijos tankiu, kaina, saugumu ir technologinio paruošimo lygiu.

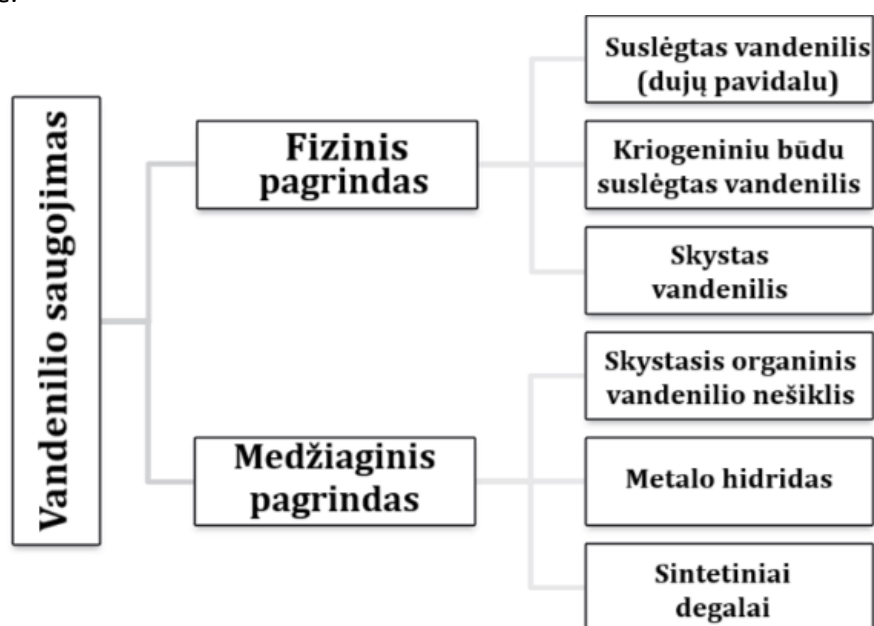
Vandenilio transportavimas, savo ruožtu, susijęs su poreikiu pervežti vandenilį iš gamybos vietų, dažnai esančių toli nuo vartotojų, į pramonės, transporto ar energetikos vartojimo centrus. Trumpais atstumais dažniausiai naudojami sunkvežimiai ar specializuoti konteineriai. Ilgesniems maršrutams taikomi vamzdynai, laivai ir geležinkeliai. Kartu su fiziniu vandenilio transportavimu vis svarbesni tampa ir alternatyvūs pernešimo būdai: vandenilį konvertuojant į amoniaką, metanolį ar LOHC, kurie yra saugesni, tankesni ir lengviau integruojami į esamą kuro logistiką.

Tiek saugojimo, tiek transportavimo technologijų įvairovė leidžia kurti lankstų ir efektyvų vandenilio tiekimo modelį, pritaikomą skirtingoms geografinėms ir sektorių sąlygoms. Būtent jų derinimas leidžia užtikrinti, kad vandenilio tiekimas būtų ekonomiškai tvarus, techniškai įgyvendinamas ir prisidedantis prie klimato tikslų įgyvendinimo. Tinkamas jų derinimas gali tapti kertiniu žingsniu kuriant patikimas ir lanksčias vandenilio tiekimo grandines tiek vietiniu, tiek tarptautiniu mastu.

Šios apžvalgos tikslas – apžvelgti aktualiausius tyrimus ir užsienio praktikas, vertinant įvairių saugojimo ir transportavimo formų galimybes bei jų potencialą Europoje ir pasaulyje. Tai padės geriau suprasti, kokie sprendimai šiuo metu pritaikomi skirtinguose sektoriuose, regionuose ir infrastruktūros lygmenyse, bei įvertinti jų potencialą bei brandumo stadiją.

Vandenilio saugojimas

Vandenilio saugojimo technologijos atlieka esminį vaidmenį kuriant vandenilio infrastruktūrą. Forma, kuria vandenilis yra saugomas, lemia ne tik jo transportavimo būdą, bet ir panaudojimo galimybes. Pažanga vandenilio saugojimo technologijose gali dar labiau paskatinti ir išplėsti vandenilio taikymo sritis. Apskritai vandenilio saugojimo sistemos skirstomos į dvi kategorijas: fiziniu principu pagrįstas ir medžiaginis saugojimas (žr. 1 pav.). Pirmuoju atveju vandenilis saugomas keičiant jo fizinę būseną, t. y. padidinant slėgį (suslėgto vandenilio dujų saugojimas – CGH_2) arba sumažinant temperatūrą žemiau jo virimo temperatūros (skysto vandenilio saugojimas – LH_2) arba taikant abu metodus kartu (kriogeninis suslėgto vandenilio saugojimas – CCH_2). Medžiaginiame saugojime naudojamos papildomos medžiagos – tarsi „nešikliai“, kurie su vandenilio molekulėmis ar atomais susijungia fizikiniu arba cheminiu būdu, taip padidindami saugojimo tankį ir saugumą, palyginti su fiziniu pagrindu veikiančiomis sistemomis. Tačiau dauguma tokių technologijų vis dar yra ne visai brandžioje stadijoje.



1 paveikslas. Vandenilio saugojimo technologijų apžvalga (Yang ir kt., 2023)

Techniniu požiūriu, įprastai išskiriami penki pagrindiniai veiksniai, apibūdinantys vandenilio saugojimo sistemą:

- **Gravimetrinis tankis** (5,5 svorio %) - parodo, kiek vandenilio (pagal svorį) telpa visoje sistemoje. Kuo didesnis – tuo lengvesnė sistema, turinti daugiau energijos.
- **Tūrinis tankis** (0,04 kg H_2/l) - parodo, kiek kilogramų vandenilio galima sutalpinti į vieną litrą talpos. Tai svarbu norint sumažinti sistemos dydį (pvz., automobilyje).
- **Darbinė temperatūra** (nuo $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) - temperatūrų diapazonas, kuriame sistema veikia saugiai ir efektyviai. Ji turi veikti tiek šaltyje, tiek karštyje (pvz., žiemą ir vasarą).
- **Ciklinis tarnavimo laikas** (1500 ciklų) – parodo kiek kartų galima pripildyti ir ištuštinti sistemą, kol ji pradės dėvėtis, pvz., 1500 ciklų.
- **Sistemos užpildymo laikas** (1,5 kg H_2/min) - parodo, kaip greitai galima pripildyti sistemą vandeniliu. Pavyzdžiui, 1,5 kg per minutę, tai reikštų, kad automobilį galima „užpildyti“ per kelias minutes kaip įprastoje degalinėje.

Toliau trumpai aprašomi visi išvardinti saugojimo būdai bei jų privalumai ir trūkumai.

Suslėgto vandenilio dujų saugojimas (CGH₂)

Pats paprasčiausias ir geriausiai išvystytas būdas saugoti vandenilį – tai jo suslėgimas ir laikymas specialiuose slėginiuose induose. Šiandien naudojami keturi pagrindiniai tokių indų tipai, o pasirinkimas priklauso nuo to, kur jie bus naudojami – ar pramonėje, ar transporte – bei kokio efektyvumo ir kainos tikimasi.

Pirmasis ir seniausias tipas – I tipo indas. Jis atsirado dar XIX a. pabaigoje ir yra gaminamas iš metalo (dažniausiai plieno) ir gali išlaikyti iki 15–30 MPa slėgį. Tačiau šie indai yra labai sunkūs, todėl tinka tik vietoje naudojamiems sprendimams, pavyzdžiui, kai vandenilis laikomas kaip pramoninės dujos.

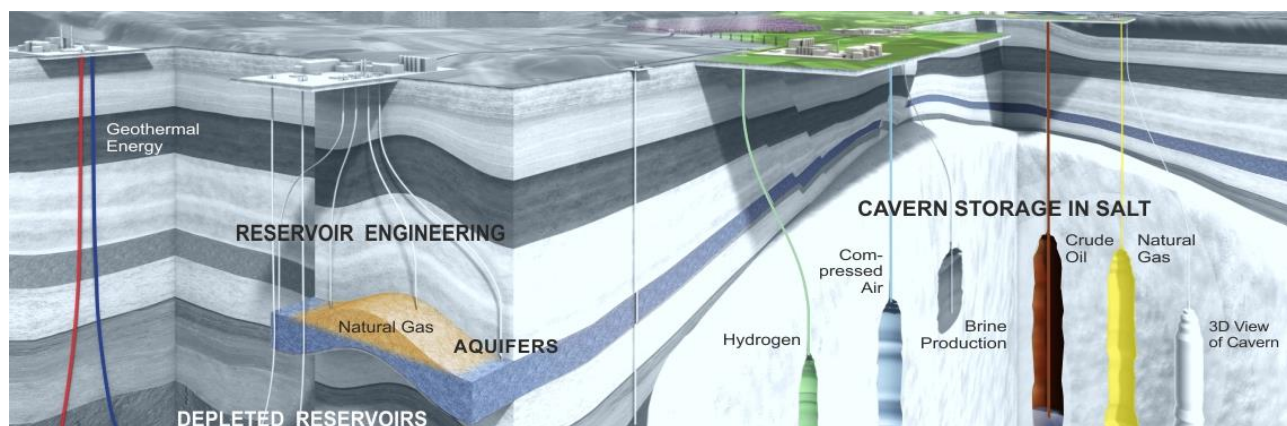
Laikui bėgant inžinieriai pastebėjo, kad didžiausia įtampa tenka indo vidurinei daliai, todėl ją reikia sustiprinti. Taip atsirado II tipo indai, kurių metalinis korpusas papildomai apvyniojamas pluoštu (pvz., anglies pluoštu). Tai leidžia laikyti didesnį slėgį, net iki 100 MPa. Dėl to tokie indai dažnai naudojami vandenilio degalinėse, kur reikalingas labai aukštas slėgis.

Dar toliau patobulinti III ir IV tipo indai – tai daug lengvesni slėginiai indai, skirti transportui. Jų vidus gali būti iš metalo arba plastiko, o išorė visiškai apvyniota stipriu pluoštu (stiklo, aramido ar anglies). Šie indai dažnai naudojami vandenilio vamzdynuose, konteineriuose ar automobiliuose, kur svarbu mažas svoris ir kompaktiškumas. Nors panašią talpą galima pasiekti ir naudojant sunkesnius I tipo indus, lengvesni IV tipo indai užima mažiau vietos, o tai ypač svarbu degalinėse ar transporto sektoriuje.

Skirtingų indų gamybos būdai taip pat skiriasi. I–III tipo indai gaminami iš metalo, jiems formuoti naudojamas spaudimas ir karštas sukimasis. Tuo tarpu IV tipo indų vidus dažnai gaminamas iš plastiko (pvz., HDPE) liejant ar suvirinant. Visi šie indai vėliau apvyniojami pluoštu ir padengiami specialia derva, kad būtų tvirti ir atsparūs slėgiui bei išorės poveikiui.

Vandenilio saugojimas požeminėse struktūrose

Be tradicinių slėginių talpų, dar vienas daug žadantis būdas saugoti vandenilį yra naudoti požeminės ertmės, tokias kaip druskų kavernos (*angl. salt caverns*), vandeningieji sluoksniai ar senos dujų gavybos vietos. Tokie sprendimai vadinami požeminiu vandenilio saugojimu (*angl. UHS – Underground Hydrogen Storage*) ir jie ypač naudingi, kai vandenilio prisigamina per daug, pavyzdžiui, kai labai pučia vėjas arba saulė gamina daug elektros. Tą perteklinį vandenilį galima „paslėpti“ po žeme ir naudoti vėliau, kai jo prireiks.



2 paveikslas. Požeminės ertmės, naudojamos vandenilio saugojimui (<https://deep-kbb.de/Underground?en>)

Druskų kavernų ertmės dažniausiai laikomos pačiu tinkamiausiu variantu. Jos pasižymi labai geru sandarumu, atsparumu cheminėms reakcijoms ir yra tarsi natūralus „saugus maišelis“ dujoms. Be to, druskinga aplinka slopina bakterijas, todėl mažėja rizika, kad mikroorganizmai sunaudos dalį vandenilio. Vis dėlto tokios ertmės yra gana retos ir paprastai nėra labai didelės.

Ištuštę gamtinių dujų telkiniai yra kitas svarbus variantas. Jų privalumas tas, kad šios vietos jau būna gerai ištirtos geologų, nes anksčiau čia buvo išgaunamos dujos. Tačiau yra rizika, kad vandenilis gali susimaišyti su likusiomis gamtinėmis dujomis, todėl sumažėja jo grynumas.

