



**VILNIUS
TECH**

Transporto inžinerijos
fakultetas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Transporto inžinerijos fakultetas

Vandenilio transportavimo galimybių techninis vertinimas

Autoriai: doc. dr. Saugirdas Pukalskas

prof. dr. Alfredas Rimkus

prof. dr. Darius Bazaras

Vilnius
2025

Turinys

1. ĮVADAS	2
2. VANDENILIS.....	3
3. AMONIAKAS.....	12
4. METANOLIS	14
5. ĮVAIRIŲ TRANSPORTAVIMO BŪDŲ PALYGINIMAS.....	16
6. SUSIJĘ PROJEKTAI	19
PRIEDAS 1. SUSLĖGTŲ DUJŲ (H₂) BALIONŲ TIPAI	20

1. ĮVADAS

Pastaraisiais dešimtmečiais augantis susirūpinimas dėl klimato kaitos, iškastinio kuro naudojimo pasekmių ir energetinio saugumo skatina ieškoti alternatyvių, tvarių energijos šaltinių. Vienu iš perspektyviausių sprendimų laikomas vandenilis – universalūs, aukštos energetinės vertės degalai, kurie degdami neišskiria anglies dioksido. Dėl šių savybių vandenilis įvardijamas kaip svarbus būsimos energetikos grandinės elementas, ypač sunkiai dekarbonizuojamuose sektoriuose, tokiuose kaip pramonė, aviacija, laivyba ar ilgojo nuotolio transportas.

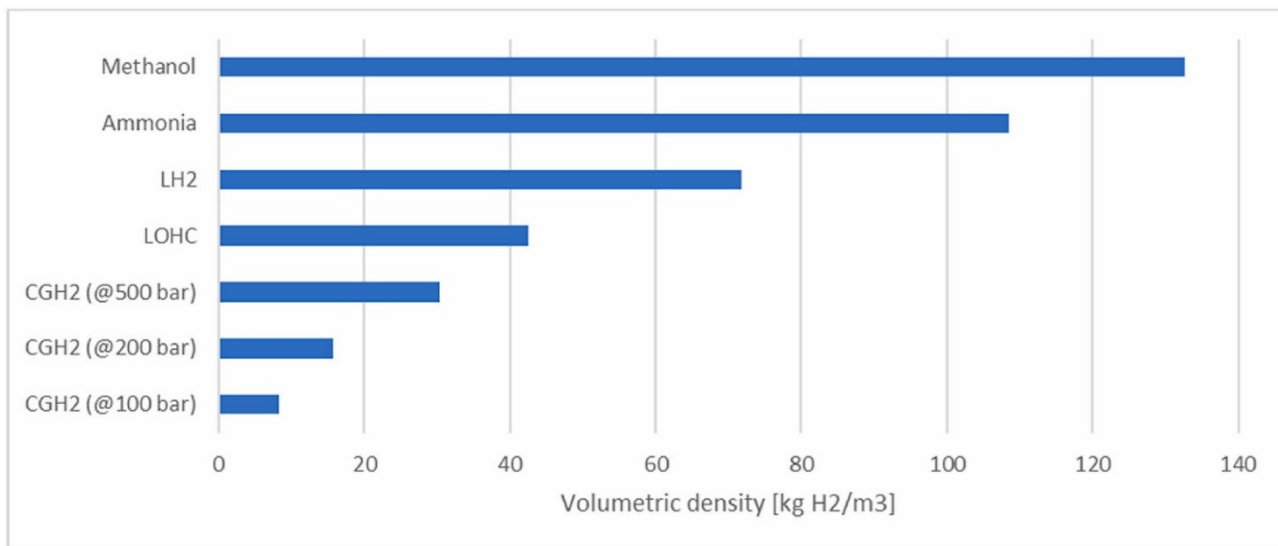
Vandenilio tiekimo grandinė – nuo gamybos iki galutinio vartojimo – susideda iš kelių etapų, tarp kurių vienas svarbiausių yra transportavimas. Dėl vandenilio fizinių savybių – mažo tankio, didelio lakumo, sprogo ribų platumo ir sąveikos su medžiagomis – jo transportavimas kelia savitų techninių, saugumo bei ekonominių iššūkių. Tinkamo transportavimo būdo parinkimas tiesiogiai lemia vandenilio tiekimo sistemos patikimumą, efektyvumą, saugumą ir kainą.

Šia studija siekiama atlikti išsamų vandenilio transportavimo galimybių techninį vertinimą, apžvelgiant ir įvertinant skirtingas technologines alternatyvas – suslėgto, suskystinto vandenilio gabenimą, transportavimą vamzdynais bei cheminių junginių (pvz., amoniako ar metanolio) pavidalu. Analizė grindžiama techniniais, logistiniais ir saugos kriterijais, siekiant nustatyti tinkamiausius sprendimus skirtingiems scenarijams: tiek vietiniam tiekimui, tiek tarptautiniam transportavimui.

2. VANDENILIS

Vandenilis vaidina pagrindinį vaidmenį pereinant prie tvaresnio energijos modelio. Vandenilis yra kuras, turintis didžiausią energijos kiekį masės vienetu (120 MJ/kg), o jį naudojant į atmosferą išsiskiria vanduo ir deguonis. Tačiau dėl mažo tūrinio tankio aplinkos sąlygomis ($0,0824 \text{ kg/m}^3$), mažesnio nei trečdalis gamtinių dujų tankio, jis negali konkuruoti su iškastiniu kuru nepakeitęs savo būsenos transportavimo ir saugojimo etape (Cava et al. 2025). Vandenilio transportavimas yra sudėtingas dėl jo fizinių savybių. Palyginti su metanu, jo energijos tankis svorio vienetui yra didesnis (H_2 : $33,3 \text{ kWh/kg}$, palyginti su CH_4 : $13,9 \text{ kWh/kg}$), o energijos tankis tūrio vienetui – mažesnis (H_2 : 3 kWh/m^3 , palyginti su CH_4 : 10 kWh/m^3 aplinkos sąlygomis). Tai reiškia, kad norint transportuoti tą patį energijos kiekį, reikia transportuoti didesnius vandenilio tūrio kiekius, lyginant su gamtinėmis dujomis. Siekiant išvengti šio trūkumo, vandenilis turi būti apdorojamas, siekiant sumažinti jo tūrį transportavimo ir (arba) saugojimo metu. Šiuo metu galimi apdorojimo būdai apima suslėgimą, skystinimą, skysto organinio vandenilio nešiklio (LOHC) naudojimą ir pavertimą amoniaku, metanolu arba sintetiniais degalais (Cvetkovska, Wechner, and Kienberger 2025).

Vandenilio transportavimas tampa itin svarbus, kai elektrolizerių įrenginiai nėra arti tų vietovių, kur reikia vandenilio. Vandenilio transportavimui iš gamybos centrų į pramonės objektus reikalingos efektyvios ir patikimos transporto priemonės. Yra keletas transporto priemonių, tokių kaip sunkvežimiai, laivai, geležinkeliai ir vamzdynai. Norint efektyviai transportuoti, vandenilis turi būti suslėgtas, suskystintas arba paverstas kitais didelės energijos nešikliais, tokiais kaip amoniakas, metanas, metanolis, skystos organinės molekulės arba skysti angliavandeniliai. Šios alternatyvos pasižymi didesniu energijos tankiu (1 pav.) ir gali naudoti esamą paskirstymo infrastruktūrą. Kiekvienas metodas ar apdorojimo būdas turi savų iššūkių ir apribojimų, o jų tinkamumas priklauso nuo konkretaus galutinio naudojimo ir atstumo reikalavimų (Cvetkovska et al. 2025).



1 pav. Tūrinis energijos tankis, esant skirtingoms vandenilio transportavimo ir saugojimo galimybėms (Cvetkovska et al. 2025)

Aukšto slėgio suslėgimas šiuo metu yra labiausiai išvystytas ir plačiausiai naudojamas vandenilio laikymo ir transportavimo metaliniuose arba kompoziciniuose cilindrinuose balionuose, kurių slėgis siekia iki 700 barų, metodas. Tačiau tam reikia daug energijos, nes suslegiant sunaudojama maždaug 13–18 % vandenilio žemutinės šiluminės vertės (Usman 2022). Arba suskystinimas padidina tūrinį tankį iki 71 kg/m^3 esant -253°C temperatūrai ir atmosferos slėgiui, tačiau tam reikia 30–40 % vandenilio žemutinės šiluminės vertės (Faye, Szpunar, and Eduok 2022).

Paprastai yra trys pagrindiniai vandenilio paskirstymo būdai, kurių tinkamumas priklauso nuo paklausos dydžio ir transportavimo atstumo (1 lentelė). Suslėgto vandenilio transportavimas balionų priekabomis greičiausiai bus naudingas pradiniam diegimo etapui, tuo tarpu vamzdynai geriau tinka masiniam diegimui. Vamzdynai galėtų užtikrinti tiekimo infrastruktūros plėtrą plačiu mastu, jei vandenilis būtų naudojamas ne tik transporte, bet ir šilumos, elektros energijos gamyboje bei pramonėje. Suskystinimas galėtų būti naudojamas tarptautiniam didelio kiekio vandenilio transportavimui jūra, o suskystinto vandenilio paskirstymas sausumos keliais galėtų būti apribotas tik kai kuriems sunkiojo transporto sektoriams. (Staffell et al. 2019).

1 lentelė. Vandenilio perdavimo ir paskirstymo technologijų transporto sektoriuje kokybinė apžvalga (Staffell et al. 2019)

Platinimo kelias	Talpa	Transporto atstumas	Energijos nuostoliai	Fiksuotos išlaidos	Kintamos išlaidos
Gamyba vietoje	Žemas	Nulis	Žemas	Žemas	Aukštas
Dujų balionų priekabos	Žemas	Žemas	Žemas	Žemas	Aukštas
Suskystintų dujų tanklaiviai	Vidutinis	Aukštas	Aukštas	Vidutinis	Vidutinis
Vandenilio vamzdynai	Aukštas	Aukštas	Žemas	Aukštas	Žemas

Vandenilis iš vamzdynų ir saugyklų. Vandenilis, išgaunamas iš vamzdynų ir (arba) druskos ertmių saugyklų, prieš naudojant jį kuro elementais varomose transporto priemonėse (FCEV), turi būti išvalomas vietoje, siekiant pašalinti tepalus, kvapiąsias medžiagas, dažiklius, dulkes ar kitas priemaišas, kurios galėjo būti įgytos transportavimo metu. Kvapiosios medžiagos greičiausiai būtinos, kad būtų galima įspėti apie nuotėkius. Japonijoje cikloheksenas buvo pripažintas suderinamu su kuro elementų (angl. *fuel cells*) technologija, tačiau jis apibūdinamas kaip pernelyg malonaus kvapo ir neturintis stipraus kvapo, būdingo šiuo metu ES naudojamiems kvapikliams. Gali būti reikalingas ir dažiklis, įspėjantis apie gaisrus, nes vandenilis dega bespalvė liepsna. Šiuo metu svarstoma galimybė naudoti labai praskiestą stroncio tirpalą. Galimas ir vietinis vandenilio valymas naudojant PSA (slėgio svyravimo adsorbciją) arba aktyvintos anglies filtrus. Šiuo metu vandenilio išvalymo iš vamzdynų sąnaudos nėra aiškiai nustatytos ir reikalauja tolimesnių tyrimų. (Staffell et al. 2019).

