

Vihreän vedyn mahdollisuudet ja haasteet Suomessa:

Teknologiat, investoinnit ja tulevaisuuden näkymät

Petri Lakka

Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu

Energiatekniikan osasto

2025

Asiantuntijaselvitys

TIIVISTELMÄ

Tämä selvitys tarkastelee vihreän vedyn tuotantoa, vetytalouden nykytilaa sekä tulevaisuuden kehityskulkuja Suomessa. Työssä esitellään tavallisimmat elektrolyysiprosessit , kansalliset vetyhankkeet, Power-to-X-teknologiat kuten e-metaanin, e-metanolin ja e-ammoniakin tuotantotavat sekä käyttöpotentiaalin.

Vetytalouden keskeisiksi haasteiksi muodostuu korkeat kustannukset, vedyn varastointi ja kuljetus, elektrolyysilaitteistojen energiatarve, vetyinfran puute sekä rahoitus-ja hyväksyttävyyssymykset. Selvityksessä nostetaan esiin myös sähköverkon siirtokapasiteetin rajat, jotka hidastavat erityisesti suurten vetyhankkeiden toteutumista. Selvityksessä tulee ilmi, että Power-to-X-tuotteet voivat tarjota ratkaisuja vihreän vedyn käyttöönottoon. Näistä e-ammoniakki nousee taloudellisesti ja logistisesti lupaavimmaksi vedyn kantajaksi. E-ammoniakin infra on pitkälti valmiina ja varastointi on edullista ja tehokasta.

Vihreän vedyn rooli tulevaisuuden energiajärjestelmässä on merkittävä erityisesti teollisuudessa, meriliikenteessä ja energian varastoinnissa. Selvitys vahvistaa, että Suomen olosuhteet, kuten puhdas vesi, kasvava tuulivoima sekä laaja tutkimusjulkinen sektori, antavat hyvät edellytykset vihreän vedyn laajamittaiseen käyttöön. Näiden tekijöiden ansiosta Suomella on potentiaalia nousta vetytalouden avainalueeksi Euroopassa.

Sisällysluettelo

1. Johdanto	1
2. Vihreä vety	2
3. Vedyn valmistus	3
3.1 Metaanin reformointi	3
3.2 Elektrolyysi	3
4. Vetytutkimus ja tuotantolaitokset	5
4.1 Vetytutkimus	6
4.2 Toiminnassa olevat laitokset	8
4.3 Suunnitteilla olevat laitokset	8
5. POWER-TO-X	10
5.1 E-metaani	10
5.2 E- metanoli	12
5.3 Vihreä ammoniakki	13
6. VETYTALOUS	14
6.1 Uusiutuvan energian saatavuus ja sähköverkon merkitys	15
6.2 Vetytalouden yhteiskunnalliset näkökulmat	16
6.3 Vetytalouden rahoitus ja taloudelliset haasteet	16
6.4 Elektrolyysimenetelmien kustannukset	16
6.5 Vedyn varastointi ja kuljetus	17
7. Vedynkäytön tulevaisuus	18
7.1 Vetytalouden näkymät Suomessa	18
7.2 Vetyhankkeiden haasteet	19
7.3 Synteettiset polttoaineet ja Power-to-X-teknologiat	20
7.4 Vihreä teräs ja teollisuus	21
7.6 Vetypolttokennot ja liikenne	22
7.6 Vedyn varastoinnin haasteet	23
7.7 Uusia vedyn varastointiratkaisuja	24
7.8 Yhteenveto vedyn varastointiin ja käyttöön liittyvistä haasteista	26
8. Yhteenveto	27
Lähteet	28

1. Johdanto

Tässä selvityksessä tarkastelen vihreään vetyyn liittyviä tutkimuksia ja hankkeita Suomessa sekä otan kantaa vedyn käyttöpotentiaaliin tulevaisuudessa. Selvityksen tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva vihreään vetyyn liittyvistä haasteista ja ratkaisumahdollisuuksista.

Keskityn erityisesti seuraaviin aiheisiin

1) Vetytalouteen liittyvien investointien nykytilanne Suomessa.

- Toiminnassa ja suunnitteilla olevat vihreään vetyyn liittyvät tuotantolaitokset
- Power-to-X-teknologiat ja synteettiset tuotteet (e-metaani, e-metanoli, e-ammoniakki)

2) Vetytalouden keskeinen tarkastelu seuraavista näkökulmista:

- Talous
- Vedyn energiantarve ja hukkavirrat
- Vedyn varastointi ja siirtoverkot

Aluksi määrittelen vihreän vedyn käsitteen ja esittelen keskeiset valmistusmenetelmät, erityisesti elektrolyysin.

Seuraavaksi tarkastelen nykypäivän vetytutkimukseen liittyviä hankkeita sekä esittelen valmiita ja suunnitteilla olevia vetytuotantolaitoksia.

Tämän jälkeen esittelen vetytalouteen keskeisesti kuuluvan osa-alueen: Power-to-X-prosessit, joissa vihreää vetyä jalostetaan polttoaineeksi sekä kemikaaleiksi.

Viimeisessä kappaleessa arvioidaan vetytalouden tulevaisuuden näkymiä. Vetytaloudella on monia haasteita etenkin talouden, investointien ja rahoituksen suhteen. Vedyn varastointiin ja siirtoon on jatkossa kehitettävä uusia ratkaisuja ja tekniikoita.

Selvityksen lähtökohtana ovat seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Mitä haasteita vihreän vedyn valmistukseen ja käyttöön liittyy tulevaisuudessa?
2. Miten vihreä vety näkyy tulevaisuuden energijärjestelmässä?
3. Tarjoavatko Power-to-X-tuotteet, etenkin e-ammoniakki, ratkaisun vihreän vedyn käyttöönottoon.

2. Vihreä vety

Vihreä vety tarkoittaa vetyä, joka on tuotettu käyttäen uusiutuvaa energiaa sekä valmistettu elektrolyysillä. Tuulivoimaa korostetaan usein vihreän vedyn tuotannon yhteydessä, koska se on nopeasti kasvava ja kustannustehokas uusiutuvan energian tuotantomuoto. Muita vihreän vedyn tuottamiseen soveltuvia energiamuotoja ovat aurinkovoima, vesivoima, geoterminen energia sekä biomassalla tuotettu energia. Suomen sähköntuotannosta merkittävä osa perustuu vahvasti ydinvoimaan. Euroopan unionin ja kansainvälisten määritelmien mukaan ydinvoimalla tuotettua vetyä ei voi kuitenkaan luokitella vihreäksi vedyksi. Sitä pidetään kuitenkin vähäpäästöisenä menetelmänä vedyn tuotantoon [1] [2] [3] [4].

Keskityn selvityksessä pääasiassa tuulivoimaan uusiutuvan energian lähteenä.. Aurinkovoimalla tuotettu energia vaihtelee hyvin paljon vuodenaikojen mukaan. Vesivoima tasapainottaa tuotettua energiaa, mutta sen laajentamismahdollisuudet ovat kuitenkin rajatut. Suomessa biomassalla tarkoitetaan metsäteollisuuden haketta ja purua sekä maatalouden sivutuotteita. Biomassa on täydentävä energialähde aurinko- ja tuulivoiman rinnalla [5] [6] [7].

Vihreän vedyn tuottamiseen käytetään uusiutuvan energian lähteitä, kuten aurinko- ja tuulivoimaa. Näistä energian tuottamisen tavoista saatavalla sähköllä valmistetaan vihreää vetyä elektrolyysiprosessissa. *Harmaa vety* taas tuotetaan metaanista höyryreformoinnilla. Prosessissa syntyvä hiilidioksidi päästetään ilmakehään. *Sininen vety* valmistetaan samalla reformointimenetelmällä, mutta hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan [8].

Vihreää vetyä voidaan hyödyntää useissa eri sovelluksissa, kuten energiavarastona, liikenteen polttoaineena, teollisten prosessien raaka-aineena ja osana lämmitysjärjestelmiä.

Suomalaisessa teollisuudessa kehitys näkyy erityisesti teräksen tuotannossa. Esimerkiksi SSAB:n Raahen tehdas sekä siihen liittyvä HYBRIT-hanke ovat tutkivat ratkaisuja, joissa rautamalmin pelkistyksessä hiili korvataan uusiutuvalla energialla tuotetulla vedyllä. Pelkistysreaktion sivutuotteena muodostuu vettä, eikä prosessi tuota hiilidioksidipäästöjä. Tarve tämänkaltaisille teknologioille on suuri, sillä kansainvälisten arvioiden mukaan teräksen valmistus on yksi suurimmista teollisuuden päästölähteistä [9] [10].