Dar vienas galimas būdas – vandeningieji sluoksniai, t. y. po žeme esantys vandeniu prisotinti uolienų sluoksniai. Jie dažni, talpūs ir paplitę daugelyje pasaulio vietų. Jei virš jų yra nelaidus uolienų sluoksnis, kuris „laiko“ dujas vietoje, juos galima pritaikyti vandenilio saugojimui. Tačiau šiuo atveju reikia būti atsargiems, nes dėl porėtos struktūros gali atsirasti dujų nuotėkis, gali vykti cheminės reakcijos su uolienomis ar mikroorganizmais. Iki šiol niekur pasaulyje grynas vandenilis vandeninguose sluoksniuose dar nebuvo saugomas praktikoje, tai vis dar eksperimentinis sprendimas.

Apskaičiuotas UHS talpos potencialas Lietuvoje apima 12 naftos telkinių, 3 akvifero (vandeningųjų sluoksnių) struktūras Kambro Deimenos formacijos smiltainyje ir vieną Permo periodo druskos kupolą. Naftos telkinių bendra apskaičiuota saugojimo apimtis – 9,42 mln. m³, tai atitinka apie 121 tūkst. tonų (kt) vandenilio. Trys akvifero struktūros, esančios 0,9-1,6 km gylyje ir užimančios 43-91 km² plotą, pasižymi dar geresnėmis savybėmis nei naftos telkiniai, jos turi didesnę poringumą, pralaidumą ir žemesnę temperatūrą. Jų talpa siekia 38,2 mln. m³ arba 363 kt vandenilio. Permo periodo druskos kupolas pasižymi maža talpa, kuri įvertinta iki 1,9 kt vandenilio. Jei visos šios galimybės būtų išnaudotos efektyviai, bendra visų struktūrų talpa Lietuvoje siektų apie 48 mln. m³ arba 487 tūkst. tonų (kt) vandenilio¹. Tuo tarpu Lenkijoje rasta nemažai vietų, kur būtų galima saugoti vandenilį po žeme. Yra dvi pagrindinės galimybės: druskų kavernos ir vandeningieji uolienų sluoksniai. Skaičiuojama, kad visa Lenkija galėtų turėti saugyklų tiek, kiek reikėtų visam šalies energijos rezervui 2050 metais. Tai reiškia, kad Lenkija gali tapti svarbiu vandenilio „sandėliu“ visam regionui. Vokietija šiuo metu yra viena iš labiausiai pažengusių šalių Europoje, kai kalbama apie vandenilio saugojimą po žeme. Čia jau dabar yra didelių druskos ertmių, kurios naudojamos gamtinėms dujoms saugoti. Šias ertmes planuojama pritaikyti vandeniliui, ir dalis jų galėtų pradėti veikti iki 2030 m. Tikslas yra turėti pakankamai talpos, kad būtų galima sukaupti net 104 teravatvalandes (TWh) vandenilio. Dar viena stiprybė – žemos saugojimo kainos. Vokietijoje vandenilio laikymas druskos ertmėse galėtų kainuoti vos 0,45–1,75 eurų už kilogramą (EWI, 2024), kas laikoma labai ekonomišku sprendimu. Abi šalys minėtos vysto šią sritį aktyviai ir tai reiškia, kad artimiausiais metais Lietuva gali bendradarbiauti su kaimynais, naudodama jų požemines saugyklas sezoniniams energijos pertekliams laikyti, jungiantis į bendrą vandenilio tiekimo tinklą.

Skysto vandenilio saugojimas (LH₂)

Dar vienas efektyvus vandenilio saugojimo būdas yra jį suskystinant. Skystas vandenilis užima daug mažiau vietos ir sveria mažiau nei suslėgtos dujos, todėl jį lengviau ir ekonomiškiau transportuoti. Tačiau tam, kad vandenilis taptų skystas, reikia naudoti labai sudėtingą technologiją ir sunaudoti daug energijos. Pagrindinės priežastys, kodėl vandenilio suskystinimas toks sudėtingas:

1. Vandenilis verda esant itin žemai temperatūrai, apie –253 °C.
2. Jo molekulės labai mažos, todėl elgiasi kitaip nei daugelis kitų dujų.

¹ Pagal A. Shogenova, S. Sliupa ir K. Shogenov. Underground Hydrogen Storage in the Baltic Countries: Future Outlook for Lithuania. 2022. European Association of Geoscientists & Engineers. Volume 2022, p.1 – 5.

3. Suskystinimo procesas apima sudėtingus vidinius pokyčius, kurie taip pat reikalauja energijos.

Pirmieji bandymai suskystinti dujas prasidėjo dar XIX a. pabaigoje. Linde ir Hampson sukūrė sistemą, kurioje oras buvo suslegiamas, šaldomas ir dalinai skystinamas. Tačiau tokia sistema neveikia su vandeniliu, nebent būtų naudojamas papildomas šaldymas su skystu azotu. Todėl vėliau Claude sukūrė efektyvesnį metodą, kuris iki šiol naudojamas daugelyje skysto vandenilio gamyklų. Šioje sistemoje vandenilis suslegiamas, aušinamas, dalinai skystinamas, o dalis jo perleidžiama per išsiplėtimo įrenginį, kuris dar labiau jį atšaldo. Toks ciklas leidžia gauti skystą vandenilį. Pavyzdžiui, Vokietijoje, Leunoje, jau nuo 2007 m. veikia gamykla, kuri per dieną pagamina apie 5,5 tonas skysto vandenilio. Tokių gamyklų veikimo principas pagrįstas Claude metodu, o jų veiklą Vokietijoje koordinuoja įmonė *Linde AG*.

Modernios gamyklos tampa vis efektyvesnės: jose naudojami papildomi šilumokaičiai, daugiau šaldymo turbinų ir specialūs katalizatoriai, kurie padeda tvarkytis su vandenilio vidiniais pokyčiais (vadinamąja orto–para konversija). Pavyzdžiui, tipinė gamykla, gaminanti 5 tonas per dieną, sunaudoja apie 10 kWh elektros energijos vienam kilogramui vandenilio suskystinti. Tačiau yra planų padidinti efektyvumą 40 %, jei gamykla padidintų pajėgumus iki 100 tonų per dieną.

Be to, kuriamos ir naujos technologijos. Pavyzdžiui, JAV mokslininkas dr. Jacob Leachman sukūrė sistemą, kurioje naudojamas vadinamasis sūkurinis vamzdelis. Jis leidžia vandeniliui aušinti pačiam save, naudojant išorinį ir vidinį srautą, taip sutaupoma energijos. Nors ši technologija dar nėra plačiai naudojama, jos efektyvumas gali būti net 20 % didesnis nei įprastų sistemų, o ją galima naudoti tiek mažoms, tiek didelėms reikmėms.

Tačiau yra ir tam tikrų iššūkių. Kai vandenilis jau yra skystas, jį reikia saugoti labai gerai izoliuotuose bakuose, nes jis natūraliai garuoja. Net ir nedidelė šilumos įtaka sukelia jo virimą. Kadangi bakai negali atlaikyti didelio slėgio, garuojantis vandenilis turi būti išleidžiamas, tai vadinama garavimo (boil-off) nuostoliais.

Šiuolaikiniai bakai gaminami taip, kad šie nuostoliai būtų kuo mažesni. Jie turi:

1. dvigubas sienes,
2. specialią šilumos izoliaciją (pvz., perlito granules),
3. vakuumą tarp sienelių.

Tokių bakų garavimo nuostoliai paprastai siekia 1–5 % per dieną, bet vis dažniau garuojantis vandenilis yra surenkamas ir panaudojamas iš naujo, pavyzdžiui, vėsinti suslėgtą vandenilį degalinėse. Tai leidžia sumažinti nuostolius net iki mažiau nei 1 % per dieną. Dar efektyvesni bakai kuriami naudojant daugiasluoksnią izoliaciją ir itin aukštą vakuumą, tokie naudojami skysto helio saugojimui. Jie leidžia sumažinti nuostolius iki vos 0,01–0,04 % per dieną, o jei integruota šaldymo sistema, nuostolių gali visai nelikti. Tačiau šios pažangios sistemos vis dar per sudėtingos ir per brangios buitiniam naudojimui, jos kol kas taikomos tik didelio masto pramonėje ar moksliniuose tyrimuose.

Kriogeniškai suslėgto vandenilio saugojimas (CcH_2)

Skystas vandenilis užima mažiau vietos nei suslėgtos dujos, todėl iš pirmo žvilgsnio atrodo patogesnis. Tačiau, kaip jau minėta, jis turi vieną didelį trūkumą – labai greitai garuoja, ypač jei šiek tiek pakyla temperatūra. Dėl to tokio tipo saugyklos nėra tinkamos naudoti automobiliuose, kur svarbu sandarumas ir ilgas laikymo laikas. Kad išspręstų šią problemą, jau daugiau nei prieš 10 metų *BMW* pradėjo ieškoti tarpinio sprendimo, kaip saugoti vandenilį šaltesnį nei įprasta dujinė forma, bet šiltesnį nei skystas vandenilis. Taip gimė vadinamasis kriogeniškai suslėgto vandenilio (*angl. cryo-compressed hydrogen, CcH₂*) saugojimo būdas.

Šio metodo esmė – vandenilį laikyti žemoje temperatūroje ir aukštame slėgyje. Pavyzdžiui, jei vandenilis atšaldomas iki $-238\text{ }^{\circ}\text{C}$ (35 K) ir suslegiamas iki 15 MPa slėgio, jo tankis būna net didesnis nei skysto

vandenilio. Tokia būseną vadinama superkritine arba mišria faze, kai vandenilis yra tarsi tarp dujų ir skysčio. Tai leidžia sutalpinti daugiau vandenilio mažesnėje talpoje ir labai naudinga transportui.

Norint pasiekti tokią būseną iš paprasto dujinio vandenilio, reikia sudėtingos technikos: kompresoriaus, šaldymo įrenginio, kelių etapų aušinimo. Tačiau *BMW* ir *Linde AG* sukūrė sprendimą, kaip C_2H_2 gauti tiesiai iš jau skysto vandenilio (LH_2), o tai daug paprasčiau. Šiuo atveju vandenilis nebešaldomas nuo nulio, o tik suslegiamas, todėl sistema tampa efektyvesnė. Tai ypač naudinga elektriniuose automobiliuose su kuro elementais (FCEV). Jeigu degalinėje iškart galima paruošti C_2H_2 , jis gali būti tiesiai supilamas į automobilį, tokiu būdu nereikia jokių papildomų saugyklų ar ilgo pasiruošimo. Kriogeniškai suslėgto vandenilio talpyklos yra tarsi dujų baliono ir šaldytuvo derinys. Jos gaminamos iš stipraus slėginio indo, apgaubto daugiasluoksne izoliacija, kad vandenilis neišgaruotų. Viduje palaikomas vakuumas. Dėl sudėtingos konstrukcijos tokios talpyklos brangesnės nei įprastos dujų ar skysčio talpos, todėl jos nėra tinkamos naudoti labai didelės apimties vandenilio sandėliavimui. Tačiau vienas didelis plusas, jei tokioje talpoje dėl kokios nors priežasties nebūtų galimybės palaikyti žemos temperatūros, ją vis tiek galima naudoti kaip paprastą suslėgto vandenilio (CGH_2) indą. Tai reiškia, kad talpykla yra lanksti ir gali prisitaikyti prie skirtingų sąlygų, o tai yra vertinga kuriant ateities transporto technologijas.

Vandenilio saugojimas skystuosiuose organiniuose vandenilio nešikliuose (LOHC)

Be įprastų būdų laikyti vandenilį kaip dujas ar skystį, vis daugiau dėmesio sulaukia kitokia technologija – vandenilio saugojimas jį sujungiant su specialiomis medžiagomis. Tai vadinama medžiaginiu vandenilio saugojimu. Paprastai tai reiškia, kad vandenilis įvedamas į tam tikras skystas arba kietas medžiagas, kurios gali jį „sugerti“ ir vėliau, prireikus, vėl „atiduoti“.

Viena perspektyviausių tokių medžiagų grupių vadinama skystaisiais organiniais vandenilio nešikliais (*angl. LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carriers*). Jie atrodo kaip įprasti skysčiai (arba tirštos medžiagos), tačiau turi savybę susijungti su vandeniliu ir jį saugiai laikyti. Į vandenilį LOHC medžiagos sureaguoja esant tinkamai temperatūrai, slėgiui ir specialiam katalizatoriui. Kai reikia vandenilį panaudoti, medžiaga vėl kaitinama ir iš jos vandenilis išsiskiria. Kad tokios medžiagos būtų praktiškos, jos turi atitikti nemažai reikalavimų: būti saugios, netoksiškos, turėti pakankamą vandenilio kiekį, būti stabilios, lengvai pildomos ir perdirbamos. Be to, svarbu, kad jas būtų galima naudoti dabartinėse kuro paskirstymo sistemose, t. y. panašiai kaip degalus.

Nuo 1980-ųjų sukurta daug LOHC medžiagų, tačiau nė viena dar nėra ideali. Mokslininkai daugiausia dėmesio skiria dviem LOHC tipams: homociklinėms ir heterociklinėms medžiagoms.