Transportavimas sunkvežimiais – dujų balionų priekabomis. Plačiausiai naudojamas vandenilio saugojimo būdas yra suslėgtas vandenilis esant aukštam slėgiui. Vandenilio suslėgimas yra ne tik gerai išvystyta technologija, bet ir pasižymi dideliu vandenilio užpildymo ir išleidimo greičiu. Be to, vandenilio išleidimui nenaudojama energija. Tačiau vandenilio suslėgimas iki aukšto slėgio sunaudoja apie 13–18 % žemutinio H₂ šilumingumo vertės, o tai turi įtakos bendram proceso ekonomiškumui. Vandenilis laikomas cilindrinuose induose, nes sferinius indus sunku įmontuoti. Reikalinga lengva ir nebrangi indo medžiaga, kuri atlaikytų aukštą slėgį. Pasirinkta medžiaga turi būti atspari vandenilio difuzijai ir galimam trapumui, kurį sukelia saugomas vandenilis. Remiantis minėtais kriterijais, suslėgto vandenilio dujoms laikyti naudojami keturių skirtingų tipų indai (Priedas 1) (Usman 2022).

I tipas: tai pigiausias variantas. Indai pagaminti iš metalinių medžiagų ir gali atlaikyti iki 30 bar slėgį. Esant dideliame vandenilio slėgiui ar tankiui, metalinė sienelė turi būti gana stora. Tai padidina indo svorį ir žymiai sumažina grynąjį vandenilio masinį energijos tankį. Indai pasižymi itin mažu masiniu energijos tankiu, nes praktiškai sėkmingai kaupiama tik apie 1 % masės H₂. Dažniausia konstrukcijos medžiaga yra plienas arba aliuminio lydinys.

II tipas: šiuose induose metalinė sienelė cilindrinėje dalyje yra apvyniota pluošto dervos kompozitu. Palyginti su I tipu, jie sveria 30–40 % mažiau, tačiau kainuoja 50 % brangiau.

III tipas: jie pagaminti iš anglies pluošto kompozicinių medžiagų (anglies pluoštu armuoto plastiko, CFRP), padengtų metalu, pavyzdžiui, aliuminiu. Jie yra tvirti ir lengvi, tačiau pasižymi mažu šilumos laidumu, kuris gali sukelti problemų dėl mažo šilumos išsiskyrimo greičio vandenilio suspaudimo metu. Jie tinka iki 450 bar slėgiui, tačiau juos galima naudoti iki 700 bar H_2 slėgio.

IV tipas: panašiai kaip III tipo, jie pagaminti vien iš kompozicinių medžiagų, tačiau skiriasi nuo III tipo tuo, kad įdėklas daugiausia yra polimerinis, pavyzdžiui, didelio tankio polietileno (HDPE) ir beveik be metalo, o III tipo įdėklas daugiausia yra metalinis, kuris sudaro ≥ 5 % mechaninio stiprumo. Jie taip pat naudojami vandeniliui laikyti esant 700 barų slėgiui. „Hexagon Composites“ arba „NPROXX“ IV tipo cilindrai yra polimeru išklotos, filamentu vyniotos anglies pluoštu armuotos polimero (CFRP) struktūros.

V tipo indas yra IV tipo modifikacija su sutvirtinančiais erdvės užpildymo karkasais ir suprojektuotas taip, kad turėtų dar didesnę vandenilio tūrinę ir masinę tankį. Tačiau šie indai kol kas nėra komerciškai prieinami.

Vienas iš sprendimų, tinkamas esant nedidelei paklausai, pvz., pradinio diegimo etape, yra vandenilio tiekimas iš centralizuotų gamybos vietų suslėgtų dujų pavidalu balionų priekabose. Šis būdas yra gerai išstobulintas – didelės priekabos, skirtos kuro elementais varomų transporto priemonių (FCEV) papildymui, gali talpinti iki 1000 kg vandenilio esant 500 bar slėgiui. Priekaba gali būti paliekama degalinėje, kad būtų galima tiesiogiai pildyti transporto priemones, taip sumažinant vietoje reikalingą saugojimą ir papildomo suslėgimo poreikį, nes suslėgimas pradedamas nuo jau aukšto slėgio. Tačiau toks sprendimas užima vertingą degalinės plotą ir vėlina priekabos grąžinimą kitam užpildymui. Balionų priekabų naudojimas tampa mažiau ekonomiškai didėjant paklausai ir didesniais atstumais, tačiau jos išlieka patrauklus trumpalaikis sprendimas, nes nereikalauja didelių investicijų į infrastruktūrą ir kelia mažesnę riziką. Ilgalaikėje perspektyvoje tai vis dar gali būti geriausias variantas atokiems arba mažos paklausos regionams (Staffell et al. 2019).

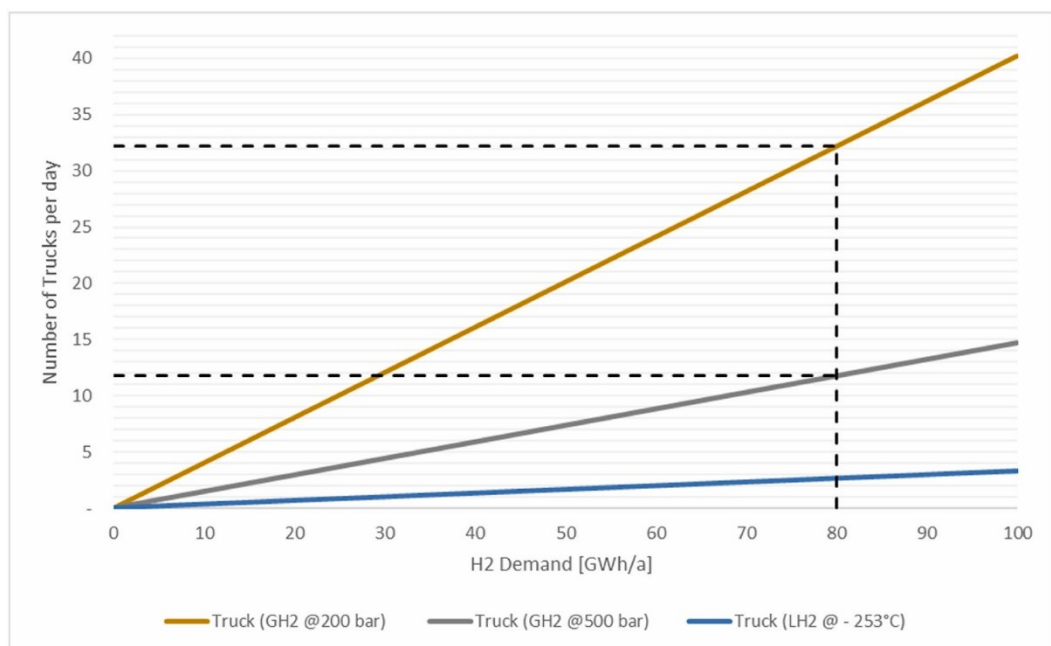
Vandenilis gali būti gabenamas dujų balionų priekabose suslėgtoje formoje, esant 100–700 barų slėgiui. Šiuo metu didžiausia dujiniam vandeniliui gabenti cisterna yra 26 m³. Esant 500 barų slėgiui, dėl padidėjusio tankio vieno sunkvežimio transportavimo pajėgumas siekia iki 857 kg H_2 (28 MWh). Suslėgto vandenilio transportavimas sunkvežimiais yra tinkamas pasirinkimas trumpiems atstumams, paprastai iki kelių šimtų kilometrų, ir kai gabenami nedideli kiekiai (Cvetkovska et al. 2025).

Didžiausias gabenamas vandenilio kiekis priklauso nuo balionų svorio. Pavyzdžiui, priekaba su plieniniais balionais gali talpinti iki 25 000 l vandenilio, suslėgto iki 200 bar, o tai atitinka 420 kg H_2 . Tačiau norint padidinti transportuojamo vandenilio kiekį, taip pat gaminamos lengvesnės talpyklos, kurios gali atlaikyti didesnę slėgį, kad būtų galima gabenti didelius vandenilio kiekius vienoje priekaboje. Itin lengvi balionai, pagaminti iš anglies pluošto kompozito su didelio tankio polietileno įdėklais, gali gabenti iki 39 600 l vandenilio. Tiriami H_2 konteineriai, kurių maksimalus slėgis yra 200 barų, skirti maždaug 666 kg H_2 talpinimui (Faye et al. 2022).

Suskystinto vandenilio transportavimas sunkvežimiais. Ilgesniems atstumams vandenilis paprastai transportuojamas skystame pavidale, tačiau tam jį reikia atvėsinti iki itin žemos $-253^{\circ}C$ ar dar žemesnės temperatūros. Toks sunkvežimis gali transportuoti iki 3500 kg (116 MWh) skysto vandenilio (International Energy Agency IEA 2019). Suskystinto vandenilio cisternų talpos paprastai siekia 2000–7500 kg, o tankis jose yra didesnis nei suslėgto vandenilio talpyklose. Tai tikėtina sukeltų papildomus saugumo reikalavimus, panašius į taikomus pramoninėse aikštelėse, kuriose naudojamas vandenilis. Nors iš pradžių buvo susidomėjimo naudoti suskystintą vandenilį transporto priemonėms, tačiau garavimas (angl. *boil-off*) sukelia

didelį vandenilio nuostolį, ypač retai naudojamose transporto priemonėse, ir gali būti nesaugus laikymui uždaroje patalpoje. Nors mažiau suslėgtas vandenilis užtikrina pakankamą nuvažiuojamą atstumą lengvosios transporto priemonėms, sunkiojo transporto sektoriui (pvz., sunkvežimiams ir laivams) vis dar tinkamesnis gali būti suskystintas vandenilis (Staffell et al. 2019).

Atliekant tyrimą buvo išsamiai išnagrinėtos dvi galimybės: dujinio ir skysto vandenilio transportavimas, darant prielaidą, kad metinis vandenilio poreikis yra 80 GWh. Nagrinėtu atveju, priklausomai nuo slėgio (nuo 200 iki 500 barų) ir atsižvelgiant į transportavimo pajėgumus, metiniam vandenilio poreikiui patenkinti reikėtų nuo 11 iki 30 sunkvežimių per dieną (2 pav.). Tačiau tiek sunkvežimių pristatymas per dieną atrodo neįtikėtinas, atsižvelgiant į tipiškas dienos darbo valandas, nes vieno sunkvežimio iškrovimas užtruktų maždaug 0,5 val., priklausomai nuo vietos infrastruktūros. Skystojo vandenilio tankis ($71,7 \text{ kg/m}^3$) yra žymiai didesnis, palyginti su dujiniu vandeniliu ($15,7 \text{ kg/m}^3$ esant 200 bar slėgiui, 33 kg/m^3 esant 500 bar slėgiui), todėl norint pristatyti skystą vandenilį, reikėtų maždaug 3 sunkvežimių per dieną (Cvetkovska et al. 2025).