3. Vedyn valmistus

Teollinen vedyn valmistus tapahtuu kahdella päämenetelmällä. Vihreää vetyä tuotetaan *veden elektrolyysillä*, jossa sähköenergiaa käytetään veden hajottamiseen vedyksi ja hapeksi. Vaikka elektrolyysi on tunnettu valmistusmenetelmä, vedyn tuottamiseen teollisesti sitä on laajemmin hyödynnetty vasta viime vuosina. Keskeisenä haasteena on vihreän vedyn korkeat tuotantokustannukset. Uusiutuviin energiamuotoihin ollaan viime vuosien aikana panostettu enemmän ja niihin liittyvä teknologia on kehittynyt. Tässä kappaleessa kuvaan elektrolyysiprosessia. Tavallisin vedyn valmistusmenetelmä on *höyryreformointi*, jonka esittelen seuraavaksi [11] [12].

3.1 Metaanin reformointi

Metaanin reformoinnissa eli höyryreformoinnissa metaani kuumennetaan vesihöyryn kanssa 700-1000°C lämpötilaan.

Metaani reagoi kuumen vesihöyryn kanssa reaktioyhtälön (1) mukaan



Reaktiossa muodostuu hiilimonoksidia eli häkää ja vetyä. Kyseisessä reaktiossa käytetään usein nikkelpohjaista katalyyttiä. Tämän jälkeen hiilimonoksidi reagoi vielä veden kanssa reaktion (2) tavalla, jolloin tuloksena on hiilidioksidia ja vetyä [12].

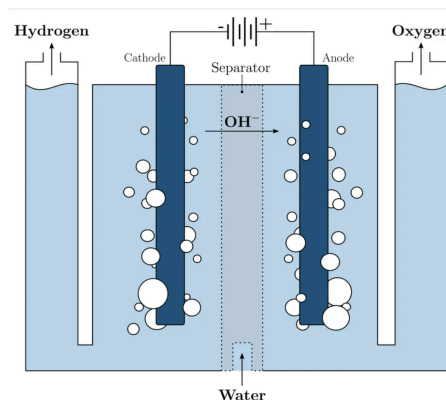


Talteenotettu hiilidioksidi voidaan varastoida tai siitä voidaan valmistaa uusia tuotteita.

Kun tavoitteena on lisätä hiilidioksidin talteenoton tehokkuutta, niin höyryreformoinnin yhteydessä voidaan käyttää metaanin osittaista hapetusta. Reaktion ollessa eksotermisen, ulkoista lämmitystä ei tarvita. Kyseiselle prosessille käytetään nimitystä ATR (autotermisen reformointi). ATR- menetelmää voidaan käyttää myös itsenäisenä prosessina [12].

3.2 Elektrolyysi

Elektrolyysissä sähkövirran avulla hajotetaan vesimolekyylit vety- ja happikaasuksi. Tämä tapahtuu elektrolyysikennossa, jossa veteen on lisätty elektrolyyttiä, yleensä suolaa tai happoa (kuva 1).



Kuva 1.Veden alkalielektrolyysi [13]

Veden *alkalielektrolyysi* on käytetyin ja tavallisin elektrolyysimenetelmä. Metallielektrodien eli katodin ja anodin materiaalina on usein rauta- ja nikkelpohjaiset materiaalit. Elektrolyytinä kennossa käytetään yleensä kaliumhydroksidin (KOH) vesiliuosta. Keskellä oleva huokoinen kalvo erottaa elektrodit toisistaan [13].

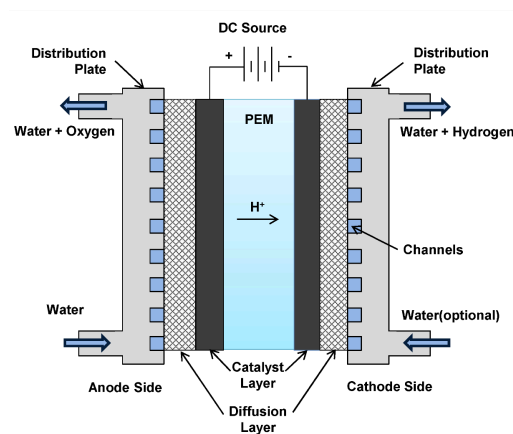
Puolireaktiot elektrodeilla ovat muotoa



Kaavan 3 mukaan vesi pelkistyy katodilla, jolloin muodostuu vetykaasua. Anodilla muodostuu happea hapettumisen seurauksena. Kemiallinen reaktio on jatkuva. Tyypillinen lämpötila reaktiossa on 60-80°C [6].

PEM-elektrolyysi eli polymeerielektrolyyttikalvo- elektrolyysi

Tässä uudemmassa elektrolyysimenetelmässä kennon keskellä on polymeerikalvo, johon on kiinnitetty protoneja. Elektrolyytin happamuus on korkea (kuva 2).



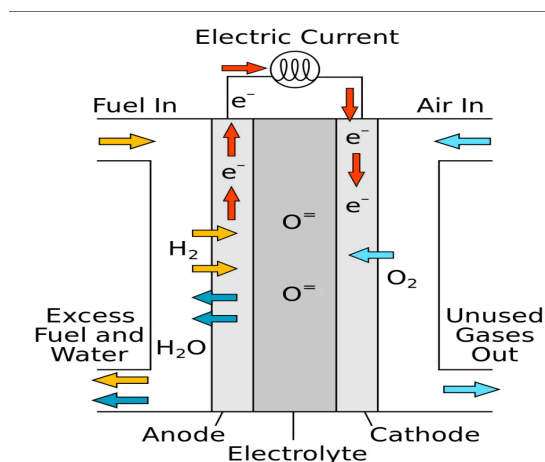
Kuva 2. PEM-elektrolyysilaitteisto [13]

Anodilla muodostuneet vetyionit kulkeutuvat kalvon läpi katodille ja yhdistyvät elektroneihin. Tällöin muodostuu happikaasua. Elektrodeina voidaan käyttää jalometalleja, kuten platinaa.

PEM-elektrolyysillä on monia etuja verrattuna alkalielektrolyysiin, kuten korkeampi hyötysuhde sekä kyky reagoida nopeasti uusiutuvan energian muutoksiin. Tosin alkalisen elektrolyysin investointikustannukset ovat edullisempia kuin PEM- elektrolyysissä ja teknologian käyttö on vakiintunutta [13].

Kiinteäoksidi-elektrolyysi

Kiinteäoksidi elektrolyysikennossa kuvassa 3 (SOEC) huokoisten elektrodien välissä on sähköä johtava elektrolyytti. Katodilla vesi yhdistyy elektronien kanssa muodostaen vetykaasua ja happi-ioneja. Happi-ionit menevät elektrolyyttikalvon läpi ja reagoivat anodilla muodostaen happikaasua. SOEC-kennot vaativat korkean käyttölämpötilan eli noin 650-850 celsiusta. SOEC-menetelmällä on korkeampi energian muunnostehokkuus kuin muilla menetelmällä. Tämä tarkoittaa myös kustannustehokkuutta. Mateariaalien valinnalla ja käytöllä voidaan vaikuttaa myös elektrolyysikennojen elinkaareen [13] [14].



Kuva 3. Kiinteäoksidi-elektrolyysin malli [13]

4. Vetytutkimus ja tuotantolaitokset

Suomessa ja maailmalla eletään tällä hetkellä energia-alan murrosta. Hiilineutraaliuden tavoittelu sekä ratkaisukeinojen löytäminen ilmastonmuutoksen torjuntaan on johtanut vihreään vetyyn liittyvän tutkimustyön nouseeseen sekä tuotantolaitosten perustamiseen. Tässä kappaleessa kerron Suomen vetytutkimuksen nykytilanteesta ja vetyyn liittyvistä hankkeista sekä listaan Suomessa toiminnassa tai suunnitteilla olevia vihreään vetyyn liittyviä laitoksia. Vetyhankkeet

sekä vetyyn liittyvät hankkeet on esitetty tiivistettynä taulukossa 1 ja toiminnassa olevat ja suunnitteluvaiheessa olevat vetylaitokset taulukossa 2.

4.1 Vetytutkimus

HYGCEL-hankkeessa tältä vuodelta (2025) on selvitetty vetyinfrastruktuurin rakentamista. Tutkimus tehtiin yhteistyöhankkeena LUT-yliopiston, Tampereen yliopiston ja Itä-Suomen yliopiston kesken. Tulokset vahvistivat käsitystä siitä, että Power-to-X-tuotteita kannattaa valmistaa laajasti eri puolilla Suomea, sillä tuotteiden siirtäminen on edullisempaa kuin sähkön, hiilidioksidin tai vedyn. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös satoja vetyonnettomuuksia, koska turvallisuus on keskeinen tekijä vetyyn liittyvissä hankkeissa. Koska suuri osa onnettomuuksista johtui inhimillisestä toiminnasta, niin koulutuksilla voidaan parantaa turvallisuutta [15].

Suomalainen Green North Energy -yhtiö on vihreän ammoniakin hankekehitysyritys. Yhtiö suunnittelee Naantalissa vedyntuotantoon myös vihreää ammokkaa. Naantalissa Tupavuorella on tällä hetkellä aloitettu hakkuut, jotka jatkuvat vuoden loppuun. Laitoksen elektrolyyseri on kooltaan 280 MW, ja investoinniltaan 600 miljoonaa euroa. Lisäksi laitoksen tuotannon hukkalämpöä voidaan hyödyntää Turun kaukolämpöverkossa. Tällä hetkellä ammoniakkia tuodaan Suomeen ulkomailta. Lannoiteteollisuus kaipaa huoltovarmuutta omasta ammoniakin tuotannosta.