Homocikliniai nešikliai yra klasikiniai LOHC pavyzdžiai. Vienas pirmųjų buvo metilcikloheksano (MCH) ir tolueno sistema. Tokia sistema gali „laikyti“ apie 6,2 % vandenilio pagal svorį, bet norint vandenilį atskirti, reikia daug energijos ir aukštos temperatūros (350 °C), taip pat susidaro šalutinės medžiagos, tokios kaip suodžiai.

Kitas įdomus pavyzdys – decalinas/naftalenas. Čia vandenilio kiekis dar didesnis (7,3 %), o kai kurios formos kietėja kambario temperatūroje, todėl galima kurti naujus išmanius sprendimus su katalizatoriais. Ši sistema laikoma tinkama naudoti transporto priemonėse, kur reikia pastovaus ir greito vandenilio tiekimo.

Dar labiau patobulintos LOHC sistemos yra H_{12} -BT/ H_0 -BT ir H_{18} -DBT/ H_0 -DBT. Pavyzdžiui, H_{12} -BT geriau reaguoja su katalizatoriais, greičiau išskiria vandenilį, o jo klampumas – mažesnis. Tačiau šios medžiagos garuoja esant aukštesnei temperatūrai, todėl jas reikia saugoti labai atsargiai. Kuo aukštesnė virimo temperatūra, tuo stabilesnė medžiaga, bet tuo pačiu sudėtingiau ją perdirbti.

Heterocikliniai LOHC, ypač vadinamieji N-heterocikliniai junginiai, pastaraisiais metais sulaukia vis daugiau susidomėjimo. Jie pasižymi geresnėmis reakcijos savybėmis, vandenilį iš jų galima išgauti žemesnėje

temperatūroje. Vienas iš tokių pavyzdžių: indolis ir jo dariniai. Tačiau jie turi vieną trūkumą – saugo mažiau vandenilio (mažiau nei 6 %), todėl kol kas labiau tinka specializuotiems, siauresniems pritaikymams.

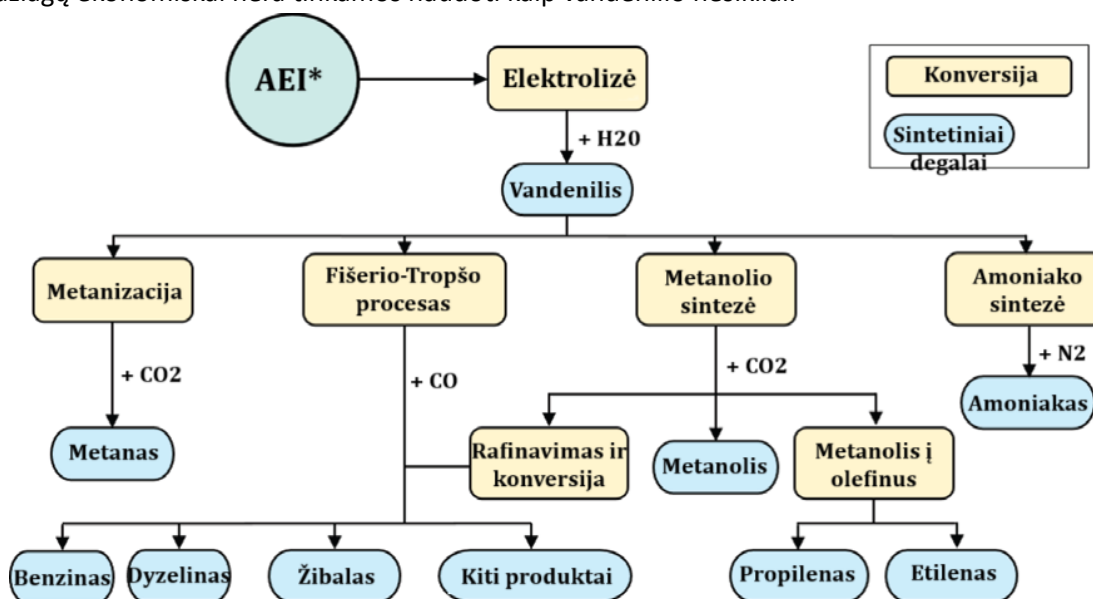
Vandenilio saugojimas kaip degalai (sintetiniai)

Yra speciali medžiaginio vandenilio nešiklių klasė, tiek dujinės, tiek skystos formos, kuri ne tik gali jungtis su vandenilio molekulėmis ir jas atleisti pagal poreikį, bet ir būti naudojama kaip kuras. Tokie vandenilio nešikliai vadinami „sintetiniais degalais“ (angl. *power fuels*) arba „E-degalais“ (*E-fuels*), jei vandenilis buvo pagamintas naudojant elektros energiją.

Paprastai prie šios kategorijos priskiriami:

- elektrochemiškai sintetinamas metanas,
- Fischer–Tropsch kuro produktai (sintetinis dyzelinas, benzinas ir kt.),
- metanolis ir jo dariniai,
- amoniakas,
- bei pats vandenilis.

Tačiau, išskyrus amoniaką ir metanolį, kurie pasižymi aukštu gravimetriniu ir tūriniu saugojimo tankiu (amoniakas: 17,7 svorio %, 123 g/L; metanolis: 12,5 svorio %, 99 g/L), bei santykinai mažomis energijos sąnaudomis ir mažesniu sudėtingumu hidrinimo ir dehidrinimo reakcijose, dauguma sintetinių degalų medžiagų ekonomiškai nėra tinkamos naudoti kaip vandenilio nešikliai.



3 paveikslas. Supaprastinta schema, kaip iš elektros ar vandenilio gaminami sintetinių degalų produktai (pagal Yang ir kt., 2023)

Amoniakas

Amoniakas yra pagrindinė žaliava trąšoms gaminti, tačiau pastaruoju metu jis vis dažniau matomas ir kaip alternatyvus būdas saugoti bei transportuoti vandenilį. Pagrindinis amoniako gamybos būdas – tai vadinamasis Haberio–Boscho procesas, kuris jau daugiau nei šimtą metų sėkmingai naudojamas visame

pasaulyje. Jame iš oro paimamas azotas, o iš gamtinių dujų išgaunamas vandenilis sujungiami į amoniaką, veikiant aukštai temperatūrai, slėgiui ir metaliniam katalizatoriui (dažniausiai geležiai).

Tačiau šis tradicinis būdas yra intensyviai teršiantis – jam reikia daug energijos ir išskiriama daug anglies dioksido. Todėl šiuo metu vis dažniau ieškoma, kaip amoniaką gaminti švaresniais būdais, naudojant atsinaujinančią energiją. Pavyzdžiui, „žaliasis vandenilis“ gali būti išgaunamas iš vandens per elektrolizę, o tada naudojamas tam pačiam amoniako sintezės procesui. Nors tokia gamyba reikalauja daugiau energijos, ji leidžia išvengti iškastinio kuro naudojimo.

Amoniakas turi ir kitą svarbų privalumą, jį lengviau skystinti ir laikyti nei vandenilį. Pavyzdžiui, jis tampa skystas esant $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, o tai leidžia jį saugoti dideliais kiekiais specialiose talpyklose – nuo kelių šimtų iki dešimčių tūkstančių tonų. Priklausomai nuo poreikio, amoniakas gali būti laikomas tiek esant slėgiui, tiek esant žemai temperatūrai.

Kai prireikia vėl išgauti vandenilį iš amoniako, šis procesas vadinamas „skaidymu“ (angl. cracking). Tam reikia aukštos temperatūros ir specialių katalizatorių. Ši technologija dar tobulinama, nes kol kas tam sunaudojama daug energijos. Kuriami ir nauji būdai, pavyzdžiui, vandenilio išgavimas elektros pagalba, bet jie dar nėra plačiai naudojami. Be skaidymo, amoniakas gali būti naudojamas ir tiesiogiai kaip kuras. Pavyzdžiui, elektros energijai gaminti galima naudoti specialias kuro celes ar net dujų turbinas. Tokios technologijos šiuo metu dar bandomos, bet jau rodo daug žadantį efektyvumą, ypač kai amoniakas maišomas su kitais degalais. Ateityje tikimasi sukurti turbinas, kurios galės naudoti vien tik amoniaką.

Amoniakas tampa vis svarbesne grandimi pereinant prie klimatui draugiškesnės energetikos. Jis ne tik padeda saugoti vandenilį, bet ir leidžia jį lengviau transportuoti bei naudoti ten, kur kitaip būtų sunku užtikrinti švarios energijos tiekimą.

Metanolis

Metanolis yra viena seniausiai naudojamų medžiagų vandeniliui saugoti. Ši technologija buvo pradėta taikyti jau XX a. pradžioje ir šiuo metu plačiai naudojama pramonėje. Metanolis gaminamas cheminės reakcijos metu, kai anglies dioksidas (CO_2) sujungiamas su vandeniliu, esant aukštesnei temperatūrai ir slėgiui. Šį procesą padeda įgyvendinti specialūs katalizatoriai, tai medžiagos, kurios pagreitina reakciją.

Toks metanolio gamybos būdas iš esmės nesiskiria nuo metodo, kai metanolis gaminamas iš iškastinio kuro. Vienintelis skirtumas, kokį anglies dioksidą naudojame. Šiuo metu dažniausiai naudojamas pigus CO_2 iš gamyklų, elektrinių ar cemento pramonės. Tačiau šis CO_2 kilęs iš iškastinio kuro, tad galiausiai vis tiek prisideda prie klimato kaitos, jei vėliau vėl patenka į atmosferą. Norint, kad metanolio gamyba būtų tvari, vis daugiau dėmesio skiriama dviem „švaresniems“ CO_2 šaltiniams:

- CO_2 surinkimui tiesiai iš oro (vadinamam tiesioginiam oro surinkimui, DAC);
- CO_2 iš biomasės (pvz., iš perdirbamų augalų ar atliekų).

Kai CO_2 sujungiamas su vandeniliu, išsiskiria šiluma. Šią šilumą galima naudoti metanolio atskyrimui nuo vandens, taigi gamyba tampa dar efektyvesnė. Gautas grynas metanolis gali būti naudojamas labai plačiai: nuo įvairių chemijos produktų gamybos iki degalų automobiliams ar šildymo sistemoms.

Jei metanolis naudojamas tik kaip vandenilio saugojimo priemonė (t. y. vėliau vandenilis vėl iš jo išgaunamas), vandens atskyrimas net nėra būtinas. Tokiu atveju, esant tinkamoms sąlygoms (šildymui iki $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), metanolis gali vėl būti paverčiamas į CO_2 ir vandenilį. Yra keli būdai išgauti vandenilį iš metanolio, bet efektyviausias – vadinamasis metanolio garų reformingas. Jis leidžia iš vienos metanolio molekulės išgauti daugiausiai vandenilio, sunaudojant palyginti nedaug energijos. Visa tai daro metanolį patrauklia alternatyva ne tik vandenilio saugojimui, bet ir kaip degalų ar žaliavos šaltinį pereinant prie švaresnės energetikos.

Apibendrinimas

Kai kalbame apie vandenilio saugojimą, labai svarbu įvertinti dvi savybes: kiek vandenilio telpa pagal svorį (vadinama masiniu arba gravimetriniu tankiu) ir kiek jo telpa pagal užimamą tūrį (vadinama tūriniu arba volumetriniu tankiu). Svarbu ne tik kiek telpa gryno vandenilio, bet ir tai, kiek vietos ir svorio užima visa sistema – kartu su talpykla ar rezervuaru. Paprastai:

1. Fizikiniai saugojimo būdai, kaip suslėgtas ar skystas vandenilis, leidžia pasiekti didžiausią masinį tankį. Tai reiškia, kad palyginti su svoriu, šie metodai gali sutalpinti daugiausiai vandenilio.
2. Medžiaginiai saugojimo būdai (kai vandenilis sujungiamas su kitomis medžiagomis, pvz., LOHC ar metanolis) dažniausiai leidžia pasiekti geresnį tįsumą tūriu, t. y. daugiau vandenilio telpa į tam tikrą tūrį.

Dėl šios priežasties medžiagomis pagrįsti metodai ypač tinka, kai vandenilį reikia laikyti ilgesnį laiką arba transportuoti dideliais atstumais, pavyzdžiui, tarp šalių. Tuo tarpu skystas vandenilis (LH_2), nors ir turi neblogą tūrį, dėl labai žemos laikymo temperatūros ir dujų garavimo problemos labiau tinka trumpalaikiam saugojimui.

Energijos sąnaudos yra kitas svarbus aspektas. Viena dalis energijos naudojama paruošti sąlygas (suspausti, suskystinti, chemiškai sujungimui su nešikliais), o kita – vandeniliui atgauti iš medžiagos (dehidrinavimas). Kai kuriais atvejais vien tik saugojimui sunaudojama trečdalis arba daugiau pačio vandenilio energijos. Mažiausiai energijos paprastai reikia suslėgtam vandeniliui (CGH_2) ir LOHC, bet tik jei šiluma iš hidrinimo proceso panaudojama efektyviai. Tačiau realybėje šiluma dažnai prarandama, nes vandenilis yra gaminamas vienoje vietoje, o iš jo atgaunamas – visai kitoje, kartais net kitoje šalyje.