2 pav. Sunkvežimių skaičiaus priklausomybė nuo skirtingo vandenilio kiekio, skirto trims transportavimo būdams: CGH₂ esant 200 barų slėgiui, CGH₂ esant 500 barų slėgiui ir LH₂ (Cvetkovska et al. 2025)

Vandenilio transportavimas geležinkelių transportu. Vandenilio transportavimas vykdomas skystu pavidalu specialiais vandenilniais geležinkelio vagonais. Šiais laikais transportuojami tik nedideli vandenilio kiekiai, daugiausia chemijos ir naftos chemijos pramonei, kur jis naudojamas kaip žaliava daugelyje procesų. Austrijos ir Vokietijos geležinkelių krovinių gabenimo įmonės dirba ties būsimais transporto maršrutais, kad galėtų tiekti didesnius vandenilio kiekius potencialiems pramonės vartotojams. Vieno geležinkelio vagono talpa buvo nustatyta naudojant skystų dujų transportavimui skirtą geležinkelio vagono specifikacijas. Kiekvieno geležinkelio vagono transportavimo tūris yra 110 m^3 , o įskaičiavus skysto vandenilio tankį ($71,1 \text{ kg/m}^3$), tai reiškia 7,8 t (257 MWh) vandenilio talpą vienam geležinkelio vagonui. Tai yra maždaug dvigubai daugiau nei skysto vandenilio transportavimas sunkvežimiu (Cvetkovska et al. 2025).

Vandenilio dujotiekiai. Didėjant vandenilio kiekiui ir transportavimo atstumui, sunkvežimiai ir geležinkeliai tampa mažiau praktiški. Tokiais atvejais suslėgto vandenilio vamzdynai yra perspektyvi alternatyva. Ypač ekonomiškai naudinga atnaujinti esamus gamtinių dujų vamzdynus, palyginti su naujų tiesimu (Cihlar 2020).

Europoje ir Šiaurės Amerikoje jau naudojama apie 3000 km aukšto slėgio vandenilio vamzdynų, daugiausia pramonės reikmėms. Tačiau aukštos sąnaudos stabdo naujų vamzdynų plėtrą, kol nėra užtikrinta pakankama ir pastovi vandenilio paklausa. Mažas pradinis vamzdyno panaudojimo lygis ir didelės pradinės investicijos apsunkina tokios infrastruktūros finansavimą. Esami aukšto anglies kiekio plieno vamzdynai, naudoti gamtinėms dujoms, gali tapti netinkami, jei būtų pritaikomi vandeniliui, dėl vadinamojo vandenilio trapumo (angl. *embrittlement*). Todėl reiktų naujų, aukštos kokybės plieno konstrukcijų. Vandenilio trapumas nėra problema žemo slėgio sąlygomis, o naujesni polietileniniai gamtinių dujų vamzdžiai, šiuo metu diegiami Jungtinėje Karalystėje ir Europoje, yra suderinami su vandeniliu. Šie polietileniniai vamzdžiai šiuo metu ribojami iki 7 bar slėgio, tačiau jau siūloma naudoti didesnio skersmens plastikinius vamzdžius iki 17 bar. Vandenilio vamzdynai pasižymi ilga eksploataavimo trukme (50–100 metų), tačiau plieninių vamzdynų trapumo tempas gali apsunkinti tikslų jų ilgaamžiškumo prognozavimą.

Austrijoje specialūs vandenilio vamzdynai, skirti transportuoti tik pramonės teritorijų ribose, yra naudojami tik keliose pramonės vietovėse. Austrijos dujų tinklo valdymo įmonė (AGGM) neseniai paskelbė galimus planus dėl esamų ir naujų specializuotų vandenilio vamzdynų pritaikymo didžiausių pramonės vartotojų poreikiams bei vandenilio importo ir eksporto poreikių tenkinimo nustatytais importo/eksporto maršrutais. Šie planai grindžiami numatoma vandenilio paklausa nuo 2026 m. (Cvetkovska et al. 2025)

Vandenilio maišymas su gamtinėmis dujomis. Vandenilį galima saugiai maišyti mažais kiekiais su gamtinėmis dujomis ir tiekti per esamą dujų tinklą, tačiau administraciniai ir techniniai apribojimai riboja leidžiamą vandenilio dalį mišinyje. Saugi vandenilio koncentracija priklauso nuo konkrečios paskirstymo sistemos ir galutinių vartotojų įrenginių. Jungtinėje Karalystėje ir JAV galioja vieni žemiausių teisinių ribojimų pasaulyje – tik 0,1 % vandenilio, palyginti su 10–12 % tūrio koncentracija Vokietijoje ir Nyderlanduose. Šiuo metu vykdomi tyrimai siekia patikslinti leidžiamos H₂ koncentracijos ribas.

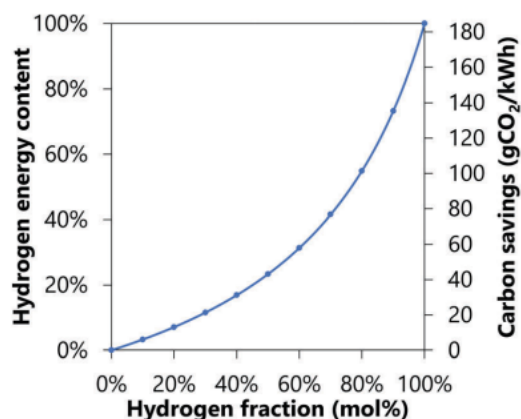
Nyderlandų tyrimas parodė, kad įprastiniai buitinių dujų įrenginiai veikė be didesnių problemų, kai dujų mišinyje buvo iki 20 % vandenilio (pagal tūrį). Panašiai Jungtinės Karalystės Sveikatos ir saugos laboratorija padarė išvadą, kad 20 % vandenilio dalis greičiausiai nepakenktų JK dujų tinklui ar daugumai prietaisų, tačiau esant didesnėms nei 10 % koncentracijoms, būtina nustatyti ir modifikuoti pažeidžiamus įrenginius.

Kadangi vandenilis pasižymi skirtingomis degimo savybėmis, jis gali sąveikauti skirtingai su įvairiais dujų įrenginiais, kurių daugelis įrengti prieš kelis dešimtmečius. Net jei būtų leidžiama maišyti iki 20 % vandenilio pagal tūrį, tai atitiktų tik apie 7 % pagal energijos kiekį, nes vandenilio tankis yra mažesnis nei metano. Vandenilio energijos dalis (EH) apskaičiuojama iš vandenilio tūrio dalies (VH) ir metano tūrio dalies (VM) pagal formulę:

$$E_H = (V_H \times 11,88) / (V_H \times 11,88 + V_M \times 39,05)$$

kur 11,88 ir 39,05 yra vandenilio ir metano viršutinis šilumingumas pagal tūrį (MJ/m³), o $V_M = 1 - V_H$ (pagal apibrėžimą).

Tiesioginis anglies dioksido emisijų sumažinimas, maišant 20 % vandenilio pagal tūrį, būtų apie 13 gCO₂/kWh (3 pav.).



3 pav. Energijos kiekio, anglies taupymo ir vandenilio įterpiamo kiekio tarpusavio ryšys (Staffell et al. 2019)

Todėl vien vandenilio maišymo nepakaktų siekiant visiškos dujų tinklų dekarbonizacijos. Vis dėlto toks kiekis padengtų didžiąją dalį iki 2030 m. reikalingo emisijų mažinimo JK pastatų sektoriuje (apie 10 % sumažinimas nuo 2015 m. emisijų), neįskaitant vandenilio tiekimo grandinės emisijų (Staffell et al. 2019).

Gamtinių dujų tinklo konvertavimas į vandenilio gavybos tinklą. Alternatyva maišymui – visiškai esamų gamtinių dujų paskirstymo tinklų pertvarkymas vandenilio tiekimui. Vartotojų pasitenkinimas dujiniu šildymu rodo, kad tai galėtų būti populiarus mažai anglies dioksido išskiriantis pasirinkimas. Aštuntajame dešimtmetyje Didžioji Britanija per 11 metų palaipsniui perėjo nuo miesto dujų prie gamtinių dujų, lygiagrečiai pertvarkant visus tinklus. Ankstyvieji skaitiniai tyrimai parodė, kad perėjimas prie vandenilio gali būti techniškai įmanomas ir ekonomiškai perspektyvus. Tokia transformacija greičiausiai užtruktų 10–20 metų, o kiekvieno pastato prietaisai būtų sistemingai pertvarkomi arba pakeičiami ir kruopščiai planuojama, siekiant užtikrinti tiekimo tęstinumą (Staffell et al. 2019).

Suskystinto vandenilio transportavimas laivais. Vienintelis šiuo metu naudojamas laivas yra „Suiso Frontier“ – dyzelinu varomas skysto vandenilio (LH₂) pilotinis laivas, kurio dedveito tonažas (DWT) yra 8000 t, o krovinio tūris – 1250 m³ (Kawasaki 2019). H₂ laivo triumuose laikomas skystame būvyje atšaldytas iki –253°C temperatūros. Šilumos izoliacijai pagerinti įrengtos vakuuminės dvigubo korpuso nerūdijančio plieno talpyklos, kurias specialiai sukūrė „Harima Works“ (4 pav.). Talpyklos atraminė konstrukcija pagaminta iš labai patvarios FRP medžiagos, kad dar labiau sumažintų šilumos perdavimą. Laivą varo trys „Daihatsu DE-23“ 1320 kW dyzeliniai varikliai ir du 1360 kW elektros varikliai, leidžiantys laivui plaukti iki 13 mazgų greičiu. Dyzeliniai varikliai aprūpinti selektyvios katalizinės redukcijos (SCR) technologija, padedančią užtikrinti atitiktį TJO III pakopos NO_x reglamentams (Maritime 2021).



4 pav. LH₂ talpos montavimas į pirmąjį LH₂ tanklaivį „Suiso Frontier“

Ta pati Kawasaki Heavy Industries kompanija vykdo galinčių gabenti 160 000 m³ LH₂, t.y. maždaug 128 kartus didesnių nei „Suiso Frontier“, talpos laivų projektavimą (5 pav.). Naujajame laive naudojama CCS (Cargo Containment System) sistema, pavadinta CC61H tipo. Ji pasižymi sferine forma, kuri sumažina išorinį paviršiaus plotą tūrio atžvilgiu. Dėl to CC61H tipo rezervuaras naudoja dvigubos sienelės izoliacijos sistemą, o ne vakuuminį sluoksnį. Tokia konstrukcija užtikrina dujų pakeitimo ir aušinimo efektyvumą tiek vidinėje, tiek išorinėje dviejų sluoksnių sistemoje. Šis sprendimas padidina saugumą, sumažina eksploatacines išlaidas ir taip pagerina komercinį gyvybingumą.