Vihreän vedyn ja ammoniakin valmistuksen pilottilaitoksen on määrä valmistua Naantaliin vuonna 2027. Yhtiö suunnittelee myös laitoksista Porin ja Kemin kaupunkien kanssa. Vihreän ammoniakin kotimaisella tuotannolla ei pelkästään paranneta huoltovarmuutta, vaan myös vähennetään erityisesti meriliikenteen hiilidioksidipäästöjä. Porin ja Kemin vety- ja ammoniakkilaitokset ovat osa BalticSea H2-projektia. Ammoniakkia viedään myös Suomesta ulkomaille, sen kovan kysynnän vuoksi. Vihreän siirtymän hankkeita mahdollistaa myös Porin ja Kemiin suunnitellut merituulihankkeet [16].

Arktisten alueiden vihreät energiamuodot eli AAVE-hanke on Lapin ammattikorkeakoulun vetämä hanke. Hankkeessa otetaan selvää vedyn sekä muiden vihreiden energiamuotojen tuotannosta ja varastoinnista energian hyödyntämiseen. Hanke on aloitettu tammikuussa 2025 ja jatkuu vuoden 2027 loppuun. Hankkeen kokonaisbudjetti on 429 453 e, ja saa EU-rahoitusta 343 560 e.

Hankkeessa selvitetään vedyn ja vihreiden polttoaineiden varastointiratkaisujen tilaa tällä hetkellä sekä tulevaisuuden teknologioita ja haasteita Lapissa.

Hankkeen toimenpiteenä toteutaan demonstraatioympäristö vetyteknologialle. Hankkeen tavoitteena on, että Lapin alueelle muodostuu vihreän energian arvoketju. Samalla lappilaiset PK-yritykset saavat tietämystä ja osaamista vedystä [17].

Aikaisemmin keväällä Business Finland myönsi P2X solutionsin Joensuu uusiutuvan vedyn ja metanolin tuotantolaitokselle 60 miljoonan euron investointituen. Aikaisemmin vuonna 2022 Euroopan komissio myönsi Joensuun hankkeelle niin sanotun IPCEI-statusen (tärkeä hanke). Laitoksen asiakaskunta on pääasiassa meri- ja lentoliikennesektoreilta. Laitos hyödyntää synteettisen metanolin tuotannossaan Savon Voima energiatuotannosta saatavaa biogeenistä hiilidioksidia [18].

BalticSea H2- hankkeessa on tarkoitus muodostaa vetyinfra Itämeren ympärille. Kyseessä on suuren kokoluokan hanke, jossa on Aalto-yliopiston ja yritysten lisäksi 40 kumppania yhdeksästä Itämeren alueen maasta. BalticSea H2- projekti on alkanut kesäkuussa 2023 ja kestää viisi vuotta, kokonaisbudjetti 33 miljoonaa euroa. Hankkeessa on useita kymmeniä yrityksiä Itämeren ympärillä olevista valtioista. Esimerkiksi ABB kehittää ja kokeilee projektikumppaneiden kanssa MW-luokan polttoteknisiä ratkaisuja päästöttömään meriliikenteeseen [19].

JustH2transit- hanke on vetysiiirtymään liittyvä hanke. Tarkoituksena on selvittää vetyyn siirtymisen tilanne Suomessa ja siihen liittyvät pullonkaulat. Tarkoituksena on keskittyä myös ympäristöön sekä sosiaalisiin vaikutuksiin vihreässä siirtymässä. Tavoitteena on tukea uusia teknologioita ja lisätä yleisön tietoisuutta vetysiiirtymästä. Projekti on vuodet 2023-2028 loppuun asti, rahoittajat Sitra ja Suomen akatemia. Hankkeen koordinaattorina on Oulun yliopisto. Kumppaneina ovat VTT, LUT-yliopisto ja BotH2nia- vetyverkosto [20].

Pohjois-Savon Energian *Masterplan*- hankkeessa keskeisiä teemoja ovat vihreän vetyyn liittyvät asiat ja vedyntuotantoon liittyvät asiat. Lisäksi selvitetään energiatuotannon rajoittavia tekijöitä. Hankkeen toteuttajana on Navitas ja aikaikkuna on 1.5.2024- 7.6.2026. Hankkeen budjetti on 579 463 e, ja se on osittain Euroopan Unionin rahoittama. Tarkoituksena on tuottaa materiaalin, joka on alueen toimijoiden käytettävissä uusien investointien kehittämiseksi [21].

Taulukko 1. Suomessa käynnissä olevat vetyhankkeet

Hanke	sijainti/toimijat	Aikataulu	kuvaus	Tavoite	Rahoitus
HYGCEL	LUT-yliopisto, Tampereen yliopisto, Itä-Suomen yliopisto	12/2021- 12/2023	Selvitys sähkö- ja vetyinfran rakentamisesta	Vihreän siirtymän sähköistäminen, ohjeet infran suunnitteluun	Business Finland 279 400 e
Naantalin vetylaitos ja vihreä ammoniakki	Green North Energy, Naantali (Tupavuori)	valmistuu 2027-2028	280 MW elektrolyyseri Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmössä	Kotimainen ammoniakin tuotanto, huoltovarmuus, meriliikenteen päästövähennykset	600 miljoonan euron investointi, Business Finland 279 400 euroa
BalticSeaH2	9 Itämeren maata, yli 40 toimijaa	2023-2028	Vihreään siirtymään liittyvä hanke, vetyinfran suunnittelu Itämeren alueelle	Alueellisen vetyverkoston luominen, uusien vetyteknologioiden tukeminen	Sitra, Suomen akatemia, kokonaisbudjetti 33 M euroa
Masterplan	Navitas, Pohjois-Savo	05/2024- 06/2026	Vihreän vedyn ja energiantuotanno n rajoitteiden selvitys	Alueellinen energiasuunnitelma, investointien tukeminen	Budjetti 579 463 e, EU osarahoitus
HYBRIT	SSAB, Vattenfall, LKAB (kaivosyhtiö)	2016-	Vihreän vedyn varastointi* sekä fossiilivapaan teräksen kehitys	fossiilivapaan teräksen tuottaminen vuoteen 2045 mennessä	SSAB, Vattenfall, LKAB, Ruotsin energiavirasto

*Osa HYBRIT- hanketta [22].

4.2 Toiminnassa olevat laitokset

Suomen ensimmäinen vihreän vedyn tuotantolaitos on suomalaisen *P2X Solutionsin* vihreän vedyn tuotantolaitos *Harjavallassa*. Laitoksen kapasiteetti toimii noin 20 MW elektrolyysillä. Laitos on aloittanut toimintansa keväällä 2025 [23].

Kokkolassa Hycamite on aloittanut kaupallisen vedyntuotantolaitoksen rakennustyöt. Yrityksen käytössä oleva metaanin jakotekniikka mahdollistaa vähähiilisen vedyn tuotannon [24].

4.3 Suunnitteilla olevat laitokset

P2X Solutions suunnittelee sekä Joensuuhun että Ouluun vihreän vedyn vedyn tuotantolaitoksia. Oulun Laanilan alueelle sama yritys suunnittelee 100 MW elektrolyysilaitosta. Tuotantolaitoksen yhteydessä olisi myös hiilidioksidin talteenotto, vedyn ja hiilidioksidin varastointi sekä jatkojalostuslaitos (lopputuotteena esimerkiksi metanoli) [25].

Energiequelle Oy suunnittelee vetytuotantolaitosta Oulun Green Hydrogen Parkille Pyyryväisen teollisuusalueelle [26].

Energia-yhtiö Helen aikoo rakentaa Helsingin Vuosaaren vihreän vedyn tuotantolaitoksen. 3H2-Helsinki Hydrogen Hub- pilottilaitoksen teho on 3 MW. Vedyn käyttökohde on erityisesti raskaan liikenteen tankkausasema. Tankkausasema avautuisi vuonna 2027 [27].

Yhdysvaltalaisen Plug Powerin suunnitelmissa on kolme vihreän vedyn tuotantolaitosta Suomessa. Laitosten sijainnit olisivat Kristiinankaupungissa, Porvoossa ja Kokkolassa [28].

Ren-Gas-yhtiöllä on Suomessa meneillään kuusi tuotantolaitosprojektia. Esimerkiksi Poriin Aittaluotoon ja Kirrinsantaan on vuonna 2028 suunnitteilla e-metaanin tuotantoa sekä 100 MW:n vedyntuotantolaitos [29].

Vetalyfa Oy:n suunnitteilla on useita vihreän vedyn ja jatkojalosteiden tuotantoon liittyvää hanketta. Esimerkiksi vihreän vedyn laitokset Kemijärvellä ja Vaalassa. Laitokset mahdollistaisivat myös vedyn jatkojalostuksen synteettisiksi polttoaineiksi [30].