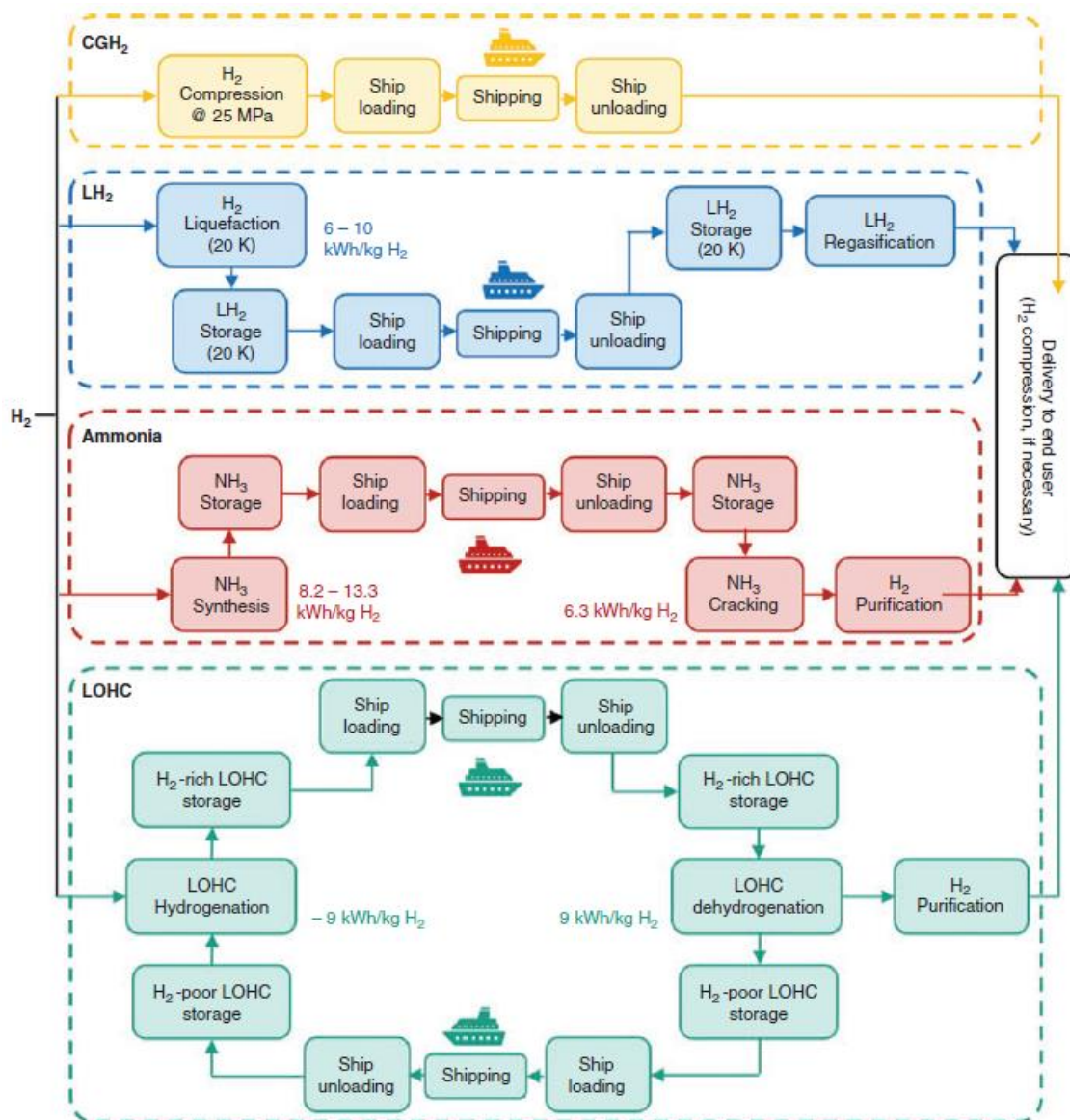
Taigi, galima teigti, jog nėra vienos tobulos vandenilio saugojimo technologijos, tinkančios visiems atvejams. Skirtingi metodai turi savo pliusų ir minusų: vieni geriau tinka transportui, kiti – ilgalaikiam saugojimui ar tarptautiniam transportavimui. Todėl norint užtikrinti patikimą ir efektyvų vandenilio tiekimą, svarbu derinti skirtingus sprendimus, atsižvelgiant į konkrečius poreikius, atstumus ir infrastruktūros galimybes.

Vandenilio transportavimas

Vandenilis – tai švarus energijos nešiklis, kurį galima gaminti įvairiose pasaulio vietose. Tačiau vien pagaminti jo nepakanka – svarbu dar ir saugiai bei efektyviai jį pristatyti galutiniam vartotojui. Tai gali būti gamykla, elektrinė ar net degalinė. Kaip ir kitos dujos, vandenilis gali būti transportuojamas įvairiais būdais, o konkretus pasirinkimas priklauso nuo to, kiek vandenilio reikia, kaip toli jį reikia gabenti ir kokios yra vietos sąlygos. Vandenilio transportavimas yra esminė grandis visoje jo tiekimo grandinėje: nuo gamybos vietos iki galutinio vartotojo. Reikia nepamiršti, jog neretai vandenilis gaminamas ten, kur sąlygos tam palankiausios (kartais net kitose šalyse ar žemynuose), o vartojamas visai kitur – miestuose, pramonės centruose ar uostuose, jo pervežimas tampa neatsiejama visos sistemos dalimi. Priklausomai nuo atstumų, kiekių ir vietos sąlygų, vandenilis gali būti gabenamas kelių transportu (įskaitant geležinkelį tam tikrais atvejais), vamzdynais arba laivais. Šie būdai jau dabar plačiai taikomi kitų dujų, tokių kaip gamtinių, atveju, todėl remiasi brandžiomis ir išbandytais technologijomis.

Jei vandenilis gabenamas keliais, jis dažniausiai vežamas specialiomis priekabomis suslėgtų dujų arba skysto pavidalu. Tai paprastas ir lanksčiai pritaikomas būdas, ypač tinkamas mažesniems atstumams ar regionams, neturintiems prieigos prie vamzdynų ar jūrų uostų. Didelėms reikmėms, ypač pramonėje, ekonomiškai naudingesnis yra vamzdynų transportas, nors pradinis infrastruktūros įrengimas brangus,

ilgainiui tai leidžia efektyviai perduoti didelius vandenilio kiekius. Laivyba yra dar vienas svarbus sprendimas, ypač kai vandenilis turi būti pervežtas per didelius atstumus tarp skirtingų žemynų. Tokiu atveju dažnai pasirenkama ne gabenti gryną vandenilį, o jį paversti į patogesnę formą, pavyzdžiui, į amoniaką, metanolį ar skystuosius organinius nešiklius (LOHC), kurie užima mažiau vietos ir lengviau valdomi. Pasiekus paskirties vietą, šie junginiai rekonvertuojami į gryną vandenilį vartotojui.



4 paveikslas. Eskizas, vaizduojantis vandenilio tiekimo grandinę, paremtą suslėgto dujinio vandenilio (CGH₂), suskystinto vandenilio (LH₂), amoniako ir skystųjų organinių vandenilio nešiklių (LOHC) transportavimu laivais (pagal Yang ir kt., 2023)

Transportavimo būdo pasirinkimas labai priklauso nuo konkretaus maršruto ir sąlygų. Pavyzdžiui, vandenilio tiekimas iš Pietų Prancūzijos į Kelną kainuoja apie 2,7 euro už kilogramą, o net iš Brazilijos – tik nežymiai daugiau, apie 2,9–3 eurus². Tai rodo, kad net esant dideliui atstumui, efektyviai suplanavus visą tiekimo grandinę, galima pasiekti priimtinas sąnaudas. Daugiausia kainuoja ne pats gabenimas, o vandenilio konversija į kitą formą ir vėlesnis atvertimas atgal. Šios išlaidos gali būti sumažintos, jei procesai vykdomi

² Pagal Collis ir Schomacker, 2022.

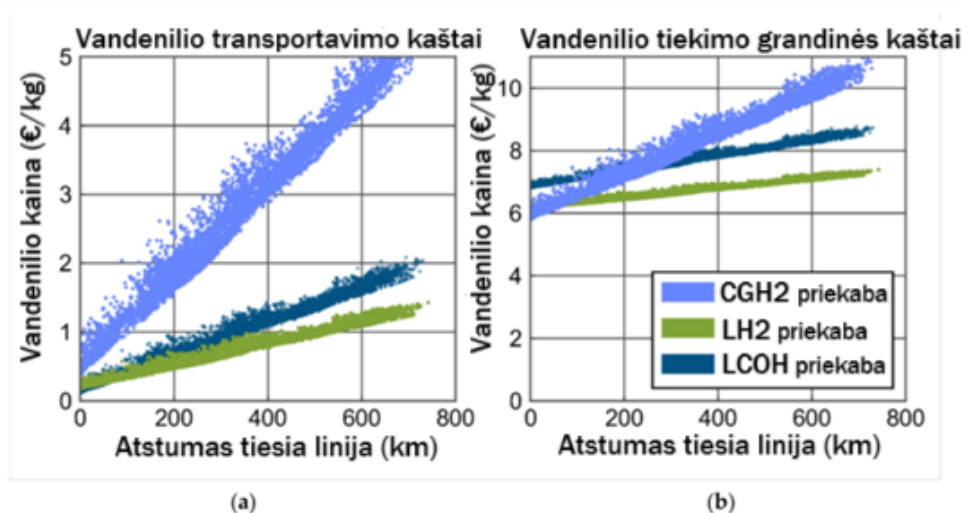
centralizuotai, didelio masto centruose, pavyzdžiui, uostuose. Tuo tarpu, kai rekonversija vykdoma vietoje, ypač mažais kiekiais, tai tampa brangiau.

Norint planuoti ekonomiškai efektyvią tiekimo sistemą, būtina pirmiausia numatyti realias vandenilio gamybos vietas. Jos turi būti ne tik techniškai tinkamos, ne saugomose ar urbanizuotose teritorijose, bet ir strategiškai patogios, pavyzdžiui, netoli uostų ar vartotojų. Pasirinkus vietą, skaičiuojami atstumai iki vartotojo ar artimiausio paskirstymo centro, įvertinamos galimos vandenilio transportavimo formos, kaip dujinis, skystas, amoniakas, metanolis ar LOHC, ir paskaičiuojami kaštai. Kiekvienas maršrutas turi savus ypatumus: pavyzdžiui, LOHC ar LH_2 galima gabenti tik keliais arba laivais, o amoniaką dar ir geležinkeliu ar vamzdžiais.

Galiausiai, svarbu suvokti, kad nors transportavimo išlaidos dažniausiai nesudaro didžiausios vandenilio kainos dalies, jos vis tiek yra reikšmingos. Pavyzdžiui eksporto atveju, kuo toliau nuo pakrantės yra gamybos vieta, tuo brangiau kainuoja visas tiekimo procesas. Todėl siekiant tvarios ir ekonomiškai pagrįstos vandenilio ekonomikos, gamybos infrastruktūra turi būti planuojama iš anksto, derinant vietos sąlygas, logistiką, vartojimo mastą ir technologinius sprendimus.

Vandenilio kelių transportas

Vandenilio transportavimas keliais – svarbus žingsnis užtikrinant jo prieinamumą įvairiems vartotojams, nuo pramonės įmonių iki degalinių. Priklausomai nuo vartojimo apimties ir atstumo, vandenilis gali būti gabenamas skirtingomis formomis, tokiomis kaip suslėgtos dujos arba skystas kriogeninis kuras. Kiekvienas būdas turi savo techninius, logistikos ir ekonominius ypatumus, kurie lemia, kuris sprendimas tinkamiausias konkrečiam naudojimo atvejui. Toliau apžvelgiami pagrindiniai kelių transporto būdai, jų privalumai, ribojimai ir pavyzdžiai iš praktikos, analizuojant kuris vandenilio transportavimo būdas yra efektyviausias ir nuo ko tai priklauso. Tokia informacija yra svarbi planuojant būsimas vandenilio tiekimo grandines ir infrastruktūrą.



5 paveikslas. Vandenilio transportavimo sąnaudos (a) ir tiekimo grandinės sąnaudos (b) CGH_2 , LH_2 ir LOHC atveju, priklausomai nuo atstumo tarp gamybos vietos ir degalinės (pagal Reuß ir kt., 2021)

Suslėgto dujinio vandenilio priekaba

Esant nedidelei vandenilio paklausai, paprasčiausias būdas jį transportuoti – tai slėginuose induose suslėgto vandenilio gabenimas (CGH₂). Jei vandenilio poreikis didesnis, kelios III arba IV tipo slėginės talpyklos (žr. skyrių [Suslėgto vandenilio dujų saugojimas \(CGH₂\)](#)) gali būti sumontuotos standartiniuose konteineriuose ar apsauginiame rėme ir tempiamos vilkiko. Atsižvelgiant į kainos ir saugumo veiksnius, vandenilio slėgis paprastai palaikomas tarp 20 ir 50 MPa (tikimasi pasiekti 70 MPa), o tai reiškia, kad vienas sunkvežimis gali pervežti 200–1000 kg vandenilio. Pavyzdžiui, „Hexagon Purus GmbH“ dujų konteinerių moduluose 3–12 m ilgio konteineriai, sudaryti iš 22–103 vertikaliai įrengtų IV tipo talpyklų, gali gabenti 240–1115 kg vandenilio esant 50 MPa slėgiui. Natūralių dujų gabenimui skirtos vamzdinės priekabos taip pat tinka vandeniliui transportuoti. Dažniausiai naudojamos III tipo talpyklos, kurios horizontaliai sujungiamos į rinkinį. Verta pažymėti, kad ne visas CGH₂ kiekis, kuris buvo transportuotas, pasiekia galutinį vartotoją. CGH₂ priekabose likęs vandenilio kiekis priklauso nuo slėgio lygio tiekimo grandinėje.

Europos ir JAV prieigos prie suslėgto vandenilio transportavimo skiriasi technologijų pažanga ir reguliavimu. JAV vis dar taiko ribojimą, naudojamos tik III tipo CGH₂ priekabos, kurios veikia iki 25 MPa, vežančios maždaug 380 kg vandenilio per reisą. Tuo tarpu Europoje jau veikia modernios IV tipo kompozitinės sistemos, galinčios dirbti 500 bar (50 MPa) slėgiu ir gabenti 1 000–1 100 kg vandenilio, žymiai aplenkiant ankstesnius 200–300 bar sprendimus. Kai kurie gamintojai, kaip *Hexagon Purus*, siūlo net 700 bar slėgio sistemų prototipus, ir planuojama jas paleisti rinkoje iki 2030 m.

ES reglamentai (ADR (Europos susitarimas dėl pavojingų krovinių keliuose)³, TPED (Transportuojamos slėginės įrangos direktyva) ir PED direktyvoje 2014/68/ES⁴) kol kas dar netiesiogiai apima aukštesnio slėgio vandenilio transportavimo sistemas. Tačiau pastaraisiais metais vyksta aktyvus reglamentavimo atnaujinimo procesas, prie kurio reikšmingai prisidėjo ir ES projektas „*Optimisation of Transport Solutions for Compressed Hydrogen*“ (*DeliverHy*)⁵. Ši iniciatyva padėjo suformuoti technologinį pagrindą ir skatino teisėkūros pokyčius, siekiant įteisinti transportavimo sistemas, veikiančias 43 MPa ir aukštesniu slėgiu. Tokios pažangios technologijos jau leidžia vienu reisu pervežti iki 1,2 tonos vandenilio, taip sumažinant transporto ciklą skaičių ir bendrus logistikos kaštus. Dar 2021 metais tyrimas apie vandenilio kelių transportą Vokietijoje naudojant Dijkstra algoritmą ir optimizuojant maršrutus su priekabos slėgio diapazonu 200–700 bar, nustatė, jog suslėgto vandenilio transportavimo kaštai gali būti lygūs apie 2,69 €/kg H₂, o palyginimui skysto vandenilio – 0,73 €/kg, LOHC – 0,99 €/kg⁶. Autoriai teigė, jog CGH₂ yra ekonomiškiausias trumpiems atstumams, tačiau didesniais laimi LH₂. Tai reiškia, kad CGH₂ priekabos tinkamos tik trumpų atstumų (100–200 km) vandenilio transportui klientams, kurių vandenilio poreikis nedidelis, pavyzdžiui, mažos talpos degalinėms.

Skystojo vandenilio priekaba

Kita alternatyva – vandenilio transportavimas skystu pavidalu (LH₂). LH₂ priekabos ypač tinkamos vidutinio atstumo transportui (>130 km, remiantis Vokietijos atvejo analize⁶). Tokiu atveju vandenilis suskystinamas centrinėje suskystinimo gamykloje ir pristatomas klientams. Kadangi skystojo vandenilio tūrinis tankis yra gerokai didesnis nei suslėgto dujinio, viena LH₂ priekaba gali gabenti daug daugiau vandenilio nei

³ <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.210873?jfwid=32wf8x5e>

⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/ALL/?uri=celex%3A32014L0068>

⁵ [DeliverHY projektas](#)

⁶ Pagal Reuß ir kt., 2021

CGH₂ priekabos. Pavyzdžiui, 2025 m. balandį *Linde* pristatė didelį 3,9 tonų talpumo (3900 kg) LH₂ vilkiko priekabą, Europoje didžiausią tokio tipo, tai net 50 % daugiau nei ankstesni modeliai.

Pagrindinis techninis iššūkis transportuojant LH₂ yra garavimo (*angl. boil-off*) problema. Tačiau transportui skirtos kriogeninės talpyklos gali atlaikyti 12 barų slėgį, tai yra 3–5 kartus daugiau nei stacionarių didelės talpos vandenilio talpyklų. Pavyzdžiui, *Linde* LH₂ priekaboje #7016, kai talpykloje yra 3853 kg vandenilio (91 % pripildymas), garų slėgis per 158 valandas gali pakilti nuo 2,1 iki 3,4 barų. Tai reiškia, kad įprastinio pristatymo metu išgaravęs vandenilis neišleidžiamas į atmosferą, o grąžinamas į suskystinimo gamyklą ir perdirbamas. Lygiai taip pat kaip ir CGH₂, ne visas LH₂ kiekis, kuris buvo transportuotas, pasiekia galutinį vartotoją. LH₂ atveju, norint palaikyti kriogeninę temperatūrą, apie 10 % skysčio turi likti talpykloje.

LH₂ vilkikai naudojami tiek pramoniniams objektams, tiek mobiliosioms degalinėms, kurioms būtinas didelės apimties vandenilis. Nors konkretūs atstumai ne visada skelbiami, įprasti LH₂ transporto maršrutai kinta nuo keleto šimtų iki >400 km, atsižvelgiant į naudojimo vietų koncentraciją. Paprastai LH₂ transportas keliais kainuoja ~0,5 €/kg H₂, kai vienu važiavimu pervežama ~4000 kg (remiantis IEA duomenimis⁷).

Vandenilio transportavimas vamzdynais

Vandenilį galima gabenti vamzdynais taip pat, kaip ir gamtines dujas. Tai vienas pigiausių būdų transportuoti didelius kiekius, ypač jei vandenilis tiekiamas į didelius pramoninius ar tankiai gyvenamus regionus. Tačiau naujų vamzdynų statyba būtų labai brangi, todėl kai tik įmanoma, stengiamasi pritaikyti jau esamus gamtinių dujų vamzdynus. Kadangi vandenilis teka lengviau nei gamtinės dujos, jį galima perduoti mažesniu slėgiu, vos 2–3 MPa. Tačiau jis turi mažesnę energinę vertę, todėl tokio transportavimo nauda priklauso nuo konkrečių poreikių. Viena iš pagrindinių problemų yra vandenilio poveikis metalui: vamzdynų medžiagos gali silpnėti ar skilinėti. Vis dėlto tyrimai parodė, kad kai kurie plienai, pvz., X70, yra tinkami vandeniliui ir atsparesni pažeidimams nei kiti.

Mokslininkai taip pat analizavo, kiek kainuoja tiesti naujus vandenilio vamzdynus ir kiek pritaikyti esamus gamtinių dujų tinklus. Tyrimai⁸ rodo, kad norint panaudoti senus mažo skersmens (<250 mm) vamzdynus, ekonomiškiausias sprendimas yra pridėti labai nedidelį kiekį deguonies (apie 0,015 %) į vandenilį. Tai padeda sumažinti vandenilio poveikį metalų struktūrai, vadinamą trapumu. Kai kuriais atvejais, ypač didelio skersmens ir techniškai tinkamiems vamzdynams, gali būti ekonomiškai pagrįsta naudoti esamą infrastruktūrą vandenilio transportavimui, atlikus minimalius pritaikymus. Vis dėlto, kai reikalingas aukštesnis saugumo lygis arba kai esami vamzdžiai neatitinka vandeniliui keliamų reikalavimų, gali būti taikomas vadinamasis „vamzdis vamzdyje“ (*angl. pipe-in-pipe*) metodas – į esamą vamzdį įmontuojamas naujas, specialiai vandeniliui skirtas vidinis vamzdis. Tai vienas iš saugiausių, bet ir brangiausių techninių sprendimų.⁹

Kai vandenilis tiekiamas vamzdžiais, būtina užtikrinti jo grynumą, ypač jei jis skirtas naudoti automobiliuose. Tam gali prireikti papildomo valymo, pavyzdžiui, naudojant slėgio pokyčiais pagrįstą filtravimo metodą, kuris leidžia pasiekti beveik visišką, net 99,9999 % grynumą. Vokietijoje jau veikia keli vandenilio vamzdynai, daugiausia skirti pramonei. Ilgiausias jų, priklausantis „Air Liquide“, kuris driekiasi 240 km. Kiti tinklai yra 150 km ir 30 km ilgio, ir priklauso „Linde“ bei aptarnauja pramoninius regionus. Ateityje Vokietija planuoja iki 2032 m. įrengti apie 9 040 km „core“ vandenilio tinklą, kurio apie 60 % sudarys

⁷ [The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan.](#)

⁸ Pagal Michler ir kt., 2012

⁹ Pagal Cerniauskas ir kt., 2020

konvertuoti iš dujinių vamzdynų, o likę – naujai nutiesti vamzdynai¹⁰. Kiti reikšmingi projektai apima „Badenova“ trasą pietuose, „Evonik“ tinklą chemijos pramonei ir ONTRAS bei GASCADE iniciatyvas rytinėje šalies dalyje. Šie projektai rodo koordinuotą pastangą plėtoti nacionalinį vandenilio transporto tinklą, derinant naują statybą su esamos infrastruktūros pritaikymu. Šiuos projektus stipriai remia valstybės ir Europos Sąjungos parama, patvirtinta daugiau nei 3 mlrd. eurų vertės investicijų paketas, skirtas iki 2037 m. Tai leidžia gerokai sumažinti sąnaudas ir pagreitinti plėtros procesus.

Europos mastu šiuos planus papildo plataus užmojo iniciatyva „European Hydrogen Backbone“ (EHB), kuriai vadovauja 31 Europos dujų perdavimo sistemos operatorius. Šios iniciatyvos tikslas – iki 2040 metų sukurti apie 53 000 km ilgio vandenilio vamzdynų tinklą, apimančį ne tik ES šalis, bet ir Jungtinę Karalystę, Norvegiją bei Šveicariją. Apie 60 % šio tinklo turėtų būti sudaryta iš pertvarkytų gamtinių dujų trasų, o likusieji – naujai nutiesti vamzdžiai, įskaitant ir povandenines jungtis. EHB skaičiavimais, vandenilio transportavimo 1 000 km sąnaudos antžeminiu vamzdynu siektų apie 0,11–0,21 euro už kilogramą, o povandeninėmis jungtimis – iki 0,32 euro, priklausomai nuo regiono. Be Europos vandenilio vamzdynų projektų, tokių kaip H₂ Core Grid su Lubmin–Bobbau trasa, svarbią dalį sudaro planuojama Baltijos šalių koridoriaus atšaka. Tai yra Europos iniciatyvos „European Hydrogen Backbone“ Koridorius D arba „Nordic-Baltic Hydrogen Corridor“, kuri jungia Suomiją, Švediją, Estiją, Latviją, Lietuvą, Lenkiją ir Vokietiją. Į šį projektą įsilieja „Nordic Baltic Hydrogen Corridor“ studija: 2023 m. atlikta pradinė analizė parodė, kad Koridorius D padėtų per 2040 m. eksportuoti iki 27 mln. tonų atsinaujinančio vandenilio iš Šiaurės šalių į Centrinę Europą. Baltijos linija leistų prijungti pramonės klasterius Suomijoje, Švedijoje ir Baltijos šalyse, taip pat palaikytų importą į Vokietijos H₂ tinklą, kuris artėja link Lubmin–Bobbau trasos. Tai ne tik sustiprintų regioninės energetikos saugumo strategijas, bet ir padėtų integruoti didelio masto vėjo energiją, panaudojant ją vandeniliui gaminti. Įgyvendinus šią viziją, ES galėtų pasiekti patikimą, tvarią vandenilio tiekimo struktūrą, sujungiančią Šiaurės, Baltijos ir Centrinę Europą. Tokiu būdu Baltijos koridorius tampa realiu tiltu tarp vandenilio gamybos regionų ir didžiausių vartotojų Vakarų ir Vidurio Europoje, dviem būdais – jūriniu ir sausumos vamzdynu. Tai reikštų ne tik energetikos transformaciją, bet ir naujų pramonės bei lankstumo galimybių atvėrimą Baltijos šalių regionui.

Dujinis vandenilis, transportuojamas vamzdynais be papildomo konvertavimo ar suskystinimo, pasižymi mažiausiais energijos nuostoliais visame cikle. Skaičiuojama, kad suslėgimo nuostoliai sudaro apie 5–15 %, palyginti su 9–22 % nuostoliais suskystinto vandenilio atveju ar net 26–43 % LOHC atveju. Būtent todėl vamzdynais tiekiamas H₂ gali tapti ekonomiškai ir energetiškai efektyviausiu sprendimu, ypač kai gamyba vykdoma netoli vartotojų, o paklausa yra didelė. Be to, masto ekonomijos principas, kai vienam produkto vienetui tenka mažesnės kapitalo sąnaudos augant transportuojamo kiekio apimčiai, yra vienas pagrindinių vamzdynų pranašumų lyginant su kitais transportavimo būdais.

Vokietijos pavyzdys rodo, kaip koordinuota strategija, viešoji parama ir infrastruktūros pertvarkymas gali žymiai pagreitinti vandenilio rinkos plėtrą. Tai sudaro tvirtą pagrindą visos Europos žaliajai transformacijai, kurioje vandenilio vamzdynai gali atlikti lemiamą vaidmenį.

Vandenilio gabenimas jūra

Žaliojo vandenilio transportavimas jūra tampa itin svarbus siekiant pasaulinės prekybos šiuo švarių energijos nešikliu. Tose šalyse, kuriose yra didelis atsinaujinančios energijos perteklius, gaminamas vandenilis galėtų būti eksportuojamas į geografiškai nutolusius regionus, kuriems trūksta gamybos pajėgumų. Tai ypač aktualu Japonijai, Pietų Korėjai ar Vakarų Europai, kurios gali tapti pagrindinėmis importuotojomis. Palyginti

¹⁰ [Hydrogen to start to flow in pipelines in Germany in 2025](#)

su vamzdynais, kurie reikalauja didelių investicijų ir yra geografiškai fiksuoti, jūrinis transportas leidžia greitai prisitaikyti prie rinkos pokyčių ar geopolitinių iššūkių.

Priklausomai nuo vandenilio formos, transportavimo jūra būdai skiriasi. Vienas iš paprasčiausių yra suslėgto dujinio vandenilio (CGH₂) gabenimas. Jo pranašumas – nedidelės energijos sąnaudos suspaudimui ir santykinai nesudėtinga infrastruktūra. Šis metodas ypač tinka mažesniems atstumams, iki maždaug 3700 km. Pirmasis pasaulyje krovininis suslėgto vandenilio laivas „C-H₂“ kuriamas Australijos kompanijos GEV („Global Energy Ventures Ltd“). Jis galės gabenti iki 430 tonų vandenilio esant 25 MPa slėgiui. Ateityje planuojami ir didesni variantai, galintys transportuoti iki 2000 tonų. Šis transportavimo būdas išlieka konkurencingas eksportui iš Australijos į Azijos šalis, tačiau dėl ribotos talpos nėra tinkamiausias dideliems srautams.

Skystinto vandenilio (LH₂) transportavimas – technologiškai sudėtingesnis, bet siūlantis aukštą energijos tankį ir galimybę perimti dalį SGD laivų infrastruktūros. Šiuo metu jau yra veikiantis LH₂ laivas *SUISO FRONTIER*, kuris 2022 m. atliko pirmąją komercinę kelionę tarp Australijos ir Japonijos, perveždamas 75 tonas vandenilio 9000 km atstumu. Skystinimo procesas atliekamas eksporto pusėje, kur energija pigesnė, o importo pusėje LH₂ gali būti tiesiogiai naudojamas be papildomo gryninimo. Tačiau didžiausias šio metodo iššūkis yra garavimo (*boil-off*) nuostoliai. Kai viršijamas leistinas slėgis, vandenilis turi būti išleidžiamas į atmosferą. Kol kas sprendimų, kaip šiuos nuostolius efektyviai mažinti, dar ieškoma. Ateityje planuojami aukštesnio slėgio bakai, aktyvus aušinimas ar pakartotinio suskystinimo sistemos. Tuo tarpu išgaravęs LH₂ jau dabar gali būti naudojamas kaip laivo kuras tiek kuro elementuose, tiek vidaus degimo varikliuose.

Palyginti transportavimo efektyvumą, Europos Komisijos JRC tyrimai rodo, kad LH₂ transportavimas jūra ekonomiškai tikslingas 2500–16000 km atstumu. Tai apima maršrutus, pavyzdžiui, iš Saudo Arabijos į Roterdamą. Kiti galimi vandenilio jūrinio gabenimo sprendimai yra amoniakas, metanolis ar skystieji organiniai vandenilio nešikliai. Jie leidžia vandenilį paversti stabiliais junginiais, kuriuos lengviau sandėliuoti ir transportuoti, tačiau dėl konversijos nuostolių ir poreikio papildomai atskirti vandenilį galutinėje grandinėje stadijoje šie metodai paprastai yra mažiau efektyvūs.

Bendrai vertinant, kiekvienas jūrinio transportavimo metodas turi savo nišą. Suslėgtas vandenilis geriausiai tinka trumpesniems maršrutams, skystas – didelėms siuntoms vidutiniais ir tolimesniais atstumais, o cheminių junginių pagrindu veikiantys sprendimai tais atvejais, kai svarbus saugumas, lankstumas ar sandėliavimas. Ateityje, vystant vandenilio ekonomiką, tikėtina, kad visos šios technologijos egzistuos kartu, priklausomai nuo logistikos, rinkų poreikių ir technologinės pažangos.

Vandenilio transportavimas amoniako ar metanolio pavidalu

Atsižvelgiant į sudėtingumus, susijusius su tiesioginiu vandenilio transportavimu (pvz., dėl mažo energijos tankio), šiuolaikinėje praktikoje vis dažniau taikomi vandenilio nešikliai – cheminės medžiagos, leidžiančios vandenilį transportuoti netiesiogiai. Tarp jų ypač išsiskiria amoniakas (NH₃) ir metanolis (CH₃OH), kurie laikomi patraukliausiais sprendimais dėl savo technologinio brandumo, saugumo, efektyvaus laikymo ir daugiafunkciškumo. Šios medžiagos gali būti:

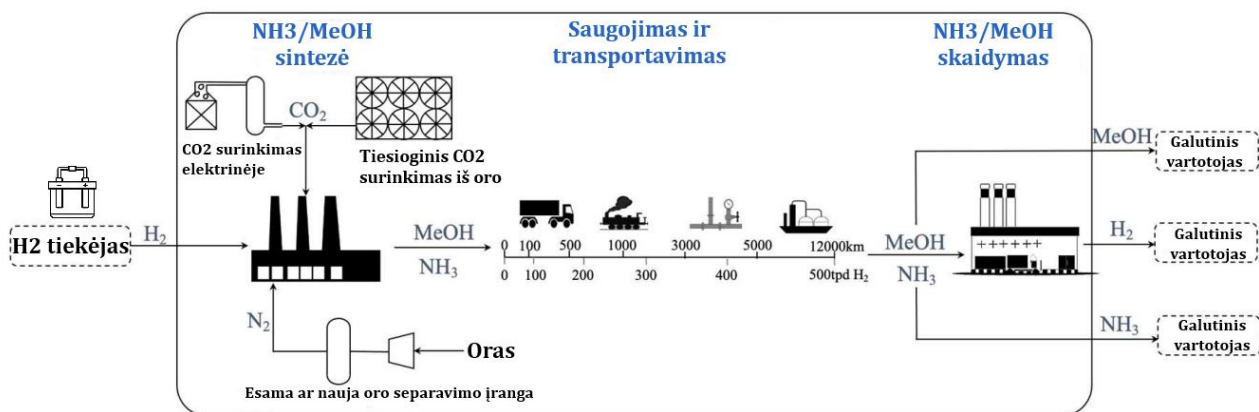
1. sintetamos iš vandenilio naudojant gerai ištirtas chemines sintezės technologijas,
2. transportuojamos egzistuojančiais pramoniniais kanalais (cisternomis, konteneriais),
3. naudojamos tiesiogiai kaip kuras ar cheminė žaliava,
4. arba vėl paverčiamos į vandenilį galutinėje paskirties vietoje, pvz., reformuojant metanolį ar skaidant amoniaką.

Tokiai infrastruktūrai reikalingi:

1. CO₂ (tiekiamas iš oro arba elektrinių),

2. N_2 (tiekiamas iš esamų ar naujų oro atskyrimo įrenginių).

Dėl šių savybių amoniakas ir metanolis leidžia ne tik efektyviai transportuoti vandenilį, bet ir integruoti vandenilio tiekimo grandinę su esamomis chemijos ir energijos sistemomis. Amoniaką ir metanolį galima transportuoti dideliais kiekiais naudojant jau esamas saugojimo ir transportavimo priemones. Be to, amoniakas ir metanolis yra svarbios žaliavos chemijos ir biotechnologijų pramonėje, pavyzdžiui, trąšų gamyboje ar olefinų sintezėje. Todėl vandenilio transportavimo infrastruktūrą, pagrįstą amoniaku ar metanolium, galima lengvai integruoti su kitais cheminiais procesais. Šių procesų schema vaizduojama XX paveiksle, kuriame apibendrinta potenciali vandenilio transportavimo infrastruktūra ir jos pagrindiniai komponentai.



6 paveikslas. Potenciali vandenilio transportavimo infrastruktūros schema naudojant amoniaką arba metanolį (pagal Cui and Aziz, 2023)

2023 metais atliktoje Cui and Aziz analizėje „*Techno-economic Analysis of Hydrogen Transportation Infrastructure Using Ammonia and Methanol*“, buvo išsamiai apžvelgtos skirtingos vandenilio transportavimo infrastruktūros alternatyvos, pagrįstos dviem pagrindiniais nešikliais – metanolium ir amoniaku ir iš viso nagrinėta 32 skirtingi transportavimo keliai, atsižvelgiant į skirtingus atstumus, pajėgumus ir priemones. **Lentelėje Nr. 1** pateikiama detali kiekvieno infrastruktūros scenarijaus informacija, įskaitant naudojamą nešiklį ir galutinę kuro paskirtį. Trumpas paaiškinimas:

1. Metanolium pagrįsti infrastruktūros variantai (I, II, V, VI)

- 1.1. Kai šalia yra kūrenama elektrinė su aminių absorbcijos įranga, CO_2 metanolio sintezei gali būti perkamas iš jos (variantas I).
- 1.2. Vandenilis tiekiamas atskirai, o metanolio sintezės įrenginys jungia H_2 ir CO_2 į metanolį.
- 1.3. Įrengiama 10–30 dienų gamybos atsargų talpa, leidžianti lanksčiai valdyti atsargas.
- 1.4. Metanolis transportuojamas sunkvežimiais, geležinkeliu, vamzdynais arba laivais.
- 1.5. Gavus metanolį paskirties vietoje, vandenilis išgaunamas per metanolio garinį reformavimą.
- 1.6. Jei šalia nėra elektrinės, iš kurios būtų galima gauti CO_2 , taikomas CO_2 surinkimas tiesiogiai iš oro (DAC) – tai atitinka II infrastruktūros scenarijų.
- 1.7. Infrastruktūrose V ir VI metanolis siunčiamas tiesiogiai naudotojui, kuris jį vartoja kaip kurą ar žaliavą, be tolesnio pavertimo į vandenilį.

2. Amoniakum pagrįsti infrastruktūros variantai (III, IV, VII, VIII)

- 2.1. Azotas amoniako sintezei tiekiamas per oro atskyrimo įrenginį (ASU).

- 2.2. Jei netoliese nėra ASU (pvz., iš anglies dujinimo įrenginio), infrastruktūroje IV planuojama nauja ASU įranga.
- 2.3. Amoniakas gaminamas Haber-Bosch metodu, suspaudžiamas ir siunčiamas naudotojui.
- 2.4. Paskirties vietoje vandenilis išgaunamas per amoniako skaidymą (III ir IV variantai).
- 2.5. Infrastruktūrose VII ir VIII amoniakas naudojamas tiesiogiai, be pavertimo į vandenilį.

3. Transportavimo priemonės ir atstumai (visuose scenarijuose metanolis ir amoniakas gali būti gabenami keturiais būdais):

- 3.1. Sunkvežimiais (300–1000 km; tinkami atokiems regionams, be uostų ar geležinkelio),
- 3.2. Geležinkeliu (>800 km),
- 3.3. Vamzdynais (1000–4000 km),
- 3.4. Laivais (4000–12000 km).

Įvairūs gamybos ir tiekimo scenarijai bei galutinė paskirtis (STP sąlygomis)*

Scenarijus	Infrastruktūra	Nešiklis	Galutinė paskirtis	Gabenimo ir saugojimo fazė
I	Esama anglimi kūrenama elektrinė + metanolio sintezė + metanolio garinis reformavimas	MeOH	H ₂	Skystis → Skystis (0,1 MPa, 298 K)
II	Naujas tiesioginio CO ₂ surinkimo įrenginys + metanolio sintezė + metanolio garinis reformavimas	MeOH	H ₂	Skystis → Skystis (0,1 MPa, 298 K)
III	Esamas oro atskyrimo įrenginys + amoniako sintezė + amoniako skaidymas	NH ₃	H ₂	Dujos → Skystis (0,11 MPa, 240 K)
IV	Naujas oro atskyrimo įrenginys + amoniako sintezė + amoniako skaidymas	NH ₃	H ₂	Dujos → Skystis (0,11 MPa, 240 K)
V	Esama anglimi kūrenama elektrinė + metanolio sintezė	MeOH	MeOH	Skystis → Skystis (0,1 MPa, 298 K)
VI	Naujas tiesioginio CO ₂ surinkimo įrenginys + metanolio sintezė	MeOH	MeOH	Skystis → Skystis (0,1 MPa, 298 K)
VII	Esamas oro atskyrimo įrenginys + amoniako sintezė	NH ₃	NH ₃	Dujos → Skystis (0,11 MPa, 240 K)
VIII	Naujas oro atskyrimo įrenginys + amoniako sintezė	NH ₃	NH ₃	Dujos → Skystis (0,11 MPa, 240 K)

* STP – standartinė temperatūra ir slėgis (0,1 MPa, 298 K arba 0,11 MPa, 240 K, priklausomai nuo scenarijaus)

Minėto tyrimo rezultatai atskleidžia, kad technologinis efektyvumas priklauso nuo infrastruktūros, masto ir transportavimo priemonės. Šiuo atžvilgiu, laivai yra ekonomiškai efektyviausias būdas gabenti vandenilį bet kurioje analizės situacijoje. Tuo tarpu, sunkvežimiai – brangiausias pasirinkimas: 500 km atstumu LCHT siekia 3161\$ (2 t-H₂/h), kai laivu per 12 000 km – tik 2329\$. Metanolio atveju geležinkeliai yra šiek tiek pigesni už vamzdynus, o amoniako atveju vamzdynai ekonomiškesni nei geležinkeliai.

Rezultatai parodė, kad atstumas ir mastas lemia kaštus, bet ne tiesiškai. Kai transportavimo atstumas padidėja 10 kartų (esant mažam mastui), LCHT padidėja tik nežymiai: sunkvežimiais – +28,4 %, geležinkeliu – +18,8 %, vamzdynais – +37,2 %, laivais – tik +5 %. Didesni mastai (pvz., nuo 2 iki 20 t-H₂/h) leidžia sumažinti LCHT 8–33 %, dėl masto ekonomijos.

Lyginant skirtingas infrastruktūras, metanolio pagrįsta infrastruktūra yra ekonomiškai naudingiausia mažais mastais, kai CO₂ galima gauti pigiai iš šalia esančios elektrinės. Tačiau jei CO₂ surenkamas tiesiogiai iš oro, ši galimybė tampa ekonomiškai neefektyvi. Amoniakų pagrįstos infrastruktūros tampa konkurencingesnės didesniais mastais ir ypač tais atvejais, kai nėra prieigos nei prie esamų oro atskyrimo įrenginių, nei prie pigaus CO₂ šaltinio. Tyrimas atskleidė, kad ekonomiškai naudingiausia infrastruktūra dideliu mastu (20 t-H₂/h) yra amoniakų pagrįstas sprendimas, naudojantis laivų transportą (LCHT –1479\$). Jei nėra galimybės naudoti laivų, tinkamos alternatyvos yra vamzdynai ar geležinkeliai. Energetiniu požiūriu, amoniako infrastruktūra taip pat pasižymi mažiausia vienodine energijos perdavimo kaina (10,1 \$/GJ). Tačiau, kai CO₂ šaltinis yra pigus, o mastai maži, metanolio infrastruktūra gali būti konkurencinga – ypač jei prieinamos tik geležinkelio ar sunkvežimių galimybės. Infrastruktūrų palyginimas pateiktas **2 lentelėje**.

Infrastruktūrų palyginimas:

Infrastruktūra	Nešiklis	CO ₂ /N ₂ šaltinis	Ekonomiškumas	Pastabos
I	Metanolis	CO ₂ iš netoliese esančios elektrinės	Labai gera	Geriausias pasirinkimas esant pigiems CO ₂
II	Metanolis	CO ₂ iš DAC	Neekonomiška	47,7 % brangiau nei I
III	Amoniakas	Esama oro atskyrimo įranga (ASU)	Gera	7,8 % pigesnė nei IV
IV	Amoniakas	Naujas ASU	Vidutinė	Brangesnė, bet vis tiek konkurencinga

Yang et al. (2023) tyrime, kuriame buvo nagrinėjamos vandenilio saugojimo ir transportavimo technologijos, remiantis Vokietijos pavyzdžiu, teigiama, jog skirtingai nei suslėgto vandenilio (CGH₂) ar skysto vandenilio (LH₂) transportavimas, kuris reikalauja itin aukšto slėgio talpų ar ekstremaliai žemos temperatūros palaikymo, vandenilio gabenimas amoniako pavidalu yra gerokai paprastesnis ir techniškai brandesnis sprendimas. Amoniakas gali būti transportuojamas atmosferos slėgiu esant –33 °C arba 25 °C temperatūroje prie 10 barų slėgio – abu šie būdai jau naudojami daugiau nei šimtmetį. Šiandien jūrinio amoniako transportavimo infrastruktūra yra išvystyta, pasaulyje jau pervežama apie 17,5 mln. tonų amoniako per metus, veikia 170 laivų, 38 eksporto ir 88 importo terminalai. Didžioji dalis (80 %) šio kiekio naudojama trąšų gamybai, tačiau teoriniu požiūriu ta pati logistika galėtų būti panaudota ir vandenilio tiekimui, nes gamyba, saugojimas ir gabenimas yra industriniu mastu standartizuoti procesai. Tačiau šis modelis turi ir reikšmingų trūkumų:

1. Amoniako sintezė eksportuojančioje pusėje yra labai imli energijai – netgi didesnė nei vandenilio suskystinimas;
2. Amoniako skaidymas (*cracking*) importuojančioje šalyje papildomai sunaudoja ~20 % vandenilio LHV (žemosios šiluminės vertės);
3. Po skaidymo susidariusį vandenilio ir azoto mišinį dar reikia atskirti, kad būtų galima tiekti gryną vandenilį vartotojams.

Dėl šių energetinių ir technologinių iššūkių, amoniakų grįsta vandenilio tiekimo grandinė šiuo metu laikoma mažiau patrauklia, o jos plėtros planai kol kas apsiriboja tik teoriniais projektais.

Kitoje Vokietijoje atliktoje studijoje, kurią vykdė Schorn su bendraautoriais (2021) teigiama, jog metanolis išsiskiria dideliu energijos tankiu, brandžiomis gamybos technologijomis ir plačiu pritaikomumu, įskaitant esamos kuro infrastruktūros dalinį naudojimą. Tačiau jis turi mažesnį energinį efektyvumą nei tiesioginis elektros ar vandenilio naudojimas, priklauso nuo CO₂ šaltinio, ir konkuruoja su iškastiniu metanolio. Technoekonominė 300 MW metanolio sintezės analizė atskleidė, kad didžiausią įtaką gamybos kainai turi vandenilio ir CO₂ kainos. Šiuo metu atsinaujinančio metanolio gamybos kaina 2–3 kartus viršija iškastinio kuro kainą, tačiau pasiekus vandenilio kainą <2,5 €/kg, metanolio kaina taptų konkurencinga. Jei CO₂ kaina šalyje, kurioje gaminamas vandenilis, neviršija 80 €/t, metanolio importo sąnaudos yra mažesnės nei vandenilio. Laivais transportuojant metanolį iš, pvz., Saudo Arabijos į Vokietiją, abiejų energijos nešiklių importo sąnaudos 2030 m. siektų 25–30 €/GJ (~1 €/IDE), ir tai šiek tiek viršija iškastinio dyzelino kainą (0,59 €/IDE), bet patvirtina metanolio kaip alternatyvos potencialą. Nurodoma, jog metanolio konkurencingumą padidintų CO₂ apmokestinimas ir sertifikavimas. Jei metanolis būtų pageidaujamas nešiklis, bet vandenilį gaminančioje šalyje nėra CO₂ šaltinio, CO₂ kaina paskirties šalyje turėtų būti 181–228 €/t mažesnė nei tiesioginio CO₂ surinkimo išlaidos kilmės šalyje, kad atsvertų brangesnį vandenilio gabenimą. Esant DAC kainai apie 100 €/t, metanolio gamyba kilmės šalyje būtų ekonomiškai pranašesnė.

Apibendrinant galima teigti, jog vandenilio transportavimo ir saugojimo būdai, nuo skysto vandenilio iki cheminių nešiklių, pasižymi skirtingais privalumais ir trūkumais, o galutinio pasirinkimo tinkamumas priklauso nuo daugelio veiksnių: nuo technologinės brandos iki galutinio panaudojimo būdo. Amoniakas (NH₃) yra toksiška medžiaga, todėl saugiam transportavimui ir laikymui būtina įgyvendinti daug apsaugos priemonių. Tačiau pramonė turi ilgametę patirtį dirbant su amoniaku, o ši medžiaga jau plačiai naudojama kaip žaliava bei vis dažniau kaip jūrinis kuras. Tai daro jį iš karto tinkamu naudoti daugelyje procesų analogiškai vandeniliui. Panašų potencialą turi ir metanolis, tačiau jo trūkumas – palyginti didelės sąnaudos, susijusios su vandenilio išskyrimu iš metanolio nešiklio, tačiau šis energijos nešiklis nėra toks toksiškas. Ateinančiais metais praktinė patirtis parodys, kurie vandenilio nešikliai yra patraukliausi. Sprendimus lems technologinė pažanga, kaštų mažėjimas, gabenimo mastai ir galutinio vartojimo pobūdis. Roterdamo uosto išsakyta pozicija teigia, jog būtų neapdairu jau dabar, remiantis esamomis žiniomis, pasirinkti vieną ar dvi konkrečias technologijas. Greičiausiai pasaulinėje praktikoje bus naudojamas įvairių nešiklių derinys, priklausomai nuo kilmės šalies, paskirties, infrastruktūros galimybių ir ekonominio pagrįstumo.

Šiandienos praktika rodo, jog jūrinis transportas yra pagrindinė ir ekonomiškai efektyviausia metanolio gabenimo priemonė Europoje. Europos įmonės naudoja tanklaivius, kurie užtikrina tiek tarpžemyninį, tiek regioninį metanolio tiekimą. Esama infrastruktūra ir patirtis leidžia metanolio transportavimą diegti palyginti greitai ir be didelių pokyčių logistikos grandinėje. Tai ypač svarbu pereinant nuo iškastinių prie atsinaujinančių energijos nešiklių. Pavyzdžiui, *Methanex Europe*, priklausanti Kanados kompanijai *Methanex Corporation*, nors ir negamina metanolio Europoje, yra pagrindinė tiekėja regione. Ji valdo septynias saugojimo bazines šešiose Europos šalyse, kurių bendra talpa siekia apie 135 000 tonų. Logistikai naudojamas mišrus modelis: metanolis į Europą atgabenamas jūriniais tanklaiviais, o regione paskirstomas sunkvežimiais, baržomis, vamzdynais ir geležinkeliu. Net 85 % metanolio gabenimo organizuoja „*Waterfront Shipping*“ – nuosavas *Methanex* jūrinių laivų parkas, sudarytas iš 33 tanklaivių, kurių talpa nuo 3000 iki 50000 dwt¹¹. Šis modelis leidžia lankstų tiekimą ir aprėpia tiek vietinę, tiek tarpžemyninę prekybą. Tuo tarpu *OCI Global*, įsikūrusi Nyderlanduose, yra viena iš pirmaujančių žaliojo metanolio gamintojų Europoje. Bendrovė turi daugiau nei 200 000 tonų metanolio per metus gamybos pajėgumų, kurie artimiausiu metu bus padidinti iki 400 000 tonų. Metanolis eksportuojamas per *Europort* terminalą Roterdame, dažniausiai jūriniais laivais, tiek kaip bunkerinis kuras, tiek kaip žaliava pramonei. Nors konkretūs transportavimo atstumai ar sąnaudos neviešinami, aišku, kad OCI orientuojasi į didelio masto logistiką, išnaudodama Roterdamo uosto infrastruktūrą kaip regioninį distribucijos centrą. *European Energy* kartu su partneriais, Danijoje

¹¹ Deadweight tonnage - viso laivo keliamoji galia arba grynasis tonažas pagal svorį, t.y. tai maksimalus svoris, kurį laivas gali saugiai gabenti.

įgyvendinantys pirmąją pasaulyje komercinio masto e-metanolio gamyklą Kasso miestelyje. Gamykla planuoja gaminti apie 42 000 tonų (53 mln. litrų) e-metanolio per metus, kurio pagrindinis paskirtis yra jūrų transporto kuras. Vienas iš strateginių naudotojų – „Laura Maersk“, pirmasis pasaulyje žalias konteinerinis laivas, kuris reguliariai bunkeruojamas Danijos uostuose ir plaukioja tarp Kasso, Roterdamo bei kitų Šiaurės jūros uostų. Tipiniai atstumai svyruoja nuo kelių šimtų iki tūkstančio kilometrų, o transportas vykdomas specializuotais mažos apimtys tanklaiviais.

Žaliojo metanolio gamyba sparčiai auga, ypač Nyderlanduose ir Danijoje, o gamintojai aktyviai plėtoja tiekimo grandines nuo uosto iki galutinio vartotojo. Transportavimo sąnaudos ir CO₂ šaltinių prieinamumas išliks esminiais veiksniais vertinant, ar metanolis gali tapti konkurencingu vandenilio nešikliu globalioje rinkoje. Nors e-metanolio kaina šiuo metu vis dar didesnė nei iškastinio, augantis mastas ir efektyvėjanti technologija leidžia tikėtis konkurencingų kainų artimiausiu metu.

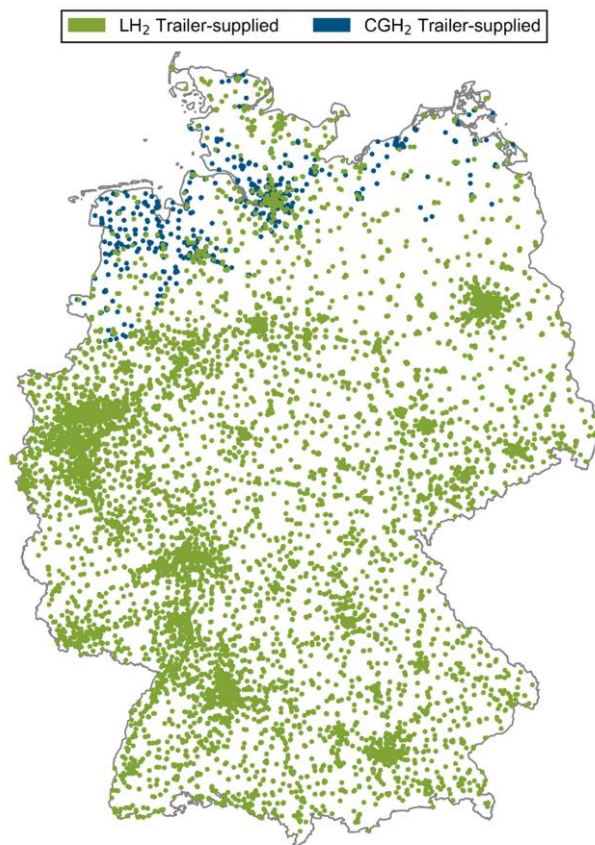
Atsižvelgiant į Europos siekį tapti klimatui neutraliu regionu, amoniakas taip pat gali atlikti reikšmingą vaidmenį ne tik kaip produktas, bet ir kaip transportuojamos energijos forma. Tačiau dėl jo toksiškumo, energetinių sąnaudų sintezės ir skaidymo metu, bei kompleksinės logistikos grandinės, šio energijos nešiklio vystymas reikalauja kruopštaus vertinimo. Amoniakas Europoje gabenamas laivais, sunkvežimiais, geležinkeliu ir vamzdynais. Jūrinis transportas – labiausiai išvystytas, ypač uostų infrastruktūrą turinčiose šalyse. Vamzdynai taip pat yra nepakeičiami regioniniam aukštos apimtys tiekimui. Tarptautinė energetikos agentūra (IEA) skaičiuoja, kad amoniako gabenimo sąnaudos siekia apie 1,9–2,2 USD/kgH₂, tai yra mažiau nei skysto vandenilio transporto (3–4 USD/kgH₂), ir panašu į LOHC nešiklių logistiką. Tačiau dėl didelio toksiškumo, amoniako transportavimas reikalauja aukšto lygio saugos priemonių – specialių cisterninių vagonų, jutiklių sistemų ir riboto talpyklų dydžio. Visos logistikos grandinės turi būti sertifikuotos pagal griežtus reglamentus. Reikia nepamiršti, jog didžioji dalis amoniako Europoje vis dar gaminama iš iškastinio kuro (pavyzdžiui, naudojant gamtines dujas). Tačiau vystomi projektai, kaip *TotalEnergies* planai gaminti žaliąjį amoniaką Maroke eksportui į Europą, formuoja pirmąsias tvarias tiekimo grandines. *Trafigura* bendradarbiaudama su *CF Industries*, viena didžiausių pasaulio amoniako gamintojų, neseniai pradėjo vykdyti kombinuotus krovinius pervežimus, gabenant amoniaką ir suskystintas dujas tuo pačiu laivu. Tai žymi technologinį proveržį jūriniame transporte: specialūs daugiafunkčiai tanklaiviai gali efektyviai pervežti kelias medžiagas vienu reisui. Šis modelis leidžia optimizuoti transporto kaštus bei sumažinti CO₂ pėdsaką. Nors *Trafigura* labiau žinoma kaip prekiautoja, jos gebėjimas koordinuoti globalų žaliavų transportą pozicionuoja ją kaip reikšmingą amoniako logistikos žaidėją Europoje, ypač tarp Šiaurės Amerikos, Viduržemio jūros ir Šiaurės jūros uostų.

Pramonės parkai, tokie kaip *Marl* tampa esminiais centrais, kuriuose galimas žalias amoniako konversijos, laikymo ir platinimo ciklas, sumažinantis papildomo transportavimo poreikį ir leidžiantis operatyviai reaguoti į energijos poreikių svyravimus. *Marl Chemical Park* Vokietijoje yra vienas didžiausių chemijos pramonės kompleksų Europoje. Čia vystoma mišri logistika: amoniakas transportuojamas tiek geležinkeliu, tiek vidaus vandens keliais, tiek regioniniais vamzdynais. Komplexas apima net 1 200 km vamzdynų tinklą. Tokie pramonės centrai tampa logistikos mazgais, leidžiančiais ne tik saugoti ir skirstyti amoniaką, bet ir integruoti jį į žaliąsias tiekimo grandines, susiejant su elektrolizės, trąšų gamybos ar net kuro gamybos grandimis.

Apibendrinimas

Norint rasti pigiausią ir efektyviausią būdą gabenti vandenilį, svarbu ne tik žinoti, kiek jo reikia ir koku atstumu jį reikia pervežti, bet ir suprasti, kaip pasirengimas transportui bei energijos nuostoliai veikia galutinę kainą. Nors suskystintas vandenilis (LH₂) atrodo pigesnis gabenant didesniais atstumais, trumpesniais keliais dažnai labiau apsimoka naudoti suslėgtą vandenilį (CGH₂), ypač kai tiekimo grandinė paprasta. Kai atstumai tampa didesni, svarbūs tampa ne tik garavimo nuostoliai, bet ir pasiruošimo bei atkūrimo procesai. Kaip

pavyzdį galima pateikti Vokietijos žemėlapy, kuris gerai parodo, kur tikslinga gabenti suskystintas vandenilis, o kur suslėgtą vandenilį (7 pav.).



7 paveikslas. Results of the distribution optimization for each fueling station as a function of the transport costs (pagal Reuß ir kt., 2021)

Jei gamintojas ir vartotojas nėra sujungti vamzdynu, o kiekiai dideli – vandenilio gabenimas laivais tampa viena realiausių alternatyvų. Čia svarbu pasirinkti tinkamą formą: CGH₂ tinka trumpiems atstumams, LH₂ siūlo didelį energijos tankį, bet reikalauja sudėtingos kriogeninės infrastruktūros, o amoniakas ir LOHC yra patogūs logistikai, tačiau brangūs vandenilio išgavimui. Tiesa, amoniakas turi pranašumą – jį galima naudoti tiesiogiai kaip kurą ar žaliavą, o tai gali būti aktualu chemijos pramonei.

Apibendrinant, nėra vieno geriausio sprendimo – transportavimo būdas turi būti pasirenkamas atsižvelgiant į konkrečius poreikius, atstumą, infrastruktūrą ir galimybes naudoti sektorių sąveikas (pvz., atliekos šilumos naudojimą). Tyrimai rodo, kad CGH₂ vamzdynai ir LH₂ laivyba yra konkurencingiausi ilgam atstumui, o CGH₂ keliais – trumpam. LOHC ir amoniakas – perspektyvūs ten, kur svarbi sandėliavimo ir saugumo infrastruktūra.

Literatūros šaltiniai

1. EWI – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. (2024). *Die Bedeutung von Wasserstoffspeichern für eine klimaneutrale Energieversorgung*. Universität zu Köln. Prieiga internetu: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2024/03/EWI_Die-Bedeutung-von-Wasserstoffspeichern.pdf
2. A. Shogenova, S. Sliupa ir K. Shogenov. Underground Hydrogen Storage in the Baltic Countries: Future Outlook for Lithuania. 2022. European Association of Geoscientists & Engineers. Volume 2022, p.1 – 5.
3. Collis, J., & Schomäcker, R. (2022). Determining the production and transport cost for H₂ on a global scale. *Frontiers in Energy Research*, 10, 909298. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.909298>
4. Yang, M., Hunger, R., Berrettoni, S., Sprecher, B., & Wang, B. (2023). A review of hydrogen storage and transport technologies. *Clean Energy*, 7(1), 190–216. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad021>
5. Ball, M. and Weeda, M., 2016. The hydrogen economy—vision or reality? In: M. Ball, A. Basile and T.N. Veziroğlu, eds. *Compendium of Hydrogen Energy*. Oxford, UK: Woodhead Publishing, pp. 237–266.
6. Collis, J., & Schomäcker, R. (2022). *Determining the production and transport cost for H₂ on a global scale*. *Frontiers in Energy Research*, 10, Article 909298. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.909298>
7. Hexagon Purus. (2021). X-STORE Gas Container Modules Version ADR V2 – Full Carbon Design 500 Bar H₂. California Hydrogen Business Council. Prieiga per internetą: <https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/2021/06/Hexagon-Purus-X-STORE-Gas-Container-Modules-Version-ADR-V2-Full-Carbon-Design-500Bar-H2-1.pdf>
8. Galassi, M. C., Baraldi, D., Iborra, B. A., et al. (2012). CFD analysis of fast filling scenarios for 70 MPa hydrogen Type IV tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 6886–6892. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.108>
9. Reuß, M., Dimos, P., Léon, A., et al. (2021). Hydrogen road transport analysis in the energy system: A case study for Germany through 2050. *Energies*, 14(11), 3166. <https://doi.org/10.3390/en14113166>
10. U.S. Department of Energy. Hydrogen Tube Trailers. Prieiga internetu: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-tube-trailers>
11. Petitpas, G. Boil-off Losses along LH₂ Pathway. Technical Report LLNL-TR-750685, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA, 2018.
12. Włodek, T., Łaciak, M., Kurowska, K., et al. (2016). Thermodynamic analysis of hydrogen pipeline transportation: Selected aspects. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 33, 379–396.
13. Holbrook, J. H., Cialone, H. J., Collings, E. W., et al. (2012). Control of hydrogen embrittlement of metals by chemical inhibitors and coatings. In Gangloff, R. P., & Somerday, B. P. (Eds.), *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies. Volume 2: Mechanisms, Modelling and Future Developments* (pp. 129–153). Sawston, UK: Woodhead Publishing.
14. Cerniauskas, S., Junco, A. J. C., Grube, T., et al. (2020). Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 12095–12107.
15. Kussmaul, K. (1998). Fracture mechanical behaviour of the steel 15MnNi6-3 in argon and in high-pressure hydrogen gas with admixtures of oxygen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23, 577–582.
16. Michler, T., Boitsov, I. E., Malkov, I. L., et al. (2012). Assessing the effect of low oxygen concentrations in gaseous hydrogen embrittlement of DIN 1.4301 and 1.1200 steels at high gas pressures. *Corrosion Science*, 65, 169–177.

17. Michler, T., Boitsov, I. E., Malkov, I. L., et al. (2012). *Assessing the effect of low oxygen concentrations in gaseous hydrogen embrittlement of DIN 1.4301 and 1.1200 steels at high gas pressures*. Corrosion Science, 65, 169–177.