5 pav. Naujasis Kawasaki Heavy Industries laivas, galintis gabenti 160 000 m³ LH₂

„Kawasaki“ sukūrė bandomąjį CC61H tipo rezervuarą specialiai dideliems suskystinto vandenilio gabenimo laivams. Kiekvienas toks laivas gali būti aprūpintas keturiais 40 000 m³ talpos rezervuarais, kurių bendra talpa siekia 160 000 m³. Atliekant išsamų patikrinimą, „Kawasaki“ išbandė dujų pakeitimo, aušinimo ir pašildymo ciklus CC61H tipo rezervuaruose. Taip pat buvo patikrintas konstrukcijos vientisumas, įskaitant surinkimo, suvirinimo ir izoliacijos montavimo darbų kokybę. Galiausiai buvo patvirtinta, kad dideliame rezervuare vandenilį galima efektyviai pakeisti inertinėmis dujomis, pasiekiant planuotą izoliacijos efektyvumą.

„C-Job Naval Architects“ suprojektavo 37 500 m³ LH₂ talpos kuro elementais varomą laivą, kurio eksploatavimo pradžia numatoma 2027 m. (C-Job 2022). Pastaruoju metu intensyviai bandomi vandeniliu varomi vidaus degimo varikliai, kurie galėtų naudoti iš talpų nugaruojantį vandenilį (Gathmann n.d.).

Sauga. Vandenilio transportavimas yra susijęs su didelėmis rizikomis, todėl būtina atlikti rizikos analizę ir užtikrinti, kad infrastruktūra atitiktų saugos standartus. Tai apima vandenilio nuotėkių prevenciją, avarinius stabdymo mechanizmus ir reikiamą apsaugą.

Poveikis aplinkai. Nors pats vandenilis nėra šiltnamio efektą sukeliančios dujos, tačiau jų paplitimas atmosferoje didelių nuotėkių atveju gali netiesiogiai padidinti kitų dujų, ypač metano (CH₄), gyvavimo trukmę atmosferoje. Atmosferoje vandenilis reaguoja su hidroksilo (OH) radikalais, skaidančiais metaną. Jei OH radikalai sunaudojami vandeniliui skaidyti, jų lieka mažiau metano ir kitų teršalų degradacijai, todėl metano gyvavimo trukmė ilgėja ir jo šiltnamio efektas sustiprėja. Poveikis vadinamas „netiesioginiu globaliu šildymu“ (angl. *indirect radiative forcing*) (Bertagni et al. 2022).

Vandenilio nuotėkis į stratosferą gali padidinti vandens garų kiekį ten, o tai gali turėti neigiamą poveikį ozono sluoksniui. Stratosferiniai vandens garai taip pat turi šiltnamio efektą, nors daug mažesnį nei CO₂ ar CH₄. Dabartinės prognozės rodo, kad jei dideli kiekiai vandenilio nutekėtų į atmosferą (pvz., dėl nuotėkio gamybos, saugojimo ar transportavimo metu), bendras klimato poveikis gali būti neigiamas, net jei vietoje to sumažinamas CO₂ iškastinio kuro deginimo metu (Skeie et al. 2025). Moksliniai tyrimai rodo, kad 1 kg nutekėjusio vandenilio gali sukelti tiek pat šiltnamio efekto (netiesiogiai), kiek 5–11 kg CO₂ ekvivalento, priklausomai nuo sąlygų ir modeliavimo (Sand et al. 2023).

Vandenilio transportavimas automobilių keliais, įvertinant ADR sutarties reikalavimus. Vandenilio transportavimas yra viena sudėtingiausių ir griežčiausiai reguliuojamų sričių, nes jis yra itin degios, pavojingos, sprogios dujos. Vandenilio pervežimą Europos keliuose reglamentuoja ADR (Europos sutartis dėl pavojingų krovinių tarptautinio vežimo keliais).

Vandenilis priskiriamas 2 klasės pavojingoms dujoms:

- UN 1049 – Hydrogen, compressed (suslėgtas vandenilis).
- UN 1966 – Hydrogen, refrigerated liquid (suskystintas vandenilis).

Suslėgtas vandenilis gabenamas specialiuose aukšto slėgio balionuose arba cisternose, kurios turi būti sertifikuotos pagal ADR. Transporto priemonės turi būti paženklintos oranžiniais ADR numeriais (pvz., 1049 arba 1966) ir pavojingumo etikete 2.1 (degios dujos).

Transporto priemonės turi turėti apsaugos nuo kibirkščiavimo sistemas, antistatines įžeminimo priemones. Turi būti užtikrinta griežta vožtuvų, slėgio reguliatorių, ventiliacijos kontrolė. Vairuotojai privalo būti specialiai apmokyti, turėti ADR vairuotojo pažymėjimą su 2 klasės įrašu.

Negalima vežti per tam tikrus tunelius, tiltus ar tankiai apgyvendintas teritorijas be specialių leidimų. Turi būti sudarytas avarinių situacijų planas.

Transportavimo kaštai labai aukšti (dažnai didesni nei paties vandenilio gamybos). Reikia specializuotos infrastruktūros (pripylimo terminalai, saugojimo aikštelės). Daugelyje šalių ribota patirtis ir mažai vairuotojų su atitinkama ADR kvalifikacija. Kiekviena šalis gali nustatyti papildomus apribojimus (pvz., maršrutų kontrolė, draudimas įvažiuoti į miestų centrus). Reikia atitikti tiek ADR, tiek nacionalinius priešgaisrinius, darbo saugos ir aplinkosauginius reikalavimus.

2 lentelė. Vandenilio transportavimo ADR reikalavimai ir problemos

Aspektas	Suslėgtas vandenilis (UN 1049)	Suskystintas vandenilis (UN 1966)
Būklė	Dujos, 200–700 bar slėgis	Skystis, –253 °C (kriogeninis)
ADR klasė	2.1 (degios dujos)	2.1 (degios dujos, kriogeninės)
Pakuotės tipas	Aukšto slėgio balionai, cisternos	Kriogeninės cisternos su labai gera izoliacija
Žymėjimas	Oranžiniai numeriai: „1049“ + pavojingumo etiketė 2.1	Oranžiniai numeriai: „1966“ + pavojingumo etiketė 2.1
Transporto priemonė	ADR sertifikuota, antistatika, apsauga nuo kibirkščiavimo, vožtuvų kontrolė	Specialios šilumą izoliuojančios transporto priemonės, apsauga nuo išgaravimo („boil-off“)
Vairuotojas	Privalomas ADR pažymėjimas su 2 klasės įrašu	Tas pats, papildomai mokymai apie kriogeninių medžiagų pavojus
Privalomi dokumentai	ADR važtaraštis, avarinės kortelės, saugos instrukcijos	Tie patys, su papildomais nurodymais dėl kriogeninių skysčių
Maršruto apribojimai	Ribojamas važiavimas per tunelius, tiltus, tankiai apgyvendintas vietas	Dar griežtesni apribojimai dėl garavimo ir avarinių situacijų
Pagrindinės problemos	• Aukštas slėgis → sprogimo rizika • Mažas energijos tankis (daug balionų reikia) • Nuotėkio rizika dėl mažų H₂ molekulių	• Dideli energijos nuostoliai skystinant (30–40 % energijos) • „Boil-off“ – dalis dujų visada išgaruoja • Brangi ir sudėtinga įranga
Logistinės kliūtys	Daug vietos užima → ribota naudinga apkrova	Reikia specialios infrastruktūros ir šilumą izoliuojančių sistemų

3. AMONIAKAS

Amoniakas yra bespalvės dujos, turinčios aštrų, skvarbų kvapą. Jo virimo temperatūra yra 239,8 K (–33,35°C), o stingimo – 195,5 K (–77,65°C), tankis – 0,73 kg/m³, o savaiminio užsidegimo temperatūra atmosferos sąlygomis – 930 K (656°C) (palyginti su metanu – 859 K). Jo oktaninis skaičius yra apie 130, todėl jis pasižymi didele garavimo šiluma (1371 kJ/kg, palyginti su maždaug 271 kJ/kg benzino) ir gali būti laikomas skystyje termiškai izoliuotose talpyklose. Amoniakio molekulė yra trigoninės piramidės formos, prie azoto atomo prijungti trys vandenilio atomai ir nebendra elektronų pora. Tai polinė molekulė ir dėl stiprių tarp molekulinį vandenilinių jungčių yra labai asocijuota. Amoniakio degimas yra sudėtingas, daugiausia dėl mažo reaktyvumo, tačiau susidaro azoto dujos ir vanduo, o stochiometrinis oro ir kuro santykis (AFR) yra 6,06 pagal masę (Valera-Medina et al. 2018).

Amoniakio degimo reakcija:



Grynas amoniakas pasižymi maža savitąja energija ir laminariniu degimo greičiu, kartu su aukšta savaiminio užsidegimo temperatūra ir padidėjusia uždegimo energija, todėl jį sunkiau deginti gryną (3 lentelė). Dėl to mišiniai su vandeniliu, t. y. tuos, kuriuos galima gana lengvai gauti krekinguojant amoniako molekulę, dažniausiai buvo bandomi praktiniuose pritaikymuose. Be to, amoniako naudojimas su tokiomis dujomis kaip metanas, t. y. kurios turi panašų tankį, klampumą ir šiluminę talpą, leidžia gana lengvai jį pritaikyti bendro degimo sistemose. Taigi, amoniakas turi didelį potencialą konkuruoti su kitais vandenilio nešikliais. Tačiau prieš pradedant naudoti amoniaką energetikos įrenginiuose, reikia geriau suprasti jo degimo elgseną, daugiausia atliekant tolesnius tyrimus, kurie ne tik demonstruotų koncepciją, bet ir išsamiai aprašytų amoniako degimo chemiją, siekiant patobulinti ir kontroliuoti tokį procesą.