Taulukko 2. Suomessa toiminnassa ja suunnitteilla olevat vihreän vedyn tuotantolaitokset

Laitos	Kapasiteetti	Aikataulu	Käyttötarkoitus
P2X Solutions, Harjavalta	20 MW elektrolyysi	Avattu 2025	Vihreä vety; valmisteilla e-metaanin tuotanto
P2X Solutions, Joensuu	30-40 MW elektrolyysi	Suunnitteilla 2029	Vihreä vety ja synteettiset polttoaineet
P2X Solutions Oulu (Laanila)	100 MW elektrolyysi + CCU	Valmistuu 2028 (arvio)	Vihreä vety, e-metanoli, CO ₂ -talous ja varastointi
Hycamite, Kokkola	2000 t/v vähähiilistä vetyä	toiminnassa 2024	teollisuuden vety, polttoaineet, CO ₂ -varastointi
Energiequelle, Oulu Green Hydrogen Park	noin 5 MW elektrolyysi (vaihe 1)	Valmis 2028	Vihreä vety, vetytankkausasema
Helen 3H2-Helsinki Hydrogen Hub	3 MW elektrolyysi	2030 mennessä	Vihreän vety, e-ammoniakki, vihreä teräs, raskas liikenne

Ren-Gas- useat laitokset	50-1000 MW elektrolyysi	2027-2030	Vihreä vety ja e-metaanin tuotanto
Plug Power- Kristiinankaupunki, Porvoo, Kokkola	250 MW (Porvoo)-1 GW	Suunnitteilla	Vihreä vety, e-ammoniakki, vihreä teräs
Vetyalfa- Kemijärvi ja Vaala, Utajärvi, Rovaniemi	50 MW- 1000 MW elektrolyysi	Suunnitteilla	Vihreä vety, e- polttoaineet

Suomessa on tällä hetkellä käynnissä laaja kirjo erilaisia vetyhankkeita, joiden toteutuminen vuosien 2027-2030 aikana määrittää Suomen vetytalouden kehityksen suuntaa. Markkinaolosuhteiden heikentyminen ja sääntelyyn liittyvät epävarmuudet vaikuttavat hankkeiden toteutumiseen. Esimerkiksi Neste Oyj:n suunnittelema 120 MW elektrolyysihanke Porvoon Kilpilahdessa peruttiin vuonna 2024 [31].

5. POWER-TO-X

Prosessissa uusiutuvaa sähköä muunnetaan muihin energiamuotoihin tai tuotteeksi. Esimerkiksi vedyksi, polttoaineeksi, lämmöksi tai kemikaaleiksi. Esimerkiksi:

1. Power- to - Hydrogen (sähköstä vetyyn)
2. Power -to- Liquid (sähköstä polttoaineisiin)

Yleisin power-to-x- tekniikka hyödyntää uusiutuvaa energiaa ja siitä saatavaa sähköä vedyn valmistamiseen elektrolyysillä. Vetyä voidaan jatkojalostaa talteen kerätyn hiilidioksidin kanssa edelleen hiilineutraaleiksi polttoaineiksi. Tällä tavalla voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta ja käyttöä [32] [33].

Fossiiliset polttoaineet koostuvat hiilivedyistä, joita käytetään energialähteenä. Synteettisiä hiilivetyjä voidaan valmistaa myös kemiallisella *Fischer-Tropsch-menetelmällä*, jossa vetyä ja hiilimonoksidia sisältävä synteetikaasu muunnetaan katalyytin avulla hiilivedyiksi. Näistä voidaan jatkojalostaa synteettisiä polttoaineita. Synteettisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöt voivat olla merkittävästi alhaisemmat kuin fossiilisilla polttoaineilla, mikäli niiden valmistuksessa käytetty hiilidioksidi on peräisin esimerkiksi teollisuuden savukaasuista [34].

5.1 E-metaani

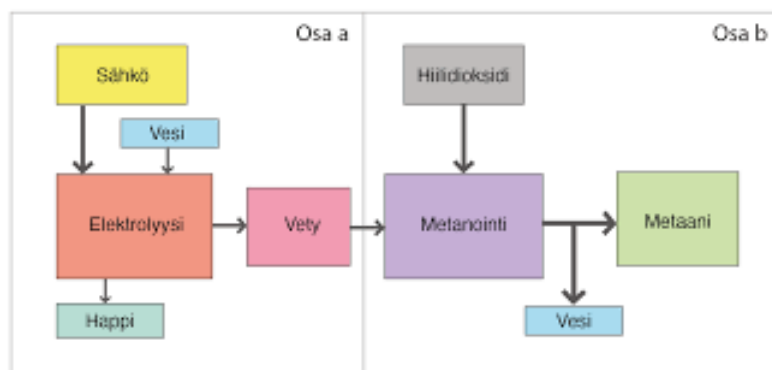
Synteettisen metaanin valmistuksessa yhdistetään uusiutuvalla sähköllä tuotettua vetyä ja hiilidioksidia. Vety on tuotettu elektrolyysillä ja hiilidioksidi on kerätty talteen esimerkiksi

savukaasuista. Synteettistä metaania voidaan valmistaa Sabatier- reaktiossa (metanaatio) nikkelpohjaisen katalyytin avulla



Kaavassa (4) kuvattu metanointi eli hiilidioksidin hydraus vedyllä toteutuu 25 - 400 °C riippuen reaktiotavoista. Tapoja on kaksi, kemiallinen ja biologinen. Kemiallinen prosessi toimii paremmin suuressa mittakaavassa. Sabatier-reaktio on eksoterminen, joten synteettisen metaanin valmistusreaktoreissa on otettava huomioon riittävät jäähdytyslaitteistot [35].

Kuvassa 3 nähdään synteettisen metaanin valmistusprosessi yksinkertaisen kaavion muodossa.



Kuva 3. Synteettisen metaanin prosessikaavio [36]

Tällä hetkellä Suomessa ollaan vielä alkutekijöissä e-metaanin tuotannossa. Keväällä 2025 toimintansa aloittanut Q Powerin Harjavallan metanointilaitos on ensimmäinen Suomessa. Tämän laitoksen toiminta perustuu biologiseen prosessiin. Kiintoainebioreaktori ei vaadi erityistä paineistusta ja koko prosessin lämpötila on vain 50-70 astetta. Näissä reaktoreissa 82 % vedyn energiasta muuntuu metaaniksi. Biologinen metanointi hyödyntää mikro-organismeja anaerobisissa olosuhteissa [37].

Koska synteettisen metaanin valmistukseen käytetään hiilidioksidia, niin metanaatioprosesseja on kätevää olla esimerkiksi voima- tai teollisuuslaitoksien yhteydessä. Synteettinen metaani on myös helpompaa nesteyttää kuin pelkkä vety sekä helpompi kuljettaa ja varastoida.

E-metaania voidaan käyttää kaikissa samoissa paikoissa kuten fossiilista maakaasua. Lisäksi sen siirrossa voidaan hyödyntää nykyistä maakaasuverkostoa. Sitä voidaan käyttää samoissa laitteissa kuin fossiilista maakaasua. Synteettisen metaanin valmistukseen ollaan viime aikoina panostettu voimakkaasti. Esimerkiksi Raumaan on suunnitteilla *Luoto Energia Oyn* hanke, jossa tavoitteena on tuottaa synteettistä maakaasua noin 125 000 t vuosittain. Elektrolyyseriteho vihreän vedyn tuotolle on 500 MW vuodessa [38] [39].

5.2 E- metanoli

Synteettistä metanolia saadaan, kun hiilimonoksidi tai hiilidioksidi reagoivat vihreän vedyn kanssa muodostaen metanolia. Valmistus on yleistymässä koko ajan. Prosessissa tarvittava hiilidioksidi voidaan kerätä talteen teollisuussavukaasuista. Saatua synteettistä metanolia on helppo varastoida. Synteettistä metanolia voidaan metaanin tapaan käyttää polttoaineena, erityisesti lentopolttoaineena. Sitä voidaan käyttää myös teollisuuskemikaalina muiden yhdisteiden valmistuksessa [40].

Vaikka metanolin jakeluun voidaan hyödyntää olemassaolevaa nestemäisten polttoaineiden jakelu- ja siirtoverkostoa, suurempi tuotanto vaatii lisää infrastruktuuria. Kansainvälisen energijärjestön (IEA) Future of hydrogen (2019) raportissa sanotaan, että vuoteen 2030 mennessä e-metanolin tuotanto voi nousta useaan miljoonaan tonniin vuodessa [41].

Synteettisen metanolin ympäristövaikutukset voivat olla huomattavia, koska sen tuotannossa hyödynnetään talteenotettua hiilidioksidia. Tämä vähentää fossiilisiin raaka-aineisiin perustuvia päästöjä. Prosessin kannattavuus paranee tilanteissa, joissa uusiutuvalla energialla tuotettu vety on edullista sekä elektrolyysissä syntyvä happi voidaan kerätä ja myydä edelleen [42] [43].

Myös muutoksia nykyiseen infrastruktuuriin täytyy tehdä. Metanoli on joillekin materiaaleille syövyttävää. Hiiliteräkselle metanoli aiheuttaa korkeajännitekorroosiota ja tietyt muovi-, kumimateriaalit eivät sovi metanolin kanssa. Metanoli tarvitsee yli kaksinkertaisesti enemmän tilaa varastointiin verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin. Turvallisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota metanolijärjestelmissä. Myrkyllinen metanoli on helposti haihtuvaa ja muodostaa kaasua, joka syttyy helposti. Metanolin käyttö laivapolttoaineena voi olla luontevaa, koska metanolia voidaan käyttää nestemäisten polttoaineiden säiliössä, kunhan tehdään tarvittavat muutokset [44].

Jos metanoli halutaan käyttää polttomootorilla varustettuihin ajoneuvoihin, niin moottoreihin on tehtävä muutoksia, muun muassa laitteisiin ja osiin. Metanolin kanssa kosketuksissa olevat osat on tehty usein korroosionkestävästä materiaalista kuten ruostumattomasta teräksestä [45].

Liikennekäytöstä metanolin lisäys bensiiniin voisi olla aluksi järkevää. Tämä mahdollistaisi siirtymän metanoli-bensiini-seos tai täysmetanolipolttoaineeseen. Jakeluvaihtoehtojen vuoksi metanolille avautuu koko ajan uusia markkinoita [40] [43] [44].

Metanolipolttokennoteknikka on edelleen kehittymässä, ja sen kaupallinen käyttö on vähäistä. Polttokennoissa metanoli hapettuu anodilla, ja reaktion kautta muodostuneet elektronit tuottavat sähköä ulkoisen piirin kautta. Metanolipolttokennoa voidaan käyttää pienitehoisissa sovelluksissa, kuten kannettavissa elektroniikkalaitteissa [46].

5.3 Vihreä ammoniakki

Synteettinen vihreä ammoniakki on uusiutuvalla energialla tuotettua. Prosessissa ei synny suoria hiilidioksidipäästöjä. Vaiheet ovat:

1. Tuotetaan vihreää vetyä elektrolyysillä.
2. Vihreä vety yhdistetään typen kanssa niin sanotulla Haber-Bosch-prosessilla. Prosessi tapahtuu reaktorissa.
Syntyy ammoniakkia reaktioyhtälön (5) mukaan.



Reaktiossa käytetään katalyyttiä sekä korkeaa painetta ja lämpötilaa.

Paine on yleensä 150-300 bar ja lämpö noin 623-773 K [47] [48].

Ammoniakkia käytetään laajasti lannoitteissa, kemianteollisuudessa sekä muovien raaka-aineena. Ammoniakkia voidaan käyttää myös laivojen polttoaineena. Vihreä ammoniakki voi korvata näissä sovelluksissa fossiilisesti tuotetun ammoniakin. Lisäksi ammoniakkia tutkitaan käytettäväksi mahdollisena energian varastointimuotona sekä polttoainevaihtoehtona meriliikenteessä, jossa etsitään ratkaisuja päästöjen vähentämiseen. Suomessa käynnistyi vuonna 2024 kolmevuotinen AINA-projekti, joka tutkii ammoniakin käyttöä ja sovelluksia. Myös turvallisuusnäkökohtiin kiinnitetään tutkimuksessa huomiota [49].

Taulukko 3. Vedyn vertailu e-metanoliin, e-metaaniin sekä e-ammoniakkiin

Ominaisuus	Vety	e-metaani	e-metanoli	e-ammoniakki
Olomuoto/varastointi	Kaasu, voidaan nesteyttää	Kaasu, helposti nesteytettävä	nestemäinen	nestemäinen
Varastoinnin haasteet	Vetyhaurastuminen, korkea paine, kallis kalusto	CO ₂ -syöte, reaktorien jäähdytys	syövyttävyys, materiaalivaatimukset	Myrkyllisyys, NO _x -päästöt
Energiatiheys (tilavuus)	Erittäin matala	Lähellä maakaasua	Matala	Korkea verrattuna vetyyn
Kuljetus	Haastavaa pitkille matkoille	Voidaan hyödyntää kaasuverkkoa	Helppo nestemäisenä	Helppo nestemäisenä
Infra	Tarvitsee täysin uudet järjestelmät	Voidaan hyödyntää maakaasuinfraa	nestepolttoaineinfra	Kehittynyt ammoniakkiverkko

Käyttökohteet	Polttokennot, teollisuus, raskas liikenne	Sähköntuotanto, teollisuus, liikenne	meriliikenne, lentopolttoaineet	Lannoitteet, energiavarasto, meriliikenne
Turvallisuus	Erittäin syttyvä	Maakaasun kaltaiset riskit	myrkyllinen, haihtuu helposti	Myrkyllinen, vaatii erityisvalvontaa
Ilmastoedut	ei päästöjä	kierrättää päästöt	pienemmät kuin fossiilisilla	ei päästöjä
Kustannustaso	Kallein	Keskitaso	Keskitaso	Edullisin pitkäaikaiseen varastointiin

Taulukosta 3 nähdään, että PtX-tuotteet tuovat ratkaisuja vihreän vedyn käyttöönottoon. Haasteita tuovat vedyn matala energiatiheys, varastointi ja kuljetus sekä korkeat kustannukset. Tämä hankaloittaa vetyinfran laajamittaista käyttöä.

Vihreä ammoniakki erottuu vaihtoehdoista erityisesti varastoinnin ja kuljetuksen näkökulmasta, sillä ammoniakkia voidaan tuottaa suuria määriä, ja sen käsittelylle on jo olemassa infrastruktuuri. Myös synteettinen metaani ja e-metanoli hyödyntävät nykyisiä maakaasun sekä nestemäisten polttoaineiden jakeluverkostoja, mikä vähentää investointitarpeita. PtX-tuotteet tarjoavat käytännöllisen reitin vihreän vetytalouden skaalautumiseen, sillä niiden avulla energiaa voidaan varastoida ja kuljettaa tehokkaammin kuin vetyä.

6. VETYTALOUS

Vetytaloudesta puhutaan tarkoittaen vetyä keskeisenä energian kantajana.

Vetytalouteen voidaan liittää seuraavat keskeiset osa-alueet [50]:

- **Vedyn tuotanto:** Tuotantomenetelmät kuten elektrolyysi uusiutuvalla energialla.
- **Vedyn varastointi ja kuljetus:** Paineistettuna, nesteytettynä tai kemiallisesti sidottuna. Putkisto-, laiva-, säiliökuljetukset.
- **Vedyn käyttö:** teollisuuden ja liikenteen sovellukset, energiantuotanto, lämmitys.
- **Synteettiset tuotteet:** Synteettiset e-polttoaineet.
- **Energiajärjestelmä:** Vetytalouden integrointi yhteiskuntaan, vedyn käyttö energian tasapainottamiseen.
- **Ympäristöasiat:** Vedyn tuotannon ja käytön ympäristö-, ja ilmastovaikutukset.
- **EU-sääntely:** Vetytalouteen liittyvät EU- säännökset.
- **Markkinat:** Kansalliset ja kansainväliset markkinat. Investoinnit ja hankkeet.

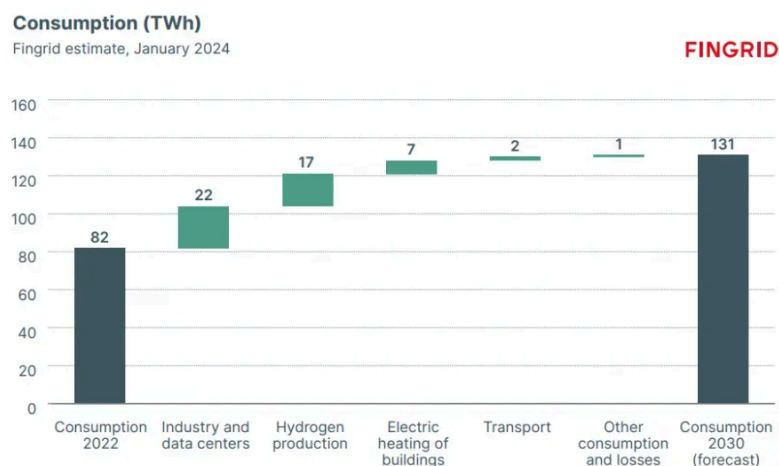
6.1 Uusiutuvan energian saatavuus ja sähköverkon merkitys

Talouden näkökulmasta on tärkeää arvioida uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, saatavuutta ja käyttöönottoa. Koska vihreän vedyn tuotanto vaatii suuria määriä sähköenergiaa elektrolyysiprosessiin, sähköverkon vahvistaminen on tärkeää ja välttämätöntä. Tarvitaan myös riittävät sähkönsiirtoyhteydet elektrolyysilaitoksille. Vihreän vedyn tuotannon kustannustehokkuus paranee, jos uusiutuvan energian tuotanto sijaitsee elektrolyysilaitosten läheisyydessä. Tämän vuoksi investointien ja hankkeiden sijainnilla on suuri merkitys [50].

Suomen vahvuutena on sähkömarkkinoiden nopeasti etenevä dekarbonisaatio. Suomessa on jo tällä hetkellä vähähiilistä teräksentuotantoa. Lisäinvestoinnit tuulivoimaan luovat edellytyksiä vihreän vedyn hankkeille. Olennaista vihreän vedyn hankkeille ja vihreälle siirtymälle on yleinen hyväksyttävyys. Vetyhankkeiden on oltava hyväksyttyjä jokaisessa vihreän vedyn arvoketjun osassa, uusiutuvan energian tuotannosta siirto- ja varastointiratkaisuihin. Lisäksi vetyhankkeiden eteneminen edellyttää paikallista hyväksyntää sekä eri sidosryhmien yhteistyötä [51].

On jo todettu, että uusiutuvan energian tuotanto Suomessa kasvaa erityisesti tuulivoiman osalta, mikä parantaa edellyksiä vihreän vedyn laajamittaiselle tuotannolle ja sitä kautta vedyn hyödyntämiselle. Sähkön saatavuuden ennakoidaan vahvistuvan koko ajan investointien myötä, mikä voi vähentää riskiä siitä, että vihreän vedyn tuotanto kilpailee sähköstä muun kulutuksen kanssa [52].

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin arvioiden mukaan Suomen sähköntuotanto on kasvussa erityisesti tuulivoiman laajentumisen osalta. Kuvassa 4 nähdään Fingridin ennuste sähköntuotannon kehityksestä vuoteen 2030 asti. Fingridin mukaan suurimmat kulutuksen lisäykset tulevat teollisuudesta ja vetytalouden tarpeesta [53].



Kuva 4. Fingridin ennuste sähkönkulutuksen kehityksestä vuoteen 2030 [53]

6.2 Vetytalouden yhteiskunnalliset näkökulmat

Vetyhankkeita jarruttavat tällä hetkellä monet huolenaiheet, kuten esimerkiksi tuulivoiman laajamittainen rakentaminen. Paikallistasolla koetaan usein, ettei asukkailla ole vaikutusvaltaa hankkeisiin, jotka muokkaavat heidän elinympäristöään. Lisäksi huoli kiinteistöjen arvon heikkenemisestä vaikuttaa hyväksyttävyyteen. Kansallisella tasolla epävarmuutta herättää kysymys vetytalouden hyötyjen jakautumisesta oikeudenmukaisesti. Usein koetaan, että kansainvälisten yhtiöiden hallitsemat vetyhankkeet ja niistä saatavat tuotot eivät jää kotimaahan. Hankkeiden avoimuus ja vetytietoisuuden kehittäminen voivat vähentää epäluuloa. Hyväksyttävyyttä lisää usein tieto uusista työpaikoista ja muista investoinneista alueelle [54].

6.3 Vetytalouden rahoitus ja taloudelliset haasteet

Monien vetyhankkeiden etenemistä hidastavat erityisesti rahoitukseen liittyvät haasteet. Vihreän vedyn tuotanto on edelleen kalliimpaa kuin fossiilisista raaka-aineista valmistettu vety. tukipäätöksien, säädöksien tai muiden investointeihin vaikuttavien tekijöiden viivästyminen heijastuu suoraan rahoitukseen ja sitä kautta laitoksen rakentamisen aikatauluihin. Osalle vetyinvestoinneista kuuluu myös positiivista. EU:n uusiutuvan energian direktiivit sekä meri- ja lentoliikenneasetukset edellyttävät uusiutuvan polttoaineen käytön kasvua. ReFuelEU Aviation asetuksen mukaan uusiutuvien polttoaineiden käytön on noustava asteittain, ja teollisuuden vedyn käytöstä tulee olla 42 % RFNBO-luokiteltua vuoteen 2030 mennessä [55] [56].

Suomen hallituksen vuoden 2023 periaatepäätöksen mukaan Suomella on edellytykset tuottaa vuoteen 2030 mennessä 10 % EU-alueella tarvittavasta päästöttömästä vedystä. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää investointeja uusiutuvan energian tuotannosta elektrolyysilaitteisiin. Osa elektrolyysiteknologioista hyödyntää harvinaisia ja kalliita jalometalleja, kuten platinaa, mikä nostaa investointikustannuksia ja lisää tarvetta vaihtoehtoisten materiaalien ja katalyyttien tutkimukselle. Suomen sähköntuotanto on vahvistunut viime vuosien tuulivoimarakentamisen myötä, mikä parantaa edellytyksiä laajamittaiselle vihreän vedyn tuotannolle [57] [58] [59].

6.4 Elektrolyysimenetelmien kustannukset

Kun vihreää vetyä tuotetaan elektrolyysereillä, tarvitaan huomattavia määriä sähköenergiaa. Nykyisten elektrolyysiteknologioiden tyypillinen hyötysuhde on 60-70 % ja prosessissa syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa. Tällöin kokonaisenergiatehokkuus voi nousta jopa 80 prosenttiin [60].

Elektrolyysilaitteiston investointikustannukset ovat korkeat, minkä vuoksi elektrolyysilaitteiston kannattava käyttö edellyttää korkeaa käyttöastetta. Uusiutuvan sähköntuotannon sääriippuvuus vaikuttaa suoraan elektrolyysin käyttöasteeseen. Vedyntuotannon taloudellisuuteen vaikuttaa myös elektrolyysereiden käyttöikä sekä huollon tarve. Huoltokustannusten tarkastelu vihreän

vedyn eri valmistustavoille on tärkeää miettiessä taloudellista kannattavuutta. Alkalielektrolyysilaitteiston huoltokustannukset ovat syövyttävän elektrolyysin vuoksi korkeammat kuin PEM-elektrolyysissä, jossa kiinteä polymeerikalvo ei vaadi huoltoa samalla tavalla. Elektrolyysierit kuluttavat merkittävästi sähköenergiaa tuottaessaan vetyä, ja tyypillisesti PEM-elektrolyysierien sähkönkulutus on hieman suurempi kuin alkalielektrolyysierien. Elektrolyysierien tehokkuus heikkenee käyttöiän lisääntyessä. Tosin huoltotoimenpiteiden säännöllisyys on tärkeää, jotta käyttöiän heikkenemistä voidaan vähentää [59] [61].

Elektrolyysierissä tapahtuu myös materiaalien kemiallista rapautumista, jota aiheuttavat korkeat virrat ja jännitteet. Alkalielektrolyysierien tyypinen käyttöikä on 80 000 h ja PEM-elektrolyysierien keskimääräinen käyttöikä on 60 000 h. Alkalielektrolyysierien tuntimäärä vastaa noin 13 vuotta, PEM-teknologialle noin 10 vuotta. Käyttöiän pidentäminen on tärkeää, sillä se vaikuttaa merkittävästi vetylaitoksen elinkaarikustannuksiin. Uusien katalyyttien kehittäminen mahdollistaa tehokkaan vedyn tuotannon [61].

6.5 Vedyn varastointi ja kuljetus

Vedyn turvallinen varastointi ja kuljetus muodostavat vetytalouden perusrakenteen. Vedyn varastointi ja siirto edellyttävät merkittäviä investointeja putkistoihin, säiliöihin ja turvallisuusratkaisuihin. Lisäksi materiaalien on kestävä kemiallista rasitusta ja vetyhaurastumista [62].

Vetyyn liittyvän teknologian kehittäminen on teknisesti vaativaa sen alhaisen tiheyden, korkean syttyvyyden ja pienen molekyylikoon takia. Noin 80-85 % vedystä tuotetaan ja käytetään tällä hetkellä suoraan valmistuspaikoissa, koska esimerkiksi kuljetuskustannukset ovat korkeat. Kaupallista käyttöä varten kuljetusratkaisuja on edelleen kehitettävä [50].

Käytössä olevia vedyn kuljetusmenetelmiä ovat maantiekuljetus, putkistot ja merikuljetus. Pitkillä etäisyyksillä putkistot voivat olla kustannustehokkaita, mikäli siirtomäärät ovat suuria. Merikuljetuksissa hyödynnetään yleisemmin ammoniakkia sekä nestemäisiä vedynkantajia [63].

Kaasumaisena vetyä voidaan kuljettaa kaasupullokonteissa tai putkipörsävaunuissa 180-550 barin paineessa. Kuljetusratkaisujen valintaan vaikuttaa, tapahtuuko vedyn tuotanto suurissa tuotantolaitoksissa vai pienemmissä kohteissa, kuten tankkausasemilla. Pitkät siirtomatkat sekä suuret siirtomäärät puoltavat putkiston käyttöä, kun taas paikallisessa jakelussa paineistetun putkipörsävaunun käyttö on yleisempää [64] [65].

Siirtoputkistoja voidaan rakentaa maalle, merelle tai putkisilloille. Siirtoputkistolle nimetään aina vastuhenkilö, joka vastaa käytöstä säädösten ja toimintaperiaatteiden mukaisesti. Vedyn siirtoputkisto on tarkastettava säännöllisesti Tukesin hyväksymän kansallisen tarkastuslaitoksen toimesta, mutta rakennusluvan myöntää kunnan rakennusvalvonta.

Vedyn diffundoituminen metallihilaan voi aiheuttaa haurastumista. Tällöin on valittava putkistomateriaaleiksi sopivia teräslaatuja, jotka kestävät vetyrasitusta. Vedyn vuodon vuoksi putkiston saumakohtia pyritään minimoimaan. Hitsausta käytetään, kun putkistot liitetään toisiinsa. Putkistojen rakentaminen on kallista, tosin huollot ja käyttö, ja niistä aiheutuvat kulut ovat suhteellisen alhaisia [65] .

Merikuljetuksessa vety voidaan siirtää nesteytettynä tai ammoniakkinä. Nesteytetyn vedyn täytyy olla kryogeenisissä olosuhteissa. Ammoniakki on tilavuusenergiatiheydeltään suurempaa kuin vety, ja sillä on vakiintunut kuljetusverkosto, minkä vuoksi ammoniakki on lupaava vedyn kuljetusmuoto pitkällä etäisyyksillä. Vety voidaan siirtää myös sidottuna nestemäisiin, orgaanisiin kantaja-aineisiin eli LOHC-aineisiin. LOHC-teknologia mahdollistaa vedyn kemiallisen varastoinnin, jolloin kuljetuksessa voidaan hyödyntää olemassa olevaa öljyn kuljetusverkostoa.

Ammoniakkia voidaan valmistaa aluksi tuulipuistojen läheisyydessä, mikä tarjoaa siirrettävän tuotantoratkaisun. Tällöin ei tarvita suurta infrastruktuuria ja säästetään investoinneissa. Satamien terminaalissa ammoniakkia voidaan varastoida kylmäsäiliöissä. Nykyiset ammoniakkiterminaalit ovat liian pieniä eivätkä riitä suurten PtX-hankkeiden volyymille. Vanhojen terminaalien kapasiteettia on tällöin kasvatettava tai on rakennettava täysin uusia [41] [63] [67].

7. Vedynekäytön tulevaisuus

Tälläkin hetkellä Suomessa on useita kymmeniä vetyhankkeita eri kehitysvaiheissa. Osa niistä toteutuu , osa ei. Vihreän vedyn käyttö on joka tapauksessa nousujohteista ilmastotavoitteiden vuoksi. Seuraavaksi pohdin vihreän vedyn tuotantoon, käyttöön sekä varastointiin liittyviä haasteita ja ratkaisuja. Lisäksi nostan esille vetypolttokennot etenkin tulevaisuuden liikennekäytössä ja vihreän teräksen merkityksen terästuotannossa [70].

7.1 Vetytalouden näkymät Suomessa

Euroopan Unionin lainsäädäntökokonaisuus ilmastotavoitteille (Fit for 55) edellyttää, että Unionin kasvihuonekaasupäästöt on vähennettävä 55 % vuoteen 2030 mennessä. Vihreä vety on oleellinen elementti energiantantajana sekä teollisuuden raaka-aineena. Suomen vetytaloudelle tilanne tarjoaa mahdollisuuksia, koska Suomessa on saatavilla puhdasta vettä elektrolyysiin sekä luotettava ja suhteellisen kattava liityntäkapasiteetti tuulivoimalle. Tämän lisäksi Suomen kylmä ilmasto ja laaja kaukolämpöverkko tekevät hukkalämmön hyödyntämisestä tehokasta, sillä lämpö voidaan siirtää kaukolämmitykseen [71] [72] [73].

Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä. Tällöin on investoitava koko vihreän vedyn arvoketjuun eli uusiutuvan energian tuotannosta vedyn valmistukseen, jatkojalostukseen,

kuljetukseen, varastointiin ja lopuksi vihreän vedyn käyttöön. Yhteistyö ja erilaiset hankkeet eri toimijoiden välillä on oleellista vihreän siirtymän toteutumiselle [74] [75].

Arvioiden mukaan vetytalous voi synnyttää Suomeen kymmeniätuhansia työpaikkoja. EU:n päästökauppajärjestelmät luovat pohjaa ja kannustimia vedyn käyttöön. Investointeja vihreän vedyn hankkeisiin arvioidaan olevan tällä hetkellä yli 24 mrd euron edestä. Valtaosa hankkeista pääsee toteutumaan vasta vuosien 2027-2030 aikana. Suurin osa hankkeista on tällä hetkellä suunnitteluvaiheessa, odottaen investointipäätöstä. Suomen hallituksen päätökset investointiluvista ja investointikannustimista sekä energiainfrastruktuuriin panostamisesta ovat merkittäviä askelia vihreän siirtymän edistämiseksi [70] [76] [56].

Vetyä voidaan käyttää tulevaisuudessa energian tasapainottamiseen. Uusiutuvalla energialla tuotettu vety varastoidaan ja voidaan myöhemmin käyttää sähköntuotantoon juuri polttokennoissa tai turbiineissa. Kun uusiutuvan energian tuotanto on suurta, niin tällöin energiaa varastoidaan vetyyn ja käytetään kun energian tuotanto on vähäistä. Vetyä voidaan varastoida pitkäksi aikaa. Tämä on hyödyllistä ja lisää energiaturvallisuutta alueilla, joissa on heikompi sähköverkosto [52] [62] [63].

7.2 Vetyhankkeiden haasteet

Hankkeiden viivästyminen on seurausta eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Erilaiset luvat hankkeelle vaativat aikaa, ja lisäksi uusien teknologioiden käyttöönotto sisältää riskejä ja testausta ennen kuin ne voidaan ottaa käyttöön. Lainsäädännön kehittymistä on hankala ennustaa pitkällä tähtäimellä, kuten lentopolttoaineisiin liittyvää lainsäädäntöä. Vetyhankkeiden etenemistä hidastaa myös investointien ajoituksen epävarmuus. On hankalaa ennustaa luotettavasti pitkäaikaisia sähkönhintaennusteita sekä elektrolyysitekniikoiden kustannuskehitystä. Kun markkinatilanne muuttuu nopeasti (sähkön hinnan nousu, materiaalipula, toimitusviiveet ynnä muu), päätökset siirtyvät merkittävästi eteenpäin [50] [52] [56] [57] [58] [62] [69] .

Uusien vetytehtaiden rakentamiselle voi muodostua esteeksi sähköverkon ja siirtoverkon kapasiteettirajat. Erityisesti suuria elektrolyysi-hankkeita ei voida toteuttaa ilman, että sähköverkkoon tehdään vahvistuksia. Tämä voi kestää vuosia ja asettaa myös hankkeita keskinäiseen kilpailuasetelmaan. Lisäksi alueellinen ja paikallinen hyväksyttävyyys vaikuttavat hankkeiden aikatauluun. Vihreä vety nähdään usein myönteisenä, mutta siihen liittyvät asiat kuten tuulipuistot ja varastosäiliöt, herättävät usein huolta. Tämä voi johtaa valituksiin ja pitkiin lupaprosesseihin. Myös hankkeiden yhteensopivuus alueellisen kaavoituksen kanssa aiheuttaa usein viivettä. Vetylaitokset yleensä edellyttävät ympäristövaikutusten arviointia (YVA). Hankkeiden aikatauluihin vaikuttavat lisäksi materiaalien toimitusrajoitteet. Elektrolyysereiden valmistuksessa käytetään iridiumia ja platinaa, joiden saatavuus vaihtelee [50] [52] [54] [56] [57] [58] [62] [69] .

7.3 Synteettiset polttoaineet ja Power-to-X-teknologiat

Synteettisten polttoaineiden käyttöönotto riippuu useista teknisistä ja taloudellisista asioista. Tavoitteena on ensisijaisesti vähentää fossiilisten polttoaineiden päästöjä. Järkevintä on aluksi lisätä synteettistä polttoainetta nykyisten polttoaineiden joukkoon. Tällä tavalla voidaan asteittaisesti vähentää hiilidioksidipäästöjä [32] [33].

Ensimmäinen haaste synteettisten polttoaineiden käyttöön on teknologian kehitys sekä prosessien energiantarve. Synteettiset polttoaineet valmistetaan uusiutuvaa energiaa käyttäen, yhdistämällä vihreää vetyä ja teollisuuden prosesseista talteenotettua hiilidioksidia. Jo vihreän vedyn valmistaminen elektrolyysiprosessilla vaatii valtavan määrän uusiutuvaa energiaa. Myös elektrolyysiprosessien hyötysuhde on suhteellisen alhainen. Lisäksi teknologisia haasteita aiheuttaa elektrolyysin energiatehokkuus ja hukkalämmön hyödyntäminen. Osa näistä haasteista on kuitenkin ratkaistu hyödyntämällä hukkalämpöä kaukolämpöjärjestelmissä tai teollisuuden prosesseissa. Lisäksi Suomessa on hyvä potentiaali uusiutuvan energian tuotannon, erityisesti tuulivoiman, laajentamiselle. Tämä tukee synteettisten polttoaineiden valmistusta [32] [33] [52] [59] [61] [62] .

Synteettisten polttoaineiden tuotantoketjun kannalta on tärkeää, että tuotannon, valmistuksen ja käytön osa-alueet on kunnossa ja ne ovat toimivia. Elektrolyysitekniikoiden, erityisesti korkealämpötilaelektrolyysin (SOEC), laajamittaisempi hyödyntäminen on merkittävä askel kohti tehokkaampaa vihreän vedyn tuotantoa. SOEC-menetelmällä on korkea hyötysuhde verrattuna alkali- ja PEM- elektrolyysiin ja se on sitä kautta kustannustehokkaampi. Tosin SOEC-laitteiston kustannukset ovat korkeat ja käyttöikä on lyhyempi kuin alkali- ja PEM-elektrolyysissä. Materiaalivalinnat ovat tässäkin elektrolyysimenetelmässä olennaisia sillä oikeilla materiaaleilla on vaikutusta sähkökemiallisten reaktioiden prosesseihin. Luvussa 2 on kuvattu SOEC-menetelmän kemiallinen tausta [59] [61] [62].

VTT:n koordinoimassa hankkeessa tutkittiin synteettisten polttoaineiden käyttöönottoa. Tämän E-fuel-hankkeen tarkoituksena on kehittää synteettisten polttoaineiden valmistusteknologiaa useiden teollisuuden yritysten kanssa. Tutkimuksessa on ollut tarkoitus yhdistää korkealämpötilaelektrolyysiä hiilidioksidin talteenottoon sekä seoskaasun synteesiä. Korkea lämpötila takaa hyvän hyötysuhteen, mutta samalla aiheuttaa materiaalin kulumista. Erityisesti Saksassa on saatu lupaavia tuloksia kiinteäoksidi-elektrolyysin käyttöönotosta, tosin synteettisen polttoaineen pilottituotannossa. Sunfire asensi vuonna 2023 Rotterdamiin 2,6 MW elektrolyysilaitteen, joka koostuu 12:sta SOEC-kennosta [32] [33] [59] [61] [62] [77].

Power-to-X-teknologian kehittyminen mahdollistaa synteettisten polttoaineiden tuotannon käyttöönoton myös niillä sektoreilla, joissa suora sähköistäminen ei ole teknisesti tai taloudellisesti mahdollista. Synteettisiä polttoaineita tullaan käyttämään kohteissa, joissa sähköistäminen on haaste. Tähän kuuluvat raskas- ja meriliikenne sekä lentoliikenne. Henkilöautojen

polttomoottoreille synteettiset polttoaineet tarjoavat mahdollisuuden vähentää päästöjä erityisesti siirtymävaiheessa [32] [33] [40] [41] [55].

Hukkalämmön hyödyntäminen esimerkiksi kaukolämpöverkkoon, parantaa merkittävästi vetylaitoksen kannattavuutta ja prosessien hyötysuhdetta. Vetylaitoksen alun kehityskaari kestää suunnittelusta pystytykseen 4-5 vuotta. Sähkölinojen rakentaminen taas kestää keskimäärin 2-5 vuotta, kantaverkolle 7-10 vuotta. Kokonaisen infrastruktuurin rakentaminen taas kestää yksittäisten laitosten rakentamista pidempään juuri lupien takia, esimerkiksi vetyputkistojen, maankäyttösopimuksesta [52] [59] [60] [62] [65].

Kun uusia tuotantolaitoksia vihreän vedyn ympärille perustetaan, joudutaan tarkasti miettimään ensin laitoksen paikkaa. Kannattavaa on pystyttää laitos esimerkiksi uusiutuvan energialähteen lähelle. Alkuinvestointeihin menee rahaa, puhumattakaan kokonaisen vetyinfran rakentamisen kustannuksista. Vetyinfra käsittää vedyn tuotannon, varastoinnin, kuljetuksen sekä käytön [52] [59] [62] [65] [69].

Vihreän vedyn tuottaminen on edelleen kallista, sillä elektrolyysi vaatii runsaasti energiaa. Lisäksi elektrolyysilaitteistot ja siihen liittyvä muu teknologia ovat merkittäviä investoinnin kohteita. Kustannusten alentamiseen on tehty onnistuneesti simulaatiomalleja, kuten LUT-yliopiston Lauri Järvinen kertoo omassa väitöskirjassaan. Lauri Järvisen mukaan elektrolyysereiden teholähdettä parantamalla onnistutaan alentamaan vihreän vedyn tuottamisen kustannuksia. Kustannukset ovat simulaatiomallin mukaan 4-8 euroa kilogrammaa kohti. Vertailuna fossiilisen vedyn hinta on 1-2 euroa kilogrammalta [50] [59] [62] [78].

Vihreää vetyä tuotetaan Suomessa toistaiseksi hyvin vähän, eikä sillä ole käytännön vaikutusta energiantuotannon kokonaisuuteen. Keskeinen haaste liittyy tuotannon skaalautuvuuteen, mikä korostaa tarvetta lisätä vihreän vedyn tuotantokapasiteettia tulevina vuosina. Erityisesti terästeollisuudessa hiilidioksidipäästöjen alentaminen on olennaista, sillä terästeollisuus aiheuttaa jopa 7-9 % koko maailman hiilidioksidipäästöistä [52] [56] [79].

7.4 Vihreä teräs ja teollisuus

Vihreän teräksen määritelmänä on, että sen valmistuksessa fossiilisia polttoaineita ei käytetä rautamalmin pelkistämiseen. Pelkästään SSAB:n Raahen tehdas tuottaa 7 % Suomen hiilidioksidipäästöistä. Vaikka koko vihreän teräksen tuotanto ei ole päästötön, niin päästöt vähenevät merkittävästi verrattuna perinteiseen masuunituotantoon. Toisaalta SSAB:n Raahen tehdas on luopunut fossiilittomasta tehtaasta ja uudistaa vanhaa teräksen tuotantolaitostaan. Masuunit korvataan valokaariuuneilla, jotka toimivat uusiutuvalla sähköllä. Raahen tehtaan päästöt tulevat tällöin vähenemään 80-90 %. Tämä tukee Suomen tavoitteita olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä [22] [57] [58] [79].

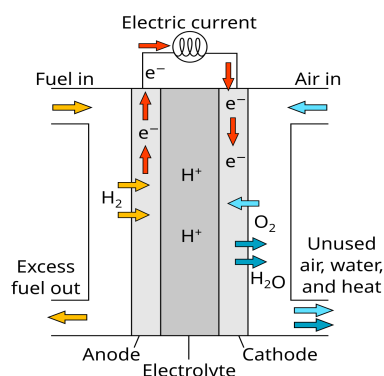
Tällä hetkellä terästeollisuus kuuluu EU:n päästökauppajärjestelmään, ja se on saanut päästöoikeudet ilmaiseksi. Vuodesta 2026 alkaen ilmaisia päästöoikeuksia vähennetään asteittain ja vuodesta 2034 lähtien yritykset joutuvat ostamaan kaikki oikeudet markkinoilta. Tämä tarkoittaa teräksen tuotantokustannusten nousua ja sitä kautta yritysten investointien epävarmuutta [68] [76] [79].

Investoinnit terästeollisuuden vihreään vetyyn ovat alkunnostuksen jälkeen hidastuneet merkittävästi. Tällä hetkellä vihreä vety nähdään liian kalliina teollisen mittakaavan tuotantomuotona. Ratkaisu voi olla se, että yhtiöt toimivat yhteistyössä sijoittajien kanssa. Sijoittajat voivat vaatia omistamiltaan yhtiöiltä vähäpäästöisyyttä. Siirtymä vihreään teräkseen vaatii paljon investointeja, ja sitä kautta lisää sekä julkisten että yksityisten sijoitusten määrää [50] [56] [57].

7.6 Vetypolttokennot ja liikenne

Vetypolttokennon toimintaperiaatteena on, että kemiallisessa reaktiossa vety reagoi hapen kanssa ja tuottaa sähköä. Reaktion sivutuotteena syntyy vesihöyryä. Polttokennossa vapautuva sähköenergia siirtyy ajoneuvon sähkömoottorille. Tämä tekee polttokennoista päästöttömän teknologian liikennekäyttöön. Vedyn valmistaminen kuitenkin liikennekäyttöön vaatii kokonaan vedyn ympärille uuden infrastruktuurin tuotannosta varastointiin sekä jakeluun. Synteettiset polttoaineet voivat olla helpommin käyttöönotettavia kuin suora vety, koska ne hyödyntävät nykyistä jakeluverkkoa [8] [41] [62] [63] [32] [33].

Polttokennoja voidaan käyttää useissa sovelluksissa, kuten liikenteessä, asuinrakennuksissa ja energian varastoinnissa sähköverkkojärjestelmissä. Hyötysuhde vