

UUPO – Merilogistiikan uudet polttoaineet vihreän
siirtymän ja sinisen kasvun vauhdittajina

Polttoaine Tietopaketti: Vety



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu



SATAKUNTALIITTO
Regional Council of Satakunta

2024

Perustietoa

Vety

Vety (H) on maailmankaikkeuden yksinkertaisin, sekä yleisin alkuaine, joka koostuu yhdestä protonista ja elektronista. Normaalilämpötilassa ja -paineessa vety on kevyt, väritön, sekä hajuton kaasu. Vaikka vety on äärimmäisen yleinen alkuaine, sen löytäminen vapaana kaasuna on harvinaista. Tämä johtuu vedyn reaktiivisuudesta, jonka vaikutuksesta se on usein sitoutuneena erilaisissa yhdisteissä muiden alkuaineiden kanssa. ^[1]

Tällä hetkellä vety on olennaisessa asemassa monilla eri teollisuudenaloilla, kuten kemian, teräksen ja muiden alojen tuotantoprosesseissa. ^[2]

Tulevaisuudessa vedyn tuotanto ja käyttö tulevat muuttumaan merkittävästi, koska esimerkiksi monet uudet synteettiset polttoaineet tarvit-

sevat vetyä raaka-aineena. Myös vetyä itsessään tullaan käyttämään laajemmin polttoaineena, sekä polttomootoreissa, että polttokennoissa. Etuna vedyn käytössä polttoaineena on sen hiilivapaus, eli sen poltto tai käyttö ei tuota lainkaan hiilidioksidia ja optimaalisissa olosuhteissa palamisreaktion lopputuotteina syntyy vain vettä. Lisäksi vetyä voidaan valmistaa hiilineutraaleilla valmistusmenetelmillä, joka mahdollistaa erittäin matalat elinkaaripäästöt.

Vaikka vedyllä on paljon potentiaalia toimia puhtaana merenkulun polttoaineena, sen käyttöönottoa hankaloittavat useat eri tekijät. Näihin teki- jöihin lukeutuu muun muassa infrastruktuurin puute, paloturvallisuusriskit, vedyn matala energiatiheys, sekä varastointiin ja säilytykseen liittyvät haasteet.

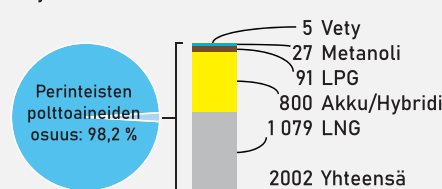
Tärkeitä näkökohdat:

1. Vety on hiilivapaa polttoaine, eli sen käytöstä ei aiheudu hiilipohjaisia kasvihuonekaasupäästöjä
2. Vety ei ole itsessään kasvihuonekaasu, mutta ilmakehässä se voi vaikuttaa epäsuorasti ilmastolämpenemiseen
3. Vedyn varastointi on erittäin haasteellista ja sen käyttöön liittyy merkittäviä palo- ja räjähdysvaaroja
4. Vedyn matala energiatiheys saattaa rajoittaa sen käyttöä pääasiassa lyhyemmille matkoille ja meriväylille
5. Vedyn laajempi käyttö edellyttää täysin uuden infrastruktuurin ja jakeluketjun luomisen

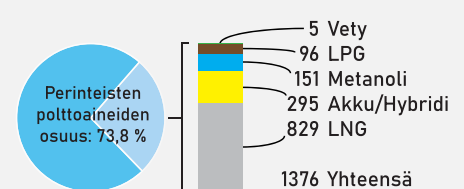
Kuvio 1. Maailman laivaston vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönotto alusten määrän mukaan (yläosa) ja bruttovetoisuuden mukaan (alaosa), heinäkuu 2023

Alusten määrä

Käytössä olevat alukset

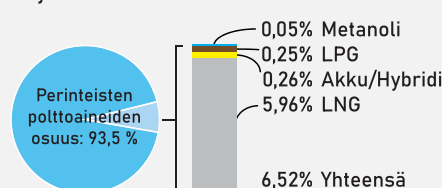


Tilauksessa olevat alukset

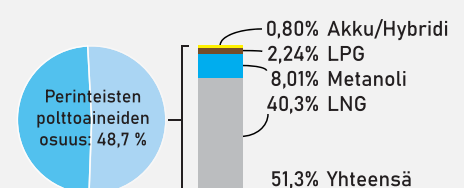


Bruttovetoisuus

Käytössä olevat alukset



Tilauksessa olevat alukset



Valmistusmenetelmät



Vetyä voidaan valmistaa monilla eri tavoilla, ja tuotantoprosessin sekä käytettyjen raaka-aineiden perusteella se luokitellaan tyypillisesti eri väri- luokkiin.

Harmaa vety

Harmaa vety tuotetaan höyryreformoimalla maakaasua. Höyryreformointi prosessissa maakaasua lämmitetään vesihöyryn avulla katalyytin läsnä ollessa, jolloin maakaasu ja vesihöyry reagoivat keskenään. Reaktion lopputuloksena syntyy synteetikaasua, joka koostuu pääasiassa hiilimonoksidista ja vedystä. Usein syntynyttä hiilimonoksidia jatkojalostetaan vesikaasuprosessilla. Kyseisessä prosessissa hiilimonoksidi ja vesihöyry reagoivat tuottaen hiilidioksidia, sekä lisää vetyä. Vety erotellaan hiilipohjaisista kaasuista, sekä muista epäpuhtauksista paineenvaihteluadsorptiolla, jolloin lopputuloksena saadaan käytännössä puhdasta vetyä. [3]

Harmaa vety on selvästi yleisin vedyn tuotantotapa ja se vastasi vuonna 2022 noin 62 % kaikesta maailman tuotetusta vedystä. [4]

Musta ja ruskea vety

Tyypillisesti musta ja ruskea vety viittaavat vetyyn, joka on tuotettu, joko kivihiilestä tai ruskohiilestä. Molempia vetyjä saadaan näistä raaka-aineista hiilikaasutusprosessin avulla.

Hiilikaasutusprosessissa kivi- tai ruskohiili kuumennetaan korkeisiin lämpötiloihin hapen, ilman tai vesihöyryn läsnä ollessa. Tämän seurauksena prosessissa käytetyn raaka-aineen hiili reagoi hapen kanssa, hapettuen osittain ja näin synnyttäen synteetikaasua. Tuotettua synteetikaasua voidaan jatkojalostaa samantyyppisesti kuin harmaan vedyn synteetikaasua. [5]

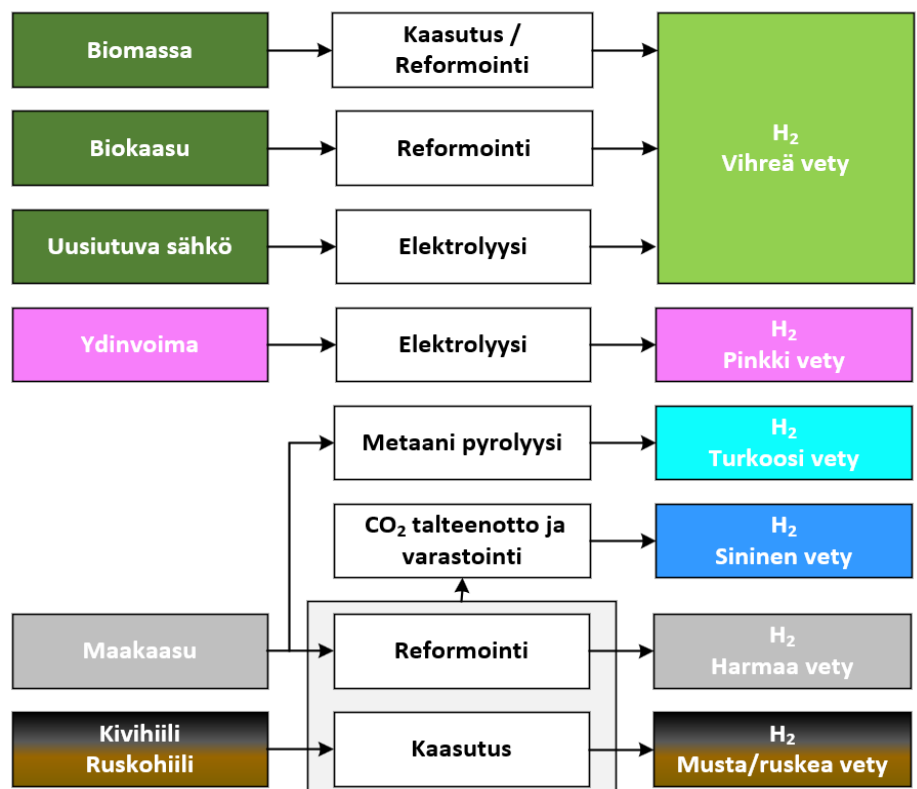
Musta ja ruskea vety on kaikista vedyn tuotantotavoista ympäristölle kuormittavin, sillä niiden tuotannosta syntyy paljon erilaisia kasvihuonekaasupäästöjä. [6]

Mustan ja ruskean vedyn osuus maailman vedyntuotannosta vuonna 2022 oli noin 21 %. [7]

Sininen vety

Sinistä vetyä tuotetaan samoilla tuotantoprosesseilla kuin harmaata, mustaa ja ruskeaa vetyä, mutta tuotantoprosessien aikana syntyneet kasvihuonepäästöt estetään osittain pääsemästä ilmakehään erilaisilla teknologisilla ratkaisuilla. Esimerkkejä tästä ovat muun muassa hiilidioksidin talteenotto missä syntyneet päästöt otetaan talteen ja lopuksi sijoitetaan geologisiin varastoihin. Talteen otettu hiilidioksi-

Kuvio 2. Vedyn valmistuksen päämenetelmät



Valmistusmenetelmät



di voidaan myös hyötyä käyttä erilaisissa prosesseissa kuten synteettisten polttoaineiden valmistuksessa. Vuonna 2022 vedyn osuus, jota tuotettiin fossiilisista raaka-aineista käyttämällä hiilidioksidin talteenotto teknologioita oli noin 0,6 %. ^[8]

Vaikka sininen vety vaikuttavat teoriassa lupaavalta, niin 2021 julkaistussa tutkimuksessa selvisi, että sinisen vedyn tuotamat hiilidioksidiekvivalenttipäästöt olivat vain noin 9–12 % pienemmät verrattuna harmaaseen vetyyn. Suurin vaikuttaja tälle oli metaani hajapäästöt, joita havaittiin syntyvän paljon sinisen vedyn tuotannossa, koska maakaasua käytettiin usein myös energialähteenä hiilidioksidin talteenotto prosesseissa. Tutkimustulos herättää kysymyksiä sinisen vedyn ympäristöystävällisyydestä ja sen kyvystä vähentää päästöjä merkittävästi verrattuna vedyn muihin tuotantomuotoihin. ^[9]

Vihreä vety

Vihreää vetyä tuotetaan tyyppillisesti vedestä pilkkomalla sen molekyylillä sen rakenneosiin uusiutuvan sähkön ja elektrolyysin avulla. Yleisimmät elektrolyysiteknologiat ovat alkali-, PEM- ja höyryelektrolyysi. ^[10]

Elektrolyysillä valmistettu vety ei tuota lainkaan hiilidioksidipäästöjä, mikä tekee siitä ympäristöystävällisenvaihtoehtona verrattuna muihin tuotantot-

poihiin. Haasteita kuitenkin luo elektrolyysiprosessin vaatima suuri energiamäärä, josta vain osa voidaan hyödyntää itse vedyn tuotantoon. Elektrolyysilaitoksessa noin 60 % sähköstä voidaan muuntaa vedyn kemialliseksi energiaksi, kun taas 30 % sähköenergiasta muuttuu hukkalämmöksi. Loput sähköenergiastamenevätkokonaan hukkaan. ^[11] Prosessin kokonaistehokkuus on siis melko matala, mikäli hukkalämpöä ei hyödynnetä mihinkään. Muita ongelmia elektrolyysi vedylle voi aiheuttaa esimerkiksi makean veden, sekä elektrolyysaattorien saatavuus. ^[12] Nämä kaikki haasteet voivat vaikuttaa

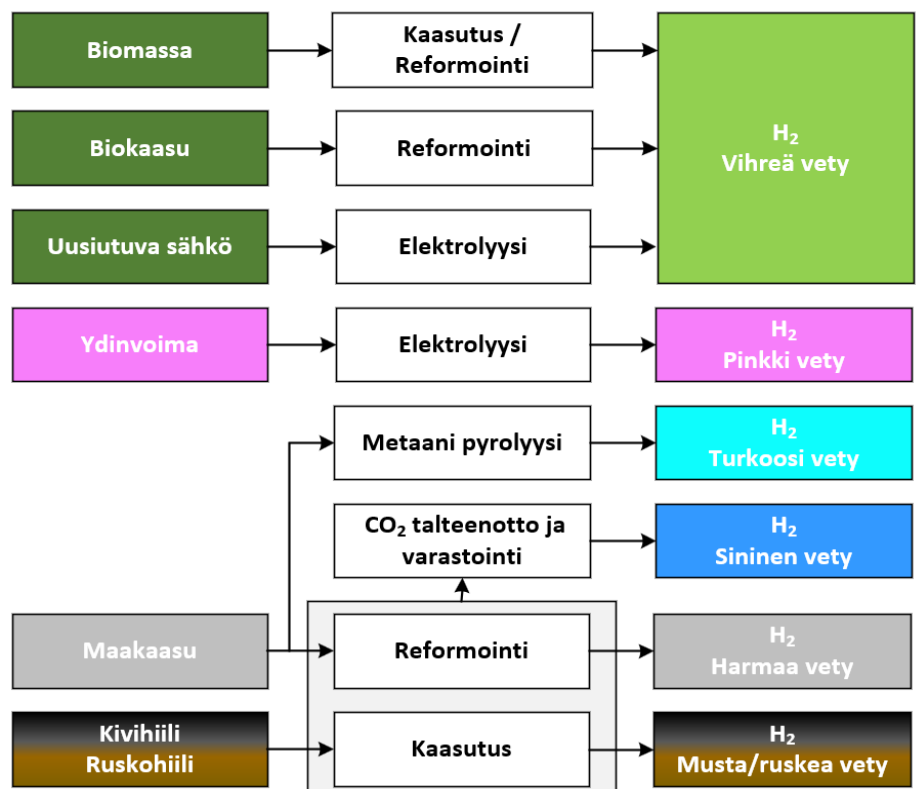
merkittävästi vihreän vedyn kustannuksiin ja kasvuun, erityisesti alueilla, joilla uusiutuvan energian resurssit eivät ole runsaat ja makean veden saatavuus on rajoitettua.

Elektrolyysin lisäksi vihreää vetyä voidaan tuottaa kaasuttamalla biomassaa tai reformoimalla biokaasua. ^[13]

Pinkki vety

Pinkkiä vetyä voidaan valmistaa elektrolyysin avulla, mutta toisin kuin vihreän vedyn tuotannossa, energialähteenä käytetään uusiutuvan sähkön sijasta ydinvoimalla tuotettua sähköä. Ydinvoimalla tuotetun

Kuvio 2. Vedyn valmistuksen päämenetelmät



Valmistusmenetelmät



sähkön ollessa käytännössä hiilivapaata, tämä mahdollistaa myös vähäpäästöisen vedyn tuotannon. ^[14]

Turkoosi vety

Turkoosi vety tuotetaan harmaan vedyn lailla maakaasua hyödyntäen. Erona näiden tuotantotapojen välillä on se, että turkoosissa vedyssä maakaasu pilkotaan sen rakenneosiin pyrolyysin avulla. Tässä prosessissa lopputuotteina syntyy vetyä, sekä kiinteää hiiltä, jolloin tämä hiili voidaan helposti ottaa talteen ja varastoida. Tämä vähentää prosessista aiheutuvia kasvihuonepäästöjä huomattavasti verrattuna harmaaseen vetyyn. Turkoosi vety on kuitenkin vielä melko uusi tapa tuottaa vetyä ja kauppal-

lisen tason demonstraatio laitoksia ollaan vasta rakentamassa. ^[15]

Valkoinen vety

Valkoista vetyä ei suoranaisesti valmisteta mistään vaan se on luonnossa esiintyvä vety, joka on varastoituneena maanalaisissa kerrostumissa. Sen talteenotto on kuitenkin hankalaa ja kerrostumissa voi olla myös muita haitallisia kaasuja varastoituneena, jotka voivat muun muassa edesauttaa ilmastolämpenemistä. Tällä hetkellä valkoista vetyä ei hyödynnetä missään, mutta tähän saattaa tulla muutos, sillä vuonna 2023 uutisoitiin kattavasta vety esiintymästä Ranskassa. Esiintymän koko oli noin 46 Mt eli lähes puolet maailman nyky-

sestä vedyn vuosituotannosta. Löydös tehtiin Regalor-hankkeen aikana ja esiintymän vaikutuksesta hanketta päätettiin jatkaa tarkoituksena keksiä tapoja, jolla tätä vetyä voidaan hyötyä käyttää. ^[16]

Muu tuotanto

Vetyä syntyy myös merkittäviä määriä eri teollisuuden sivutuotteena. Erityisesti isoja määriä syntyy polttoaineteollisuudesta ja tämä usein hyödynnetään polttoainetalostamoiden omissa toiminnoissa kuten vetykrakkauksessa ja polttoaineiden rikinpoisto prosesseissa. Sivutuotteena syntyneen vedyn osuus kaikesta tuotetusta vedystä vuonna 2022 oli noin 16 %. ^[17]



Ominaisuudet ja turvallisuus



Polttoaine ominaisuudet

Nestemäisen vedyn (LH_2) tehollinen lämpöarvo on selvästi suurin kaikista polttoaineista. Se on noin kolminkertainen verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin, kuten dieseliin ja raskaaseen polttoöljyyn, joiden tehollinen lämpöarvo on noin 40 MJ/kg. On kuitenkin tärkeä ymmärtää että, nestemäisen vedyn erittäin matalan tiheyden vaikutuksesta, sen energiasisältö verrattuna tilavuuteen on todella alhainen. Polttoöljyyn verrattuna vety vaatii noin viisinkertaisen tilan samalle energiamäärälle. [18]

Vedyn korkean itsesyttymislämpötilan vaikutuksesta sen käyttö polttomoottoreissa voi olla haasteellista. Käytännössä, tämä tarkoittaa, että kun vetyä käytetään polttomoottorissa,

polttokammioissa tarvitaan suhteellisen korkeita paineita ja lämpötiloja, joka voi aiheuttaa ylimääräistä stressiä moottorille ja muille osille. [19]

Vedyllä on kuitenkin joitakin positiivisia polttoaine ominaisuuksia. Sillä on muun muassa laaja syttymisraja, eli sitä voidaan polttaa laajalla polttoaine-ilma suhteella. Tämä tekee myös moottorin käynnistämisestä helpompaa. Lisäksi korkean liekkiirintaman nopeuden ja diffuusiokyvyn ansiosta vety palaa tehokkaammin ja puhtaammin kuin monet muut polttoaineet. [20]

Turvallisuus

Muihin polttoaineisiin verrattuna vedyn etuihin lukeutuu sen myrkyttömyys ihmisille ja muille eliöille. Nestemäisen vedyn erit-

täin matalan lämpötilan vaikutuksesta voi kuitenkin aiheutua paleltumavammoja. [21]

Vaikka vety on suhteellisen myrkytön polttoaine, sen käyttöön liittyy merkittäviä paloja ja räjähdysvaaroja. Laajan syttymisrajan vaikutuksesta vety voi pienissäkin määrin muodostaa palavan kaasuseoksen ilman kanssa. Optimaalisissa olosuhteissa vety-ilma-seoksen syttymisenergia on noin viidestoistaosa bensiinin syttymisenergiasta. [22] Tämän vuoksi vedyn käsittely ja varastointi edellyttävät erityisiä turvatoimia ja tarkkaa valvontaa. Merenkulussa vedyn käyttöpolttoaineena vaatii uusien turvallisuusprotokollien ja teknologioiden kehittämistä, jotta voidaan vähentää riskejä ja varmistaa turvallinen toiminta.

Polttoaine	Energia ja säilytys					Syttvyys		
	Tiheys	Tehollinen lämpöarvo (LHV)	Energia-tiheys	Kiehumis-piste	Polttoaineen tilantarve vs LSHFO	Itsesyttymis-lämpötila ilmassa	Leimahdus-piste	Syttymis-rajat ilmassa
	[kg/m ³]	[MJ/kg]	[MJ/m ³]	[°C]		[°C]	[°C]	[%]
LSHFO	993	40,5	40 217	> 180	-	230	> 60	0,6 - 7,5
MDO	819	40,5	33 170	> 180	1,21	210	> 60	0,6 - 7,5
LNG	450	49,1	22 095	-162	1,82	540	-188	5,0 - 15,0
MeOH	792	19,9	15 761	65	2,55	464	12	6,7 - 36,0
EtOH	789	26,8	21 145	78	1,90	365	17	3,3 - 19,0
L NH ₃	680	18,6	12 648	-33	3,18	651	132	15,0 - 28,0
L H₂	70	120	8 400	-253	4,79	585	-	4,0 - 75,0
FAME	880	37,2	32 736	> 180	1,23	261	> 61	0,6 - 7,5
HVO	780	44	34 320	> 180	1,17	204	> 61	0,6 - 7,5
FT-Diesel	785	43,2	33 912	> 180	1,19	204	89	0,6 - 7,5

Tuotanto



Maailmanlaajuinen tuotanto

IEA:n arvion mukaan maailman vuotuinen vedyntuotanto oli noin 90 Mt vuonna 2020. Vuonna 2022 tuotantomäärä oli kasvanut noin 95 miljoonaan tonniin, mikä tarkoittaa noin 3 prosentin vuotuista kasvua vuosien 2020–2022 välillä. Selvästi suurin osa tästä vedystä tuotettiin maakaasun höyryreformoinnin avulla, jonka jälkeen hiilikaasutusprosessi oli toiseksi yleisin tuotantotapa. Vaikka matalapäästöisen vedyntuotannon osuus on tällä hetkellä alle prosentin koko tuotannosta, odotetaan sen kapasiteetin kasvavan merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Julkistettujen matalapäästöisen vedyntuotannon hankkeiden tuotannonkapasiteetti oli 2023 arvioin mukaan noin 20 Mt ja kun mukaan laskettiin varhaisessa vaiheessa olevat hankkeet, tämä luku nousi 38 miljoonaan tonniin. Suurin osa tästä tuotannosta tulee tapahtumaan elektrolyysin avulla. ^[23]

Tuotanto voi tapahtua myös muualla kuin isoissa tuotantolaitoksissa, sillä ranskalainen yhtiö Lhyfe demonstroi vuonna 2023, että vetyä voidaan tuottaa avomerellä kelluvalla tuotantolaitoksella hyödyntämällä merituulivoimaa. Tulevaisuudessa laivat voisivatkin helposti hyödyntää merellä tuotettua vetyä. ^[24]

DNV:n arvioin mukaan maailmanlaajuinen vedyn tarve vuonna 2050 tulee olemaan yli 300 Mt vuodessa, kun taas IEA on arvioinut tämän tarpeen olevan

noin 400 Mt. ^[25] ^[26] Joidenkin arvioiden mukaan vedyn tarve vuonna 2050 tulee olemaan jopa noin 500 Mt. ^[27]

Tulevaisuuden näkymät Suomessa ja Satakunnassa

Suomessa valmistettiin vuonna 2020 noin 145 000 tonnia vetyä, josta suurin osa tuotettiin höyryreformoinnin avulla. Lisäksi eri teollisuuden prosesseista syntyi vetyä sivutuotteena noin 20 000 tonnia. Suurimmat vedyn kuluttajat olivat öljynjalostamot, sekä biopolttoaineiden tuottajat. ^[28]

Vedyn tuotanto Suomessa tulee kuitenkin kasvamaan huomattavasti lähivuosina. Suunnitteluvaiheessa olevia hankkeita on useampia ja näiden hankkeiden investointien suuruus on useamman miljardin arvoisia. Suurimpien hankkeiden takana on yhdysvaltalainen Plug Power, jolla on suunnittelemisessa rakentaa kolme vihreän vedyntuotantolaitosta Kokkolaan, Kristiinankaupunkiin ja Porvooseen. Hankkeet ovat kuitenkin vielä suunnitteluvaiheessa ja lopullinen investointipäätös tullaan tekemään vasta vuosien 2025 ja 2026 aikana. ^[29]

Myös Euroopan suurinta turkoosin vedyn demonstraatio tuotantolaitosta ollaan suunnittelemassa Kokkolaan, missä pystyttäisiin tuottamaan vuosittain noin 2 000 tonnia vetyä. ^[30]

Lisäksi Suomessa tutkitaan vedyn tuotantoa Perämerellä, missä voitaisiin hyödyntää valtavien merituulipuistojen tuot-

tamaa uusiutuvaa energiaa vedyn tuotantoa varten. ^[31]

Osa näistä projekteista keskittyy tuottamaan puhdasta vetyä käytettäväksi erilaisissa prosesseissa ja polttoaineena. Toisissa projekteissa sen sijaan tuotettua vetyä tullaan hyödyntämään synteettisten polttoaineiden, kuten metanolin, ammoniakkin ja metaanin, valmistuksessa.

Satakunnan vedyn tuotanto näyttää myös lupaavalta, sillä P2X Solutions aloittaa vihreän vedyn tuotannon Harjavallassa vuoden 2024 aikana Suomen ensimmäisessä vihreän vedyn tuotantolaitoksessa. ^[32] Ren-Gas sen sijaan suunnittelee vihreän vedyn tuotantolaitosta Porin Aittaluodon biovoimalaitoksen läheisyyteen ja tuotannon on arvioitu alkavan vuonna 2027. ^[33] Myös Green North Energy on tehnyt selvitystyötä vedyn tuotantolaitoksen rakentamisesta Poriin. ^[34] Selvitystyötä vetytalouden mahdollisuuksista on lisäksi tehty Rauman alueella. ^[35]

Vaikka vihreän vedyn tuotanto näyttää lupaavalta niin on hyvä huomioida, että mikäli koko Suomen meriliikenteen laivasto siirtyisi käyttämään vihreää vetyä polttoaineena, sen tuottaminen elektrolyysin avulla vaatisi noin 59 TWh sähköä, kun huomioidaan sähkön siirrosta syntyvät häviöt. ^[36] Tämä vastaa noin 75 % nykyisestä sähköntuotannosta Suomessa. ^[37]

Tekniset näkökulmat

Infrastrukturi

Vety infrastruktuurissa on aina huomioitava vedyn käyttäytyminen erilaisten materiaalin kanssa. Vety ei ole suoranaisesti syövyttävä aine, mutta se voi haurastuttaa erilaisia metalleilta ja materiaaleja. Vetyhaurastumisessa vedyn pienen atomikoon ansiosta, se pääsee tunkeutumaan syvälle metallien rakenteeseen. Metallin rakenne pääsääntöisesti koostuu pienistä kiteistä, joiden väliin eli raerajoihin vety pakkaantuu, vähentäen metallin joustavuutta ja vetolujuutta. Tämä voi lopulta johtaa metallin vahvuuden heikkenemiseen ja sitä kautta rakenteen mahdolliseen pettämiseen. [38] Ilman asianmukaista suunnittelua ja materiaalien valintaa, vetyhaurastuminen voi aiheuttaa vakavia ongelmia esimerkiksi painesäiliöissä, putkistoissa tai muissa komponenteissa, joissa käsitellään vetyä. Siksi on tärkeää huomioida vetyhaurastumisen, sekä vedyn paloturvallisuuteen liittyvät riskit ja soveltaa asianmukaisia turvallisuusstandardeja ja -käytäntöjä vetyinfrastruktuurin suunnittelussa ja käytössä. [39]

Vedyn yksi isoimmista heikkouksista on se, että sitä ei voida suoraan käyttää fossiilisten polttoaineiden infrastruktuurissa. Vedyn laajempi käyttö käytännössä edellyttäisi siis täysin uuden infrastruktuurin ja jakeluketjun luomisen, mikä vaikeuttaa ja hidastaa sen käyttöönottoa merenkulussa. [40]

Kuljetus ja varastointi

Puhdasta vetyä kuljetetaan sekä paineistetussa että nestemäisessä muodossa usealla eri tavalla. Isompia määriä paineistettua vetyä siirretään tyypillisesti putkistoja pitkin, kun taas pienempiä tarpeita, kuten tankkausasemia varten, käytetään säiliöautoja. [41]

Paineistetun vedyn kuljetuksen etuihin voidaan huomioida se, että maakaasun siirtoputkistoa on tällä hetkellä maailmassa yli miljoona kilometriä. Näitä putkistoja voidaan muokata vedyn siirrolle sopiviksi, maakaasun siirron ja käytön hiipuesssa. Maailmanlaajuisesti itse vedylle tarkoitettu putkilinjasto on rakennettuna noin 5 000 km. [42] Nestemäistä vetyä sen sijaan kuljetetaan laivoilla ja säiliöautoilla, joissa varmistetaan, että nestemäinen vety säilyy alle sen kiehumispisteen lämpötilassa. [43]

Lisäksi vetyä voidaan kuljettaa erilaisten yhdisteiden, kuten ammoniakkin seassa, jolloin ammoniakki toimii käytännössä vedyn kantajana. Kyseisessä kuljetustavassa ammoniakki ensiksi tuotetaan vedyn ja typen avulla. Tämän jälkeen ammoniakki kuljetetaan määränpäähän, missä se pilkotaan takaisin vedyksi ja typeksi krakauksen avulla. Etuna tällä kuljetustavalla on se, että ammoniakkia on huomattavasti helpompi kuljettaa sen energiatihedyyden, sekä korkeamman

kiehumispisteen takia. Haittapuolina on kuitenkin ammoniakkin tuotannon, sekä krakauksen vaatima energia. [44]

Vedyn varastointi on haasteellista, sillä se on varastoitava kaasumaisena suhteellisen korkeassa paineessa tai nestemäisenä erittäin matalissa lämpötiloissa. Nykyisin kaasumaisen vedyn säilytys saattaa tapahtua jopa 700 bar:in paineessa. Nestemäinen varastointi sen sijaan vaatii kryosäiliöitä, jotka jatkuvasti jäähdyttävät vetyä, jotta lämpötila ei nouse yli kiehumispisteen. [45] Varastointia vaikeuttaa entisestään vedyn kyky tunkeutua varastointisäiliöiden seinämien läpi, mikä johtaa mahdollisiin vuotoihin ja turvallisuusriskeihin. [46]

Vedyn heikon energiatihedyyden takia näiden säiliöiden koko on huomattavasti suurempi verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin, jos halutaan varastoida sama määrä energiaa. [47]

Monet järjestöt ja asiantuntijat uskovat satamien olevan keskeisessä roolissa vetytalouden kasvaessa. Satamat tulevat toimimaan solmukohtina vetyinfrastruktuurille, mahdollistaen vetyä kuljettavien alusten saapumisen ja lähdön, sekä nestemäisen vedyn käsittelyn ja muuntamisen kaasumaiseen muotoon. [48]

Tekniset näkökulmat



Käyttö polttoaineena

Suurin osa tämänhetkisistä kul-kuneuvoista, jotka käyttävät vetyä voimanlähteenä, toimivat vetypolttokennojen avulla, jossa vety muutetaan suoraan sähköksi. Vetypolttokennot tuottavat myös paljon lämpöä, jota voidaan kuitenkin esimerkiksi laivojen tapauksessa hyödyntää helposti matkustajien tilojen lämmittämisessä. Usein vetypolttokennojen rinnalla käytetään erityyppisiä akkuratkaisuja.

Vety polttokennoilla toimivia autoja löytyy muun muassa eri autonvalmistajilta kuten Hyundaiilta ja Toyotalta. Hyundai on tämän lisäksi demonstroinut polttokennojen toimivuutta ras-kaassa liikenteessä ja vuonna 2020 he toimittivat Sveitsiin 10 polttokennolla toimivaa kuorma-autoa. ^[49]

Myös rautatieliikenteessä vety on todistettu toimivaksi vaihtoehdoksi. Saksassa otettiin käyttöön 14 vetykäyttöistä polttokennojunaa elokuussa 2022. Kuitenkin jo seuraavana vuonna vastuussa oleva liikenne-ministeriö ilmoitti, että junat siirtyvät jatkossa käyttämään sähköä ja akkuja taloudellisista syistä. ^[50] Vaikka junat olivat käytössä vain vuoden, ne osoittivat silti, että vety voi toimia rautatieliikenteen energianlähteenä.

Maa- ja rautatieliikenteen lisäksi vetyä on aloitettu hyödyntämään merenkulussa. Vuonna 2023 SWITCH Maritime alkoi operoimaan vetypolttokennoilla toimivaa 80:n hengen matkustajalauttaa Yhdysvalloissa San Franciscon lahdella. Samana vuonna Norjassa otettiin käyttöön vetypolttokennoilla toimiva auto- ja matkustajalautta MF Hydra. MF Hydra liikennöi Hjelmeland-Skipavik-Nesvik-reitillä ja kykenee kuljettamaan noin 300 matkustajaa ja 80 ajoneuvoa. Yhdysvaltalaisen matkustajalauttan polttokennojen kokonaisteho on noin 360 kW, kun taas MF Hydran polttokennojen kokonaisteho on ilmoitettu olevan 400 kW. ^{[51] [52]}

Myös tavaraliikennettä varten vetyä hyödynnetään esimerkiksi Länsi-Euroopan sisävesistöissä. Alankomaiden Rotterdamin ja Belgian Meerhout satamien välillä toimii 900 kilowatin vetypolttokennoilla varustettu proomualus H2 Barge 1. Alus oli alun perin nimeltään FPS Maas ja toimi perinteisellä polttomoottorilla, mutta se muutettiin toimimaan vetypolttoaineella vuoden 2022 ja 2023 välillä. ^[53]

Suurempia suunnitelmia vedyllä toimivista aluksista löytyy muun muassa tanskalaiselta DFDS laivayhtiöltä. Vuonna 2021 he ilmoittivat suunnitelmistaan ra-

kennuttaa noin kahden tuhannen hengen risteilyalus Oslo-Fredrikshavn-Kööpenhamina-reitille. Haasteena aluksen rakentamisessa kuitenkin on sen tarvitsema 23 000 kilowatin teho, sillä sen kokoisia poltto-kennojärjestelmiä ei ole vielä käytössä missään meriliikenteessä olevassa aluksessa. ^[54]

Polttokennoratkaisuiden lisäksi vety polttomootoreita tutkitaan ja kehitetään. Esimerkiksi MAN Energy Solutions julkaisi vuoden 2023 loppu puolella vety polttomootorin maatalouskoneiden käyttöön. ^[55] Yhtiö myös uutisoi vuoden 2024 maaliskuussa onnistuneesta laboratorio koeajasta, jossa he testasivat heidän merikäyttöön tarkoitettua kaksitahti vetypolttomootoria. ^[56]

Vaikka vetyä ei vielä laajasti käytetä merenkulussa, edistysaskeleet muilla aloilla, kuten maa- ja rautatieliikenteessä, voivat edistää sen käyttöönottoa myös meriliikenteessä. Lisäksi tutkimusta vedyn käytöstä laivoissa tehdään laajasti, joten on vain ajan kysymys, milloin vetyä aletaan hyödyntää merenkulussa enemmän. On kuitenkin hyvä huomioida, että vedyn heikon energiatheyden vaikutuksesta vedyn käyttö todennäköisesti rajoittuu enemmänkin lyhyemmän matkan, sekä pienempien laivojen ratkaisuksi.

Ympäristö näkökulmat



Vety tulee todennäköisesti näyttelemään merkittävää roolia merilogistiikan vihreässä siirtymässä, tarjoten kestävän vaihtoehdon perinteisille polttoaineille. Sen käyttö polttoaineena tuottaa huomattavasti vähemmän päästöjä verrattuna lähes mihin tahansa muuhun polttoaineeseen. Lisäksi vetyä voidaan tuottaa uusiutuvista energialähteistä, kuten aurinko- ja tuulivoimasta, mikä vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja alentaa merenkulun päästöjä.

On kuitenkin tärkeää huomioida vedyn heikkoudet, kun tarkastellaan sen käyttöön ja valmistukseen liittyviä ympäristönäkökulmia.

Kasvihuonekaasupäästöt

Vedyn käyttö polttoaineena ei tuota mitään muuta kasvihuonekaasua kuin vesihöyryä. Vesihöyryn vaikutus ilmastoon lämpenemiseen on monimutkainen ja erilainen kuin monien muiden kasvihuonekaasujen. Suurin osa kasvihuonekaasuista kuten hiilidioksidi ja metaani pysyvät ilmakehässä kaasumaisessa muodossa, kun taas vesihöyry voi muuttua kaasusta nesteeksi ja poistua ilmakehässä varsin nopeasti. Tämä tarkoittaa, että ihmiskunnan tuottama vesihöyry ei aiheuta suurta määrää ilmastolämpen-

nemistä verrattuna esimerkiksi hiilidioksidiin. ^[57]

Uudet tutkimukset ovat osoittaneet, että vaikka vety sinänsä ei ole kasvihuonekaasu, sillä voi silti olla vaikutus ilmastoon lämpenemiseen. Tämä johtuu siitä, että vety reagoi ilmakehässä hydroksyyli- ja radikaalin (OH) kanssa muodostaen erilaisia yhdisteitä. Hydroksyyli- ja radikaalit ovat myös avainasemassa metaanin poistumisessa ilmakehässä, ja lisääntynyt vety ilmakehässä voi teoriassa hidastaa metaanin poistumista siten, että hydroksyyli- ja radikaalit kuluvat reagoiden vedyn kanssa, eivätkä siten ole käytettävissä metaanin hajottamiseen. Tämän takia olisi kriittistä, että mahdollisimman vähän vetyä pääsisi karkaamaan ilmakehään vedyn valmistuksessa, kuljetuksessa, varastoinnissa, sekä käytössä. Tämä on suhteellisen haasteellista, sillä vety on erittäin pieni molekyyli, joka helposti vuotaa jopa pienten rakojen ja huokosten läpi. Vedyn vaikutukset ilmastolämpenemiseen vaatii kuitenkin vielä lisätutkimusta, jotta saataisiin parempi ymmärrys sen todellisista vaikutuksista. ^[58]

Lisäksi on hyvä huomioida, että vedyn tuotannosta voi syntyä merkittäviä määriä kasvihuone-

päästöjä, mikäli vety on tuotettu fossiilipohjaisista raaka-aineista.

Typen oksidien (NOx) päästöt

Vetypolttokennot eivät tuota typen oksideja, mutta muiden polttomoottoreiden tavoin, vetypolttomootorit tuottavat NOx-päästöjä, kun ilmassa oleva typpi reagoi hapen kanssa korkeissa lämpötiloissa. ^[59]

Rikin oksidien (SOx) päästöt

Vety ei sisällä rikkiä, joten se ei tuota lainkaan rikin oksideja. Näitä päästöjä voi kuitenkin syntyä, mikäli polttomoottorissa käytetään pilottipolttoainetta. ^[60]

Muut päästöt

Vety ei tuota muita päästöjä kuten esimerkiksi pienhiukkastai VOC-päästöjä. Mahdolliset pilottipolttoaineet voivat kuitenkin tuottaa erilaisia päästöjä, riippuen siitä mitä pilottipolttoainetta käytetään. ^[61]

Vetyvuodot

Vetyvuodot eivät aiheuta ympäristölle ongelmia, sillä vety on kevyin kaikista kaasuista, mikä tarkoittaa, että se nousee nopeasti ilmakehän ylempiin kerroksiin ja hajaantuu. Lisäksi vety on myrkytön eikä aiheuta suoria haittoja terveydelle tai kasvillisuudelle. ^[62]

Yhteenvedo

Vety ei ole vielä laajemmin käytössä merenkulussa ja se nähdään ammoniakkin tavoin enemmänkin tulevaisuuden polttoaineena, sillä sen käyttöön liittyy edelleen merkittäviä haasteita. Esimerkiksi vedyn varastointiin ja jakeluun liittyvät ongelmat ovat ratkaistava ennen kuin vetyä voidaan käyttää laajemmin polttoaineena. Turvallisuusnäkökohdat ovat myös keskeisiä asioita, joita on kehitettävä, sillä vety on erittäin tulenarkaa ja sen käsittely vaatii tarkkaa valvontaa ja erityisjärjestelyjä räjähdysvaaran vähentämiseksi. Vedyn vaikutusta ilmastomuutokseen ei myöskään vielä

ymmärretä täysin, joten tutkimustyötä tarvitaan lisää tämän osalta. Lisäksi energiatieteiden vuoksi vetyä pidetään tällä hetkellä ensisijaisesti lyhyiden matkojen ja sisävesireittien polttoaineena, eikä niinkään valtameriliikenteen energialähteenä.

Vedyn valmistus myös tuottaa tällä hetkellä paljon kasvihuonekaasupäästöjä, mutta vihreän vedyn tuotanto yleisty koko ajan. Nykyiset elektrolyysilaitteet toisaalta tarvitsevat usein erilaisia harvinaisia mineraaleja, joiden saatavuus voi olla rajoitettua ja alttiita geopolitiisille jännitteille, sekä markkinoiden hin-

tavaihteluille. Näiden mineraalien tuotantoketjuun saatavaa liittyä muitakin haasteita, kuten erilaisia ympäristövaikutuksia ja sosiaalisia ongelmia. Elektrolyysiteknologia kuitenkin kehittyy nopeasti, joten tulevaisuudessa elektrolyysilaitteissa saatetaan käyttää laajemmin saatavilla olevia materiaaleja.

Haasteista huolimatta vedyllä on paljon etuja, sillä se voi vähentää merenkulun päästöjä huomattavasti. On selvää, että vedyllä tulee olemaan merkittävä rooli tulevaisuuden merenkulussa, joko suoraan polttoaineena tai synteettisten polttoaineiden raaka-aineena.

Vahvuudet

- + Vedyn käyttö polttomoottoreissa ei tuota lainkaan hiilipohjaisia kasvihuonekaasupäästöjä
- + Vetyä pystytään valmistamaan hiilineutraaleilla menetelmillä
- + Ei ole myrkyllinen ihmisille, eliöille tai ympäristölle
- + Maakaasuputkistot voidaan muuntaa vedylle sopiviksi maakaasun käytön vähentyessä
- + Vety ei tuota lainkaan SOx- tai pienhiukaspäästöjä
- + Vetypolttokennot eivät tuota lainkaan päästöjä
- + Vetyä saatetaan tulevaisuudessa ottaa talteen geologisista varastoista

Heikkoudet

- Vety ei ole vielä käytössä merenkulussa, joten sen käyttöön liittyvät standardit ja käytännöt ovat vielä kehitysvaiheessa.
- Vedyn jakelu ja varastointi on erittäin haastavaa
- Vedyn käyttöön liittyy erilaisia palo- ja räjähdysturvallisuus riskejä
- Lisääntynyt vety ilmakehässä saattaa edistää ilmastomuutosta
- Vedyn energiatiheys on matalin kaikista polttoaineista, joten sen varastointi vie paljon tilaa
- Ei pystytä hyödyntämään olemassa olevaa fossiilisten polttoaineiden infrastruktuuria ilman suuria muutoksia
- Elektrolyysiprosessissa vain osa sähköenergiasta pystytään muuntamaan vedyn kemialliseksi energiaksi
- Suurin osa vedystä tuotetaan tällä hetkellä fossiilisista raaka-aineista

Lähteet

- [1] Jolly, W. L. (n.d.). Reactivity of hydrogen. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.britanica.com/science/hydrogen/Reactivity-of-hydrogen>
- [2] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 21-22). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [3] Department of Energy. (n.d.). Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [4] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 64). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [5] Metropolitan Washington Council of Governments. (n.d.). Fact sheet series: Hydrogen production from coal. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.mwcog.org/file.aspx?&A=6l-JMMDOHmOUL2TT9fb7pcrAAeY5PdpMxMeZbS9eJzyo%3D>
- [6] DNV. (2022). Hydrogen forecast to 2050. (s. 49). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>
- [7] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 64). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [8] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 64). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [9] Howarth, R. W., & Jacobson, M. W. (2021). How green is blue hydrogen? Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.956>
- [10] Lahtinen, L. (2019). Vedyn tuotanto pienen kokoluokan elektrolyysilaitteilla. (s. 8). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159332/Kandidaatinty%C3%B6_Lahtinen_Lauri.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] Juuti, P. (2022). Biovoimalan päästöistä ja vedystä tehtiin onnistuneesti polttoainetta Keravalla – se on uusi ja tarpeellinen keino ilmastokriisin hillitsemisessä. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://yle.fi/a/3-12265099>
- [12] Joukanen, T. (2023). Maailman ensimmäinen vihreän vedyn tuotantolaitos avomerellä läpäisi testit – Suomeen on suunnitteilla tuotantoa Perämerelle. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://yle.fi/a/74-20062706>

Lähteet

- [13] Ringsgwandi, L. M., Schaffert, J., Brücken, N., Albus, R., & Görner, K. (2022). Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany. (s. 4). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/358926929_Current_Legislative_Framework_for_Green_Hydrogen_Production_by_Electrolysis_Plants_in_Germany
- [14] National Grid. (2023). The hydrogen colour spectrum. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
- [15] Sánchez-Bastardo, N., Schlögl, R., & Ruland, H. (2021). Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.1c01679>
- [16] King, L. (2023). Is France home to the world's largest deposit of natural hydrogen? (2023). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://hydrogentoday.info/en/natural-hydrogen-france-lorraine/>
- [17] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 64). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [18] Bertagna, S., Kouznetsov, I., Braidotti, L., Marino, A., & Bucci, V. (2023). A Rational Approach to the Ecological Transition in the Cruise Market: Technologies and Design Compromises for the Fuel Switch. (s. 4). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/366818830_A_Rational_Approach_to_the_Ecological_Transition_in_the_Cruise_Market_Technologies_and_Design_Compromises_for_the_Fuel_Switch
- [19] Salahi, M. M., Andwari, A. M., Könnö, J., Gharehghani, A. (2022). Hydrogen and ammonia fuelled internal combustion engines, a pathway to carbon-neutral fuels future. (s. 34). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/33759/nbn-fi-fe2022120970382.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] College of the Desert. (2001). Hydrogen Use In Internal Combustion Engines. (s. 3-3). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf
- [21] Hydrogen Association. (n.d.). Fact sheet series: hydrogen safety. (s. 2). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf
- [22] Hydrogen Association. (n.d.). Fact sheet series: hydrogen safety. (s. 2). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf
- [23] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 64-66). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

Lähteet

- [24] Joukanen, T. (2023). Maailman ensimmäinen vihreän vedyn tuotantolaitos avomerellä läpäisi testit – Suomeen on suunnitteilla tuotantoa Perämerelle. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://yle.fi/a/74-20062706>
- [25] DNV. (2022). Hydrogen forecast to 2050. (s. 71). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>
- [26] International Energy Agency. (2023). Global hydrogen demand in the Net Zero Scenario, 2022-2050. Haettu 09.10.2024 osoitteesta: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-hydrogen-demand-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>
- [27] International Chamber of Shipping. (2024). New hydrogen demand report unveils once in a generation opportunity. Haettu 09.10.2024 osoitteesta: <https://www.ics-shipping.org/press-release/new-hydrogen-demand-report-unveils-once-in-a-generation-opportunity/>
- [28] Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., & Patronen, J. (2022). Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. (s. 111-112). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf
- [29] Lindholm, P., & Halla-Aho, E. (2023). Suomi on saamassa uuden miljardi-investoinnin: Amerikkalaisyhtiö suunnittelee Suomeen kolmea vedyntuotantolaitosta. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://yle.fi/a/74-20034105>
- [30] Martin, P. (2024). Construction begins at Europe's largest turquoise hydrogen facility. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.hydrogeninsight.com/production/construction-begins-at-europe-s-largest-turquoise-hydrogen-facility/2-1-1586206>
- [31] Vihanta, A. (2022). Kilpailu suurelle merituulivoimapuistolle sopivasta paikasta käy kuumana Perämerellä – kahden hankkeen suunnitelmat julkaistiin muutaman viikon välein samalle alueelle. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://yle.fi/a/74-20001611>
- [32] P2X Solutions. (2023). Ensimmäiset elektrolyysilaitteet saapuivat P2X Solutionsin Harjavalan vetylaitoksen työmaalle. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://p2x.fi/ensimmaiset-elektrolyysilaitteet-saapuivat-p2x-solutionsin-harjavalan-vetylaitoksen-tyomaalle/>
- [33] Nordic Ren-Gas. (2023). Pori Energia ja Nordic Ren-Gas hankekehitysyhteistyöhön – hiilidioksidin talteenotolla ja jatkojalostuksella kohti hiilinegatiivista tulevaisuutta. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://ren-gas.com/ajankohtaista/pori-energia-ja-nordic-ren-gas-hankekehitysyhteistyohon-hiilidioksidin-talteenotolla-ja-jatkojalostuksella-kohti-hiilinegatiivista-tulevaisuutta/>
- [34] Business Finland. (2024). Green North Energy monistaa Business Finlandin rahoittamaa vetylaitoskonseptiaan Poriin ja Kemiin – Tähtäimessä Suomen omavaraisuus ammoniakkin tuotannossa. Haettu 09.10.2024 osoitteesta: <https://www.businessfinland.fi/ajankohtaista/uutiset/tiedotteet/2024/green-north-energy-monistaa-business-finlandin-rahoittamaa-vetylaitoskonseptiaan-poriin-ja-kemiin--tahtaimessa-suomen-omavaraisuus-ammoniakin-tuotannossa>

Lähteet

- [35] Rauma. (2024). Selvitys vetytalouden mahdollisuuksista Raumalla. Haettu 09.10.2024 osoitteesta: <https://www.rauma.fi/ajankohtaista/selvitys-vetytalouden-mahdollisuuksista-raumalla/>
- [36] Michaux, S. P., Vadén, T., Korhonen, J. M., & Eronen, J. T. (2022). Assessment of the scope of tasks to completely phase out fossil fuels in Finland. (s. 43). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/18_2022.pdf
- [37] Energiatieto. (n.d.). Sähköntuotanto. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://energia.fi/energiatieto/energiantuotanto/sahkontuotanto/>
- [38] Industrial Metallurgists. (n.d.). Hydrogen Embrittlement of Steel. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.imetllc.com/hydrogen-embrittlement-steel/>
- [39] DNV. (2022). Hydrogen forecast to 2050. (s. 56). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>
- [40] Vanhanen, J., Pulkkinen, A., Salmi, W., Beniard, M., Järvinen, K., & Lehtomäki, J. (2022). Meriliikenteen vaihtoehtojen polttoaineiden markkinoiden kehitys ja vaikutukset Suomeen suuntautuvan meriliikenteen kustannuksiin. (s. 33). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://ju-lkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164405/LVM_2022_13.pdf?sequence=1&is-Allowed=y
- [41] DNV. (2022). Hydrogen forecast to 2050. (s. 56-57). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>
- [42] International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 110). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [43] DNV. (2022). Hydrogen forecast to 2050. (s. 56-57). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>
- [44] DNV. (2022). Hydrogen forecast to 2050. (s. 57). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050/>
- [45] Motiva. (2024). Vety. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety
- [46] Ocko, I. O., & Hamburg, S. P. (2022). Climate consequences of hydrogen emissions. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://acp.copernicus.org/articles/22/9349/2022/>
- [47] Laursen, R., Patel, H., Dowling, M., Sofiadi, D., Ji, C., Nelissen, D., Király, J., van der Veen, R., & Pang, E. (2023). Potential of hydrogen as fuel for shipping. (s. 2). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5062-potential-of-hydrogen-as-fuel-for-shipping.html>

Lähteet

- [48] European Clean Hydrogen Alliance. (2023). Learnbook: Hydrogen imports to the EU market. (s. 15). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.entsog.eu/sites/default/files/2023-12/European%20Clean%20Hydrogen%20Alliance%20TD%20RT_Learnbook%20Hydrogen%20Imports%20to%20EU%20market_20231219.pdf
- [49] Hyundai. (2020). Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use.html>
- [50] Popular science. (2023). The world's first hydrogen-powered train has made its final stop. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.popsoci.com/technology/hydrogen-train-germany/>
- [51] Baird Maritime. (2023). VESSEL REVIEW | Sea Change – Hydrogen-fuelled demonstrator ferry for San Francisco Bay Area. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.bairdmaritime.com/passenger/ferry/vessel-review-sea-change-hydrogen-fuelled-demonstrator-ferry-for-san-francisco-bay-area/>
- [52] Holtze, B. (2023). World's first liquid-powered hydrogen ship, MF Hydra, is powered by Ballard's fuel cells. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://blog.ballard.com/marine/worlds-first-liquid-powered-hydrogen-ship-mf-hydra-is-powered-by-ballards-fuel-cells>
- [53] Baird Maritime. (2023). VESSEL REFIT | H2 Barge 1 – Dutch operator adds hydrogen-powered boxship to inland fleet. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.bairdmaritime.com/shipping/boxships/vessel-refit-h2-barge-1-dutch-operator-adds-hydrogen-powered-boxship-to-inland-fleet/>
- [54] Helander, B. (2021). Merten mirai – maailman ensimmäinen vetykäyttöinen matkustaja-autolautta tähtää liikenteeseen 2027. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://moottori.fi/uutinen/merten-mirai-maailman-ensimmainen-vetykayttoinen-matkustaja-autolautta-tahtaa-liikenteeseen-2027/>
- [55] MAN Truck & Bus. (2023). MAN Engines presents groundbreaking hydrogen combustion engine for off-road applications. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-engines-presents-groundbreaking-hydrogen-combustion-engine-for-off-road-applications/>
- [56] Habibic, A. (2024). MAN ES and Mitsui E&S perform world's first hydrogen combustion test on marine 2-stroke engine. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.offshore-energy.biz/man-es-and-mitsui-es-perform-worlds-first-hydrogen-combustion-test-on-marine-2-stroke-engine/>
- [57] Krol, A. (2023). Why do we blame climate change on carbon dioxide, when water vapor is a much more common greenhouse gas? Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://climate.mit.edu/ask-mit/why-do-we-blame-climate-change-carbon-dioxide-when-water-vapor-much-more-common-greenhouse>

Lähteet

- [58] Bertagni, M. B., Pacala, S. W., Paulot, F., & Porporato, A. (2022). Risk of the hydrogen economy for atmospheric methane. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-35419-7>
- [59] Nebergall, J. (2022). Hydrogen internal combustion engines and hydrogen fuel cells. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.cummins.com/news/2022/01/27/hydrogen-internal-combustion-engines-and-hydrogen-fuel-cells>
- [60] Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2023). Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels. (s. 16). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://cms.zerocar-bonshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper_v4.pdf
- [61] Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2023). Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels. (s. 16). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://cms.zerocar-bonshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper_v4.pdf
- [62] Tae, C. (2021). Hydrogen Safety: Let's Clear the Air. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.nrdc.org/bio/christian-tae/hydrogen-safety-lets-clear-air>

Kaavioiden, kuvioiden ja taulukoiden lähteet

- s.2** Kuvio 1:
DNV. (2023). Energy transition outlook 2023: Maritime forecast to 2050. (s. 24). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/download-the-report/>
- s.3-4** Kuvio 2:
Ringsgwandi, L. M., Schaffert, J., Brücken, N., Albus, R., & Görner, K. (2022). Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany. (s. 3). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/358926929_Current_Legislative_Framework_for_Green_Hydrogen_Production_by_Electrolysis_Plants_in_Germany
- s.6** Taulukko:
Solakivi, T., Paimander, A., & Ojala, L. (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. (s. 2). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/173681/1-s2.0-S1361920922003261-main.pdf?sequence=1>
- Bertagna, S., Kouznetsov, I., Braidotti, L., Marino, A., & Bucci, V. (2023). A Rational Approach to the Ecological Transition in the Cruise Market: Technologies and Design Compromises for the Fuel Switch. (s. 4). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/366818830_A_Rational_Approach_to_the_Ecological_Transition_in_the_Cruise_Market_Technologies_and_Design_Compromises_for_the_Fuel_Switch
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621008714?via%3Dihub>
- Ampah, J. D., Yusuf, A. A., Afrane, S., Jin, C., & Liu, H. (2021). Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621030675?via%3Dihub>
- The Engineering ToolBox. (n.d.). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- European Commission. (2021). Regulation of the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. (Annex II). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52021PC0562>

Kaavioiden, kuvioiden ja taulukoiden lähteet

- s.6** Taulukko:
Hürpekli, M., & Özsezen, A. N. (2023). Determination of combustion and emission characteristics of liquid Fischer-Tropsch diesel fuel synthesized from coal in a diesel engine. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006970>
- Nair, A. (2016). Alternative Fuels for Shipping: Potential for reductions in CO2 emissions, Financial viability for ship owners and, Optimised fleet mix design for policymakers. (s. 26). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://thesis.eur.nl/pub/41180/A.-Nair-Thesis-Final-441409-A.Nair.pdf&ved=2ahUKEwigvu_mga6HAXWBFBAIHcUxDfcQFnoECBYQAQ&usq=AOvVaw-2gONDv_4o4A7a8ZhjFtsD-

Kuvien lähteet

- s.1** Adobe Stock: Federico Aliaksandr Siamko. (n.d.). Haettu 30.08.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/container-cargo-ship-in-the-ocean-at-sunset-blue-sky-back-ground-with-copy-space-nautical-vessel-and-sea-freight-shipping-international-global-business-logistics-transportation-import-export-concept/756026306>
- s.2** Adobe Stock: Yellow Boat. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/aerial-top-view-of-cargo-ship-carrying-container-and-running-for-export-goods-from-cargo-yard-port-to-custom-ocean-concept-technology-transportation-customs-clearance/483855922>
- s.3** Adobe Stock: PNG Lover. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/oil-refinery-plant-isolated-on-transparent-background/763105869?asset_id=763105869
- s.4** Adobe Stock: PNG Lover. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/oil-refinery-plant-isolated-on-transparent-background/763105869?asset_id=763105869
- s.5** Adobe Stock: PNG Lover. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/oil-refinery-plant-isolated-on-transparent-background/763105869?asset_id=763105869
- Adobe Stock: malp. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/a-hydrogen-pipeline-to-houses-illustrating-the-transformation-of-the-energy-sector-towards-clean-carbon-neutral-safe-and-independent-energy-sources-to-replace-natural-gas-in-homes/498531471>
- s.6** Adobe Stock: bsd studio. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/preventing-workplace-injury-concept-icons-set-occupational-health-and-safety-idea-thin-line-color-illustrations-isolated-symbols-editable-stroke-roboto-medium-myriad-pro-bold-fonts-used/551487228?asset_id=551487228
- s.7** Adobe Stock: Icon-Duck. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/lean-manufacturing-banner-vector-illustration-with-the-icons-of-six-sigma-management-quality-standard-industry-continuous-improvements-reduce-waste-improve-productivity-efficiency-keizen/672171945?asset_id=672171945
- s.8-9** Adobe Stock: Gondex. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/continuous-line-drawing-of-machine-gears-the-concept-of-gears-on-a-single-line-style-machine-machine-gear-technology-concept-in-single-line-doodle-style/566081642?asset_id=566081642
- s.9** Adobe Stock: Gondex. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/continuous-line-drawing-of-machine-gears-the-concept-of-gears-on-a-single-line-style-machine-machine-gear-technology-concept-in-single-line-doodle-style/566081642?asset_id=566081642
- s.10** Adobe Stock: The Deep Designer. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/638437077?asset_id=638437077

Kuvien lähteet

s.2-21 Adobe Stock: Steves Artworks. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/blue-watercolor-sea-wave-texture-design-on-transparent-background/773410060?asset_id=773410060