3 lentelė. Amoniakio degimo charakteristikų palyginimas su kitais degalais (Valera-Medina et al. 2018)

	Methane (CH₄)	Hydrogen (H₂)	Methanol (CH₃OH)	Ammonia (NH₃)
Density (kg/m ³)	0.66	0.08	786	0.73
Dynamic viscosity × 10 ^{–5} (P)	11.0	8.80	594	9.90
Low heating value (MJ/kg)	50.05	120.00	19.92	18.80
Laminar burning velocity (m/s) – close to stoich.	0.38	3.51	0.36	0.07
Minimum ignition energy (mJ)	0.280	0.011	0.140	8.000
Auto-ignition temperature (K)	859	773–850	712	930
Octane number	120	–	119	130
Adiabatic flame temperature (with air) (K)	2223	2483	1910	1850
Heat capacity ratio, γ	1.32	1.41	1.20	1.32
Gravimetric Hydrogen density (wt%)	25.0	100.0	12.5	17.8

Cheminis energijos kaupimas gali būti svarstomas naudojant vandenilį arba anglies dioksido neutralius vandenilio darinius. Vienas iš tokių pavyzdžių yra amoniakas, kuris buvo identifikuotas kaip tvarus kuras

mobiliesiems ir nuotoliniams taikymams. Panašiai kaip susintetintas vandenilis, amoniakas yra produktas, kurį galima gauti iš iškastinio kuro, biomasės arba kitų atsinaujinančių šaltinių, tokių kaip vėjas ir saulės energija, kur perteklinė elektros energija gali būti paversta neelektrine energijos forma. Kai kurie amoniako pranašumai, palyginti su vandeniliu, yra mažesnė sukauptos energijos vieneto kaina, didesnis tūrinis energijos tankis (7,1–2,9 MJ/l), lengvesnė ir labiau paplitusi gamyba, tvarkymas ir paskirstymas bei geresnis komercinis gyvybingumas. Iš atsinaujinančių šaltinių gaunamas amoniakas pasižymi šiomis savybėmis (Valera-Medina et al. 2018):

- neturi tiesioginio šiltnamio efektą sukeliančių dujų poveikio ir gali būti sintetinamas visiškai neišmetant anglies dioksido iš atsinaujinančių energijos šaltinių;

- jo energijos tankis yra 22,5 MJ/kg, panašus į iškastinio kuro (žemos kokybės anglių viršutinis šilumingumas yra apie 20 MJ/kg; gamtinių dujų – apie 55 MJ/kg, SGD – 54 MJ/kg, o vandenilio – 142 MJ/kg);

- atmosferos temperatūroje jį galima lengvai paversti skysčiu suspaudžiant iki 0,8 MPa slėgio;

- yra sukurta patikima amoniako saugojimo ir paskirstymo infrastruktūra (įskaitant vamzdynus, geležinkelius, kelius, laivus); šiandien kasmet pagaminama ir transportuojama apie 180 mln t NH₃.

Amoniako transportavimas. Bevandenis amoniakas visame pasaulyje paskirstomas naudojant vamzdynus, geležinkelius, baržas, laivus, kelių transporto priekabas ir saugojimo terminalus. Ilgametė amoniako paskirstymo patirtis, sukaupta nuo pirmojo XX amžiaus ketvirčio, sudarė sąlygas jo pasauliniam naudojimui ir užtikrino, kad visame pasaulyje egzistuoja gerai išvystyti paskirstymo tinklai.

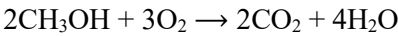
Jis transportuojamas ir laikomas talpyklose esant vidutiniam slėgiui, panašiai kaip propanas. Amoniako, kaip atsinaujinančios energijos transporterio, gamyba ir vėlesnis jo pavertimas vandeniliu yra daug energijos reikalaujantys etapai, tačiau tvarkymo ir transportavimo infrastruktūra, įskaitant transportavimo taisykles, jau yra sukurta (Valera-Medina et al. 2018).

JAV „NuStar“ vamzdynas (3070 km ilgio) tiekia amoniaką iš Misisipės į centrinės ir šiaurinės šalies dalies „kukurūzų juostos“ regioną, kur jis gali būti toliau paskirstomas per „Magellan“ vamzdyną (~1900 km ilgio). Abu vamzdynai per metus tiekia apie 2,9 mln. tonų amoniako (Valera-Medina et al. 2018). Rytų Europoje veikia (ar veikė) vamzdynas, jungiantis „TogliattiAzot“ gamyklą (Toljatį, Samarą) su Odesos uostu prie Juodosios jūros. Tai vienas didžiausių vamzdynų pasaulyje (~2400 km ilgio), kurio pajėgumas siekia 3 mln. tonų per metus (Togliattiazot n.d.).

Vakarų Europa vien tik geležinkeliais kasmet perveža apie 1,5 mln. tonų amoniako. Skysto amoniako transportavimas vamzdynais Europos Sąjungoje nėra toks reikšmingas kaip JAV ar Rusijoje – čia veikia tik palyginti trumpos vamzdynų sistemos. Didesni kiekiai pervežami izoliuotuose cisterniniuose vagonuose, galinčiuose talpinti iki 126 800 litrų. Kai vamzdynų ar geležinkelių jungtys neįmanomos, amoniakas regionuose gabenamas didelėmis baržomis, kelių transporto priekabomis, mažesnėmis slėginėmis talpyklomis („nurse tanks“) ar net balionais. Taigi egzistuoja plati infrastruktūra, kuri gali būti pritaikyta amoniakui naudoti kaip sukauptos energijos paskirstymo priemonei (Valera-Medina et al. 2018).

4. METANOLIS

Metanolis dar žinomas kaip metilo alkoholis ar medžio spiritas – junginys, kurio formulė yra CH₃OH. Tai paprasčiausias alkoholis. Jis bespalvis, degus, labai nuodingas (išgėręs 2 g, žmogus gali apakti, o nuo 40 g mirti), skystis su savitu kvapu (pagal kvapą, skonį ir išvaizdą metanolis labai panašus į etanolį). Neribotai tirpsta vandenyje. Jis dažniausiai naudojamas pramonėje, pavyzdžiui, kaip tirpiklis šilko, biodyzelino (metilesterio), antifrizo gamyboje. Apsinuodijimo metanolio priešnuodis – etanolis. Metanolio liepsna bespalvė. Metanolis dega ore, sudarydamas anglies dioksidą ir vandenį (Metanolis 2023):



4 lentelė. Metanolio savybės (FASTWATER 2021)

Savybė	Reikšmė
Molekulinė masė, g/mol	32,04
Santykinis tankis, 20/20°C (Pastaba: Santykinis tankis matuojamas 20°C temperatūroje, lyginant su vandeniu, kurio temperatūra taip pat yra 20°C. Vertės 0,791–0,793 rodo, kad metanolio tankis yra apie 79,1–79,3 % vandens tankio esant toms pačioms sąlygoms. Kadangi vandens tankis 20°C yra ~998 kg/m ³ , metanolio tankis atitiktų maždaug 790–793 kg/m ³ . Praktiškai tai reiškia, kad metanolis yra lengvesnis už vandenį, todėl išsiliejęs plūduriuos paviršiuje, bet dėl visiško maišymosi su vandeniu greitai pasiskirstys.)	0,791 – 0,793
Stingimo temperatūra, °C	-97,8
Virimo temperatūra, °C	64,6
Užsilepsnojimo temperatūra, °C (uždaramame tigelyje, esant 1 atm.)	12
Sprogumo ribos ore, %	6 – 36
Tirpumas, %: metanolis vandenyje / vanduo metanolyje	100/100

Metanolio visame pasaulyje yra prekiaujama, kaip didelės apimties baziniu kuru ir chemine medžiaga, gaminama daugelyje pasaulio vietų. Šiuo metu veikia daugiau kaip 100 metanolio gamyklų, kurių bendra galia siekia apie 140 milijonų metrinių tonų. Pasak „Globe Newswire“, pasaulinė metanolio rinka išaugo nuo 37,06 mlrd. JAV dolerių 2024 m. iki 38,45 mlrd. JAV dolerių 2025 m. Tikimasi, kad ji toliau augs 4,25 % metiniu augimo tempu ir iki 2030 m. pasieks 47,60 mlrd. JAV dolerių (Research and Markets 2025).

Dėl metanolio rinkos geografijos metanolis labai priklauso nuo transporto, kad jį būtų galima pervežti iš gamintojų vartotojams. Metanolis dideliais kiekiais gaminamas keliuose pasaulio regionuose ir naudojamas kituose, atskiruose regionuose. Dėl didelių atstumų tarp gamintojų ir vartotojų net 80 % pasaulinės metinės metanolio produkcijos yra transportuojama tarp žemynų. Transatlantinio gabenimo, krovos prieplaukose ir jūrinių terminalų saugojimo saugumas, patikimumas ir vientisumas sudaro didelę galimos nuostolių rizikos dalį, kylančią dėl atsitiktinio ir nekontroliuojamo išsiliejimo, kurią prisiima metanolio pramonė (Methanol Institute n.d.).

Metanolio transportavimas laivais. Metanolis iš prieplaukos saugojimo talpyklų pumpuojamas į sandarias tanklaivių krovinių talpas. Pristatymas į prieplaukos saugojimo talpyklas gali būti vykdomas vamzdynais, baržomis, geležinkeliu arba sunkvežimiais. Tarpžemyninis gabenimas yra panašus į kitų angliavandenilių skysčių, tokių kaip nafta, benzinai, dyzelinas ir kuro priedai, pvz., MTBE, transportavimą. Dvigubo korpuso laivai dažnai naudojami krovinių gabenimo įmonių ir, tikėtina, taps standartu didėjančią pasaulinei gamybai. Specialūs reikalavimai metanolio gabenimui tanklaiviais yra šie: švara (kad nebūtų užterštas metanolis), metanolio nuotėkio aptikimo sistemos, tinkama gaisro gesinimo įranga (įskaitant

alkoholiui atsparias putas) bei siurblių, vamzdynų, žarnų ir tarpinių medžiagos, tinkamos naudoti metanolio gabenimui (Methanol Institute n.d.).

Sauga. Reikia vengti atsitiktinių nuotėkių į atvirą vandenyną, tačiau manoma, kad metanolio išsiliejimas kelia mažesnę grėsmę aplinkai nei nafta, bunkerinis kuras, benzinas ar dyzelinas. Gryno (100 %) metanolio tirpimas vandenyje yra greitas ir visiškas. Dėl to atsirandantis skiedimas sumažina metanolio koncentraciją iki netoksiško lygio jūros gyvūnijai per mažiau nei vieną mylią, net ir didelių katastrofiškų nuotėkių atveju.

Atsargumo priemonės gabenant metanolį geležinkeliu daugmaž tokios pačios, kaip ir etanolio, benzino, MTBE, reaktyvinių degalų (žibalo) bei distiliatų gabenimo atveju. Tai apima žeminimą, siekiant apsaugoti nuo statinės elektros išlydžių. Specialiai suprojektuoti cisterniniai vagonai turi slėgio išleidimo įtaisus, kad būtų kompensuota terminė plėtra transportavimo metu ir trumpalaikio (mažiau nei 30 dienų) sustabdymo bei laikino sandėliavimo metu. Geležinkelio transportas laikomas saugiu tol, kol metanolis yra laikomas vertikalioje cisterninio vagono padėtyje. (Methanol Institute n.d.).

5. ĮVAIRIŲ TRANSPORTAVIMO BŪDŲ PALYGINIMAS

Atlikti tyrimai rodo, kad vandenilio tiekimas įvairiomis transporto priemonėmis ir gamyba vietoje su saugojimo galimybėmis ir be jų sudaro sudėtingą situaciją, kuriai įtakos turi tokie veiksniai kaip energijos tankis, transportavimo būdai ir infrastruktūros prieinamumas. Tyrime išnagrinėti penki scenarijai, siekiant įvertinti skirtingų vandenilio tiekimo maršrutų įgyvendinamumą ir ekonominį gyvybingumą, o atskaitos taškas – 2030 m. Esant 80 GWh metiniam vandenilio poreikiui, perspektyvūs sprendimai yra tiek transportavimas įvairiomis priemonėmis, tiek gamyba vietoje. Didėjant energijos poreikiui, transportavimas sunkvežimiais ir traukiniais tampa vis nepraktiškesnis dėl didelio priekabų ir vagonų skaičiaus. Tokioje situacijoje gamyba vietoje gali būti naudinga. Sunkvežimių ir vamzdynų transportavimo sąnaudoms daugiausia įtakos turi paskirstymo sąnaudos, o geležinkelio transporto sąnaudoms – sandėliavimo išlaidos, nes traukinio transportavimo pajėgumas yra gerokai didesnis nei sunkvežimių. Vamzdynų transportas pasirodė esąs ekonomiškai naudingas dėl sandėliavimo ir konversijos išlaidų nebuvimo (Cvetkovska et al. 2025).

Abi vandenilio tiekimo alternatyvos, būtent transportavimo būdai ir gamyba vietoje, susiduria su sudėtingais infrastruktūros iššūkiais. Geležinkelio transportas naudojamas tik pramonės objektuose, turinčiuose tiesiogines geležinkelio jungtis, o tai suteikia didelių pranašumų, palyginti su sunkvežimių transportu. Objektuose, neturinčiuose tiesioginės jungties, bent paskutinė transportavimo maršruto dalis (nuo geležinkelio terminalo iki objekto) turi būti gabenama sunkvežimiu. Ekonominė vamzdynų transportavimo nauda priklauso ne tik nuo jungties prieinamumo, bet ir nuo to, ar vamzdyną galima paversti specialiu vandenilio vamzdynu, neatmetant kitų gamtinių dujų vartotojų. Jei tai neįmanoma, gali tekti statyti naują H₂ vamzdyną, o tai gali padidinti specifines paskirstymo išlaidas iki 50 %. Elektrolizierio įrengimas yra iššūkis, nes elektros tinkle turi būti pakankami pajėgumai ir užtikrinta, kad įrengimas nesukeltų tinklo disbalanso. Abu variantai, nepriklausomai nuo vandenilio šaltinio, kelia iššūkių H₂ saugojimui, įskaitant pakankamos vietos užtikrinimą dideliems saugojimo pajėgumams ir būtinybę laikytis saugos standartų bei reglamentų (Cvetkovska et al. 2025).

5 lentelė. Įvairių degalų savybių palyginimas (Zamfirescu and Dincer 2009)

Property	Gasoline	Diesel	Natural gas	H ₂	NH ₃
Flammability limit, volumes % in air	1.4–7.6	0.6–5.5	5–15	4–75	16–25
Auto-ignition temperature, °C	300	230	450	571	651
Peak flame temperature, °C	1977	2053	1884	2000	1850

6 lentelėje pirmame stulpelyje išvardinti degalai ir jų saugojimo tipas, antrame stulpelyje – degalų slėgis talpykloje, toliau – degalų tankis pilname bake. Ketvirtame stulpelyje pateiktas degalų viršutinis šilumingumas, tenkantis masei. Degalų tūrinė energija (6 stulpelis) randama HHV padauginus iš tankio vertės, nurodytos trečiame stulpelyje.

6 lentelė. Amoniako savybių palyginimas su kitais degalais (Zamfirescu and Dincer 2009)

Fuel/storage	Pressure, bar	Density, kg/m ³	HHV, MJ/kg	HHV', GJ/m ³	Energy density, GJ/m ³	Specific gravimetric cost <i>c</i> , CN\$/kg	Specific volumetric cost, CN\$/m ³	<i>c</i> /HHV, CN\$/GJ
Gasoline, C ₈ H ₁₈ /liquid	1	736	46.7	34.4	34.4	1.36	1000	29.1

Fuel/storage	Pressure, bar	Density, kg/m ³	HHV, MJ/kg	HHV', GJ/m ³	Energy density, GJ/m ³	Specific gravimetric cost c, CN\$/kg	Specific volumetric cost, CN\$/m ³	c/HHV, CN\$/GJ
CNG, CH ₄ /integrated storage	250	188	42.5	10.4	7.8	1.20	226	28.2
LPG, C ₃ H ₈ /pressurized tank	14	388	48.9	19.0	11.7	1.41	548	28.8
Methanol, CH ₃ OH/liquid	1	786	14.3	11.2	9.6	0.54	421	37.5
Hydrogen, H ₂ /metal hydrides	14	25	142	3.6	3.0	4.00	100	28.2
Ammonia, NH ₃ /pressurized tank	10	603	22.5	13.6	11.9	0.30	181	13.3
Ammonia, NH ₃ /metal amines	1	610	17.1	10.4	8.5	0.30	183	17.5

Benzinas, labiausiai paplitę transporto priemonių degalai, gaunami distiliuojant žalią naftą, o tai yra gana brangus procesas, kurio tikslas – išgauti tinkamas virimo intervalo frakcijas ir modifikuoti degalų rūšių molekulinės struktūras, kad būtų pasiektas tinkamas degimo ir emisijos našumas. Šių degalų specifinė energetinė kaina yra didelė, t.y. 29 CN\$/GJ. Palyginti su kitais degalais, benzino šilumingumas tūrio vienetu yra didžiausias, t.y. 34,4 GJ/m³. Bet benzinas turi ir trūkumą – degdamas vidaus degimo variklyje išskiria SO_x, NO_x, didelį kiekį CO₂ ir kitų teršalų. Dyzelinas, kuris teršia labiau nei benzinas, turi šiek tiek didesnę tūrinę (38,6 GJ/m³) ir gravimetrinę tankį (48,5 MJ/kg) (Zamfirescu and Dincer 2009).

Suslėgtos gamtinės dujos (SGD) yra švaresnė alternatyva benzinui, nes jos privalumas – mažesnė CO₂ emisija ir neišskiriama SO_x. Paprastai SGD laikomos specialiose transporto priemonių „integruotose saugojimo sistemose“, esant 250–350 bar slėgiui. Ši sistema susideda iš daugybės tarpusavyje sujungtų balionų, įterptų į apsaugines putas, siekiant sumažinti galimą bako lūžio žalą avarijos metu. Gamtinės dujas reikia suslėgti, o suspaudimo darbas yra didelis ir tai padidina SGD kainą maždaug 3 kartus. Dėl dujinės fazės SGD bako kaupiamos energijos tankis yra daugiau nei tris kartus mažesnis nei benzino.

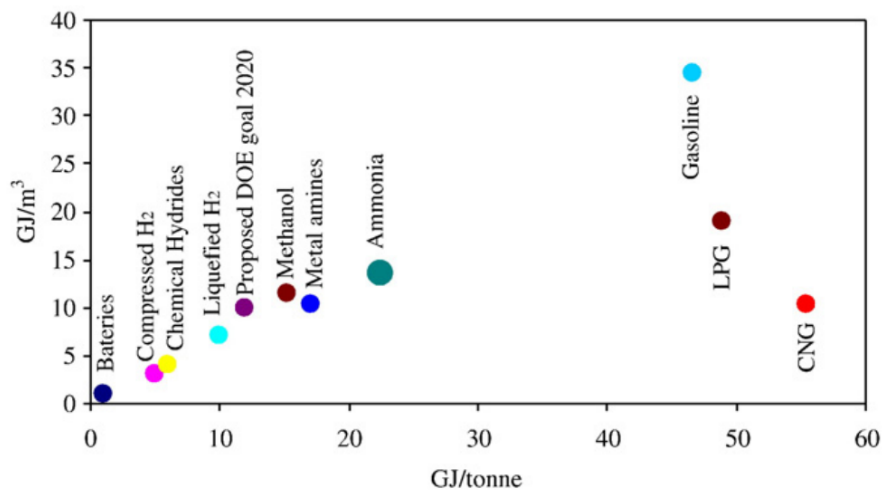
Suskystintos naftos dujos (SND) laive laikomos sandariame bake, kurio slėgis yra apie 14 bar, kur skystis yra termodinaminėje pusiausvyroje su savo garais. SND šilumingumas yra šiek tiek didesnis nei benzino, tačiau dėl mažesnio tankio pilname SND bake sukaupiama tris kartus mažiau energijos nei pilname tokio pat tūrio benzino bake. Apskaičiuojant SND tankį, kaip pateikta 6 lentelėje, darome prielaidą, kad 20 % pilno bako tūrio užima garai, o likusią dalį – skystis; tai yra saugos priemonė, skirta išvengti pavojaus, kurį kelia skysčio šiluminis plėtimasis. Panašiai kaip ir SGD, SND pranašumas yra mažesnis išmetamųjų teršalų kiekis ir didesnis variklio efektyvumas. SND daugiausia sudaro propanas, o SGD – metanas. Taigi, šie degalai, būdami beveik grynomis cheminėmis medžiagomis, gali būti deginami švariau nei benzinas, kuris yra sudėtingas angliavandenilių mišinys, kuriame, kaip minėta pirmiau, yra įvairių toksiškų komponentų (Zamfirescu and Dincer 2009).

Vandenilis iš visų 6 lentelėje išvardytų degalų rūšių pasižymi mažiausiu energijos kiekiu tūrio vienetu. Čia darome prielaidą, kad vandenilis laikomas metalo hidrido talpykloje, esant 14 bar slėgiui, ir neatsižvelgiama į šilumą, reikalingą visiškai vandenilio kiekiui išgauti iš talpyklos (atkreipkite dėmesį, kad talpyklą reikia šildyti tik tuo atveju, jei norima ją visiškai ištuštinti; normaliomis eksploataavimo sąlygomis šilumos naudoti nereikia). Maža tūrinė energija (10 kartų mažesnė nei benzino) neigiamai veikia važiavimo atstumą. Todėl labai svarbu pasiekti didelį energijos gamybos efektyvumą naudojant vandenilį. Po gamybos vandenilis tam tikrą laiką laikomas gamintojo vietoje iki pristatymo. Vandenilio saugojimas yra brangus, nes vandenilis turi būti arba suslėgtas iki itin aukšto slėgio (~ 800 barų), arba aušinamas, kad suskystėtų kriogeninėje temperatūroje. Suskystinimas padidina vandenilio kainą už kilogramą mažiausiai 30 %, o prie to dar reikia pridėti energiją, sunaudojamą norint palaikyti talpyklą kriogeninėje temperatūroje laikymo metu. Vandenilio paskirstymas vartojimo taškams taip pat yra brangus. Jei, pavyzdžiui, daroma prielaida, kad vandenilis transportuojamas slėginėse talpyklose esant 345 barų slėgiui, transportuojamos energijos kiekis yra 8 GJ/m³, t. y. 4 kartus mažesnis nei benzino atveju (32 GJ/m³). Jei bus tiesiamas vamzdynas vandeniliui paskirstyti tokiu aukštu slėgiu, vamzdžių storis turi būti daugiau nei 50 % storesnis, palyginti su gamtinių dujų vamzdžiais. Dėl didelės vandenilio sprogimo rizikos kaina dar labiau išaugs dėl saugos priemonių (Zamfirescu and Dincer 2009).

Amoniako (NH₃) HHV yra maždaug perpus mažesnis nei benzino, tankis taip pat. Taigi skystas NH₃ kaupia 2,5 karto mažiau energijos tūrio vienetu nei benzinas.

Metanolio energijos tankis yra maždaug tris kartus mažesnis nei benzino.

Aptarti rezultatai grafiškai apibendrinti 6 paveiksle.



6 pav. Įvairių degalų tūrinio ir masinio energijos tankių palyginimas

6. SUSIJĘ PROJEKTAI

1. **IEA Hydrogen TCP** (<https://www.ieahydrogen.org/>) – Tarptautinės energetikos agentūros Vandenilio technologijų bendradarbiavimo programa – tai tarptautinė platforma, jungianti vyriausybes, pramonę ir tyrimų organizacijas, siekiant: plėtoti vandenilio technologijas (gamybos, saugojimo, transportavimo, panaudojimo); vykdyti bendrus mokslinius tyrimus ir demonstracinius projektus; dalintis techninėmis žiniomis ir politikos rekomendacijomis; skatinti vandenilio rinkos plėtrą kaip dalį švarios energetikos perėjimo.

Veikla apima visą vandenilio vertės grandinę – nuo atsinaujinančios energijos panaudojimo H₂ gamybai iki jo integracijos transporto, pramonės ir energetikos sektoriuose.

2. **Hydrogen Europe** (<https://hydrogeneurope.eu/>) – tai Europos pramonės ir tyrimų asociacija, vienijanti įmones, tyrimų centrus ir nacionalines organizacijas, siekiančias plėtoti vandenilio ir kuro elementų technologijas. Pagrindiniai tikslai: skatinti vandenilio ekosistemą Europoje – nuo gamybos iki galutinio panaudojimo; atstovauti sektoriaus interesams ES institucijose ir formuoti politines gaires; vykdyti ir remti ES finansuojamus projektus, įskaitant infrastruktūros, transporto, pramonės ir energijos saugojimo sritis; stiprinti bendradarbiavimą tarp pramonės, mokslo ir valdžios institucijų.

3. **IPHE** (<https://www.iphe.net/>) (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy) – tai tarptautinė valstybių partnerystė, įkurta 2003 m., orientuota į vandenilio ir kuro elementų (fuel cells) technologijų plėtrą ir diegimą švarios energetikos perėjimo kontekste. Tikslai: skatinti tyrimų, demonstravimų ir taikymo projektus vandenilio ir kuro elementų srityse; palengvinti bendradarbiavimą tarp valstybių politikos formavimo, standartų kūrimo ir saugos srityse; bendrinti informaciją apie technologijas, politikos priemones ir saugos klausimus.

PRIEDAS 1. SUSLĖGTŲ DUJŲ (H₂) BALIONŲ TIPAI

I tipo bakai (Type I) – pilnai metaliniai

Konstrukcija: Visa talpykla pagaminta iš vieno metalo – dažniausiai plieno (dažnai 34CrMo₄) arba aliuminio lydinio. Be jokių kompozitinių sustiprinimų.

Slėgis: Iki 200 bar, kartais iki 250 bar (ribotai).

II tipo bakai (Type II) – metalinė šerdis su daliniu kompozitiniu sustiprinimu

Konstrukcija: Metalinis cilindrinis korpusas, dažnai plieninis, su išoriniu kompozitiniu apvyniojimu (pvz., stiklo pluoštas). Tik cilindrinė dalis yra sustiprinama – galai lieka metaliniai.

Slėgis: Iki 300–350 bar (priklausomai nuo konstrukcijos)

Gamybos procesas:

Pagaminamas I tipo metalinis balionas (žr. aukščiau).

Paviršiaus paruošimas: Smėliavimas, valymas, gruntavimas.

Apvyniojimas: Automatinis verpimo procesas (angl. *filament winding*) naudojant epoksidinę dervą ir armuojančias gijas (stiklo pluoštą ar anglies pluoštą).

Kietinimas: Kompozitas sukietinamas krosnyje.

Apdaila ir testavimas: Nupjaunami galai, tvirtinami komponentai, atliekami slėgio bandymai.

III tipo bakai (Type III) – aliuminio šerdis su pilnu kompozitiniu apvyniojimu

Konstrukcija: Aliuminio vidinis indas (lineris), kuris užtikrina sandarumą. Išorė visiškai padengta anglies pluoštu arba stiklo pluoštu su dervomis.

Slėgis: Tipiškai 350–700 bar (naudoja transporto sektorius – pvz., vandeniliniai automobiliai).

Gamybos procesas:

Aliuminio linerio gamyba:

- Išspaudimo ar gilios traukos būdu pagaminamas sandarus cilindras su galais.
- Įrengiamos sriegio jungtys ar vožtuvų tvirtinimo vietos.

Paviršiaus paruošimas: Mechaninis šveitimas, cheminis valymas, džiovinimas.

Apvyniojimas:

- Pluoštas (anglies ar stiklo) su epoksidine derva apvyniojamas sluoksniais (preciziškai).
- Naudojamos kryžminės, zigzaginės, apskritiminės pynės.

Kietinimas krosnyje: Derva sukietėja (dažnai 100–150 °C temperatūroje).

Mechaninis apdirbimas: Išpjaunami jungčių sriegiai, šlifuojamas paviršius.

Testavimas: Slėgio, nuovargio, terminių ciklų, sprogo ir pradurimo testai.

IV tipo bakai (Type IV) – visiškai kompozitiniai su plastikiniu lineriu

Konstrukcija: Vidinis sluoksnis (lineris) pagamintas iš termoplastinio plastiko (pvz., HDPE, PA, PET ar nailonas). Išorinis sluoksnis: kelių sluoksnių anglies pluošto ir/arba stiklo pluošto sustiprintas kompozitas, su epoksidine arba poliuretano derva.

Slėgis: Tipiškai 350 bar arba 700 bar (naudojamas automobiliuose – pvz., Toyota Mirai, Hyundai NEXO). Projektiniai slėgiai iki 875 bar (bandymams).

Gamybos procesas:

1. Plastikinio linerio gamyba

- Dažniausiai naudojamas ekstruzijos pūtimo formavimas (*blow molding*) arba rotacinis liejimas (*rotational molding*).
- Sukuriamas sandarus, plonasienis bakas su vožtuvo anga.
- Lineris turi būti: dujoms nepralaidus (minimalus H₂ difuzijos koeficientas), chemiškai inertiškas, atsparus temperatūrai (pvz., –40 °C iki +85 °C).

2. Paviršiaus paruošimas

- Cheminis šveitimas, smėliavimas arba plazminis aktyvinimas – siekiant geresnio kompozito sukibimo.

3. Apvyniojimas kompozitu (filament winding)

- Naudojamas anglies pluoštas (dėl stiprumo ir mažo svorio).
- Kai kur naudojamas ir stiklo pluoštas – kaip apsauga nuo išorinio smūgio.
- Gijos impregnuojamos epoksidine derva ir vyniojamos ant rotuojančio linerio.
- Apvija vyksta automatizuotu būdu, laikantis tikslų įtempimo, kampo ir sluoksnio modelių.

4. Kietinimas

- Bakas šildomas (paprastai 100–150 °C) orkaitėje, kad derva sukietėtų ir kompozitas įgautų galutinį stiprumą.
- Po sukietėjimo jis tampa ypač atsparus vidaus slėgiui.

5. Vožtuvų, jungių įrengimas

- Įtvirtinami metalizuoti antgaliai (bosses), dažniausiai aliuminio ar nerūdijančio plieno.
- Čia tvirtinami slėgio vožtuvai, jutikliai.

6. Testavimas ir sertifikavimas

- Slėgio testas (hidraulinis / pneumatinis iki 875 bar ar daugiau).
- Sprogimo testas.
- Temperatūros ciklų testas (–40 °C ↔ +85 °C).
- Nuovargio (ciklų) testas.
- Hidrostatinis sprogimo bandymas.
- Gaisrinis bandymas (Fire test – SAE J2579 / ISO 19881).

Privalumai IV tipo bakų

- Itin lengvi (iki 60 % lengvesni nei I tipo).
- Atsparūs korozijai.
- Tinka didelio slėgio sistemoms.

- Platus temperatūrinis darbinis diapazonas.

Trūkumai

- Aukšta gamybos kaina (dėl anglies pluošto).
- Sudėtingas perdirbimas.
- Terminis senėjimas – plastikinis lineris gali prarasti savybes ilginiui.
- Reikalauja didelio tikslumo gamyboje.

V tipo bakai (Type V) – visiškai kompozitiniai be vidinio įdėklo

Pagrindinės savybės:

- Neturi vidinio metalinio ar plastikinio įdėklo.
- Visa struktūra – tai vien tik kompozitinė medžiaga (dažniausiai anglies pluoštas su pažangiomis dervomis).
- Slėgiui atspari struktūra yra kartu ir sandari vandeniliui.

Tikslas / priežastys jų kūrimui:

- Sumažinti svorį dar labiau nei IV tipo (idealu bepiločiams orlaiviams, kosmosui, lenktyninėms transporto priemonėms).
- Išvengti terminio senėjimo ir sandarumo problemų, susijusių su plastikiniu įdėklu.
- Pašalinti riziką, susijusią su plėtimusi ar medžiagų sąveika tarp įdėklo ir kompozito.

Technologiniai iššūkiai:

- Sandarumas vandeniliui: kompozitai savaime nėra visiškai dujų nepraleidžiantys – reikia specialių dervų ar barjerinių dangų.
- Mikroįtrūkimų kontrolė: be įdėklo net menkiausias defektas gali lemti nuotėkį ar gedimą.
- Brangus ir sudėtingas gamybos procesas.
- Sertifikavimo trūkumas: šie bakai dar neturi plačiai taikomų tarptautinių standartų (kaip ISO 19881 ar SAE J2579 IV tipo atveju).

Kur naudojami:

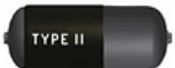
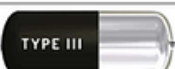
- Aviacija (eVTOL, UAV), kosmosas, lenktynių transportas
- Kuriami startuolių ir pažangių technologijų kompanijų, pvz.: Infinite Composites (JAV), NanoSonic, NASA tyrimų projektai, taip pat svarstomi kaip sprendimai tankiam vandenilio laikymui kosmose (kriogeninės dujos su dideliu slėgiu)

Privalumai:

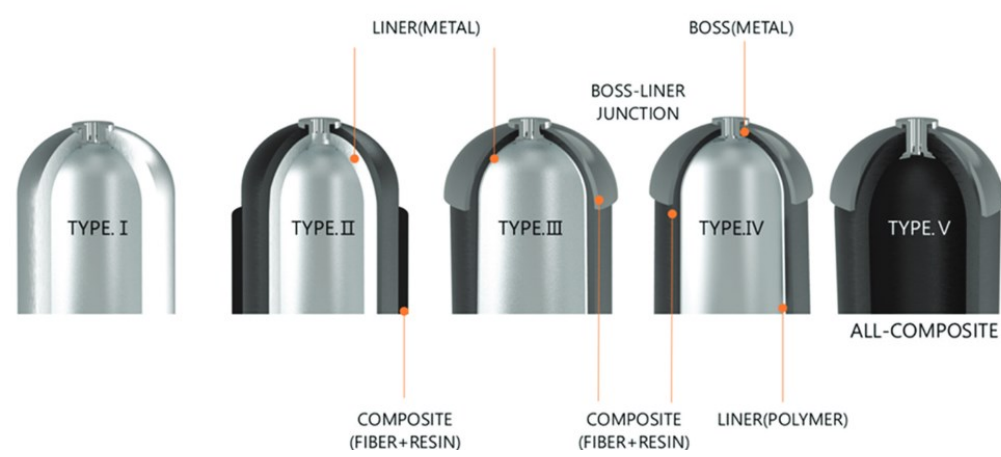
- Mažiausias svoris iš visų tipų.
- Gali būti pritaikomi labai specifinėms paskirtims.
- Jokio korozijos pavojaus.
- Pašalinamos įdėklo sąveikos ir montavimo problemos.

Trūkumai:

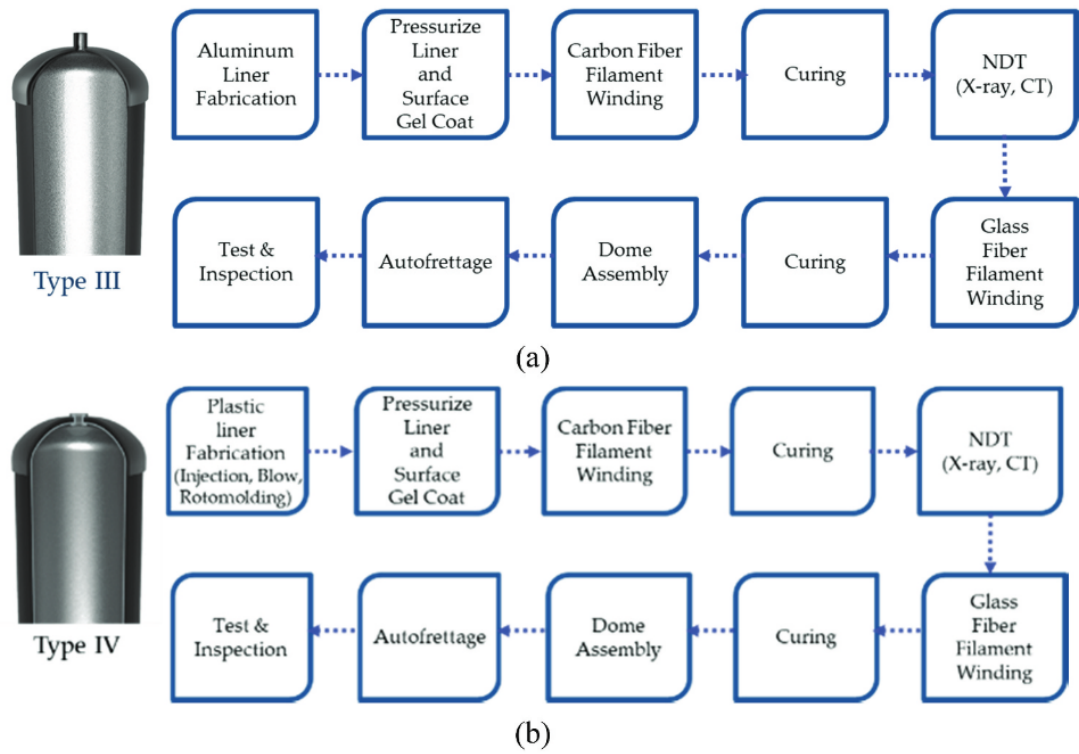
- Sandarumo technologijos dar ne iki galo išspręstos.
- Brangus gamybos procesas.
- Ribotas praktinis naudojimas, nėra plačiai komercinės pasiūlos.

[95]	Sub-Type Classification	Liner	Wrap Extent	Winding Method	Resin Type	Fiber Type	Low Cost	Recyclability	Light Weight
	Type II—FSW ¹	Metal	Cylinder	Wet	TS	CF	+++	++++	+
	Type II—MSW	Metal	Cylinder	Wet	TS	SW	+++++	+++++	+
	Type III—FSW ¹	Metal	Full	Wet	TS	CF	+++	+++	++
	Type III—MSW	Metal	Full	Wet	TS	SW	++++	++++	+
	Type IV—FSW ¹	Plastic	Full	Wet	TS	CF	+	++	+++++
	Type IV—FST	Plastic	Full	Tape	TS	CF	+	++	+++++
	Type IV—FPT	Plastic	Full	Tape	TP	CF	+	+++	+++++
	Type IV—FPW	Plastic	Full	Wet	TP	CF	+	+++	+++++
	Type IV—MSW	Plastic	Full	Wet	TS	SW	++++	++++	+++
	Type V ²	Liner-less	Full	Tape	TS/TP	CF	++	++	+++++

Šaltinis: <https://www.addcomposites.com/post/what-is-a-hydrogen-tank-tank-types>



Šaltinis: (Shin and Ha 2024)



Šaltinis: (Shin and Ha 2024)

LITERATŪROS ŠALTINIAI

- Bertagni, Matteo B., Stephen W. Pacala, Fabien Paulot, and Amilcare Porporato. 2022. 'Risk of the Hydrogen Economy for Atmospheric Methane'. *Nature Communications* 13(1):7706. doi:10.1038/s41467-022-35419-7.
- Cava, Carmine, Gabriele Guglielmo Gagliardi, Enrica Piscolla, and Domenico Borello. 2025. 'Techno-Economic Analysis of Hydrogen Transport via Truck Using Liquid Organic Hydrogen Carriers'. *Processes* 13(4):1081. doi:10.3390/pr13041081.
- Cihlar, Jan. 2020. *Hydrogen Generation in Europe: Overview of Costs and Key Benefits*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- C-Job. 2022. 'New Class of Hydrogen Ship Design Will Revolutionize Renewables Market'. <https://c-job.com/news/new-class-of-hydrogen-ship-design-will-revolutionize-renewables-market/>.
- Cvetkovska, Roberta, Lukas Wechner, and Thomas Kienberger. 2025. 'Techno-Economic Assessment of Hydrogen Supply Solutions for Industrial Site'. *International Journal of Hydrogen Energy* 104:611–22. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.09.099.
- FASTWATER. 2021. *Report on Methanol Supply, Bunkering Guidelines, and Infrastructure. Deliverable. 860251*. Lund: Lunds Universitet. https://www.fastwater.eu/images/fastwater/news/FASTWATER_D71.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- Faye, Omar, Jerzy Szpunar, and Ubong Eduok. 2022. 'A Critical Review on the Current Technologies for the Generation, Storage, and Transportation of Hydrogen'. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(29):13771–802. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.02.112.
- Gathmann, Moritz. n.d. 'Hydrogen-powered combustion engines for the maritime sector'. Retrieved 11 August 2025. <https://www.man-es.com/discover/designing-the-engines-of-the-future>.
- International Energy Agency IEA. 2019. *The Future of Hydrogen. Seizing Today's Opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan*. France: International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- Kawasaki. 2019. 'World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUIO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-Free Society'. https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487.
- Maritime, Baird. 2021. 'VESSEL REVIEW | Suiso Frontier – Japanese LH2 Carrier Sets the Pace in Hydrogen Transport'. <https://www.bairdmaritime.com/shipping/tankers/gas/vessel-review-suiso-frontier-japanese-lh2-carrier-sets-the-pace-in-hydrogen-transport>.
- Metanolis. 2023. *Vikipedija*.
- Methanol Institute. n.d. 'Methanol Safe Handling Manual'.
- Research and Markets. 2025. 'Methanol Market by Feedstock Source (Biomass, Coal, Natural Gas), Production Method (Bio-Methanol, Conventional Methanol), Purity Level, Purchase Option, Application, End-User Industry, Distribution Channel - Global Forecast 2025-2030'.
- Sand, Maria, Ragnhild Bieltvedt Skeie, Marit Sandstad, Srinath Krishnan, Gunnar Myhre, Hannah Bryant, Richard Derwent, Didier Hauglustaine, Fabien Paulot, Michael Prather, and David Stevenson. 2023. 'A Multi-Model Assessment of the Global Warming Potential of Hydrogen'. *Communications Earth & Environment* 4(1):203. doi:10.1038/s43247-023-00857-8.
- Shin, Hyun Kyu, and Sung Kyu Ha. 2024. 'Techno-Economic Analysis of Type III and IV Composite Hydrogen Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles'. *Advanced Composite Materials* 33(4):527–59. doi:10.1080/09243046.2023.2278258.
- Skeie, Ragnhild Bieltvedt, Marit Sandstad, Srinath Krishnan, Gunnar Myhre, and Maria Sand. 2025. 'Sensitivity of Climate Effects of Hydrogen to Leakage Size, Location, and Chemical Background'. *Atmospheric Chemistry and Physics* 25(9):4929–42. doi:10.5194/acp-25-4929-2025.
- Staffell, Iain, Daniel Scamman, Anthony Velazquez Abad, Paul Balcombe, Paul E. Dodds, Paul Ekins, Nilay Shah, and Kate R. Ward. 2019. 'The Role of Hydrogen and Fuel Cells in the Global Energy System'. *Energy & Environmental Science* 12(2):463–91. doi:10.1039/C8EE01157E.
- Togliattiazot. n.d. 'Production'. Retrieved 12 August 2025. <https://www.toaz.ru/en/production-eng>.
- Usman, Muhammad R. 2022. 'Hydrogen Storage Methods: Review and Current Status'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167:112743. doi:10.1016/j.rser.2022.112743.

- Valera-Medina, A., H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen. 2018. 'Ammonia for Power'. *Progress in Energy and Combustion Science* 69:63–102. doi:10.1016/j.pecs.2018.07.001.
- Zamfirescu, C., and I. Dincer. 2009. 'Ammonia as a Green Fuel and Hydrogen Source for Vehicular Applications'. *Fuel Processing Technology* 90(5):729–37. doi:10.1016/j.fuproc.2009.02.004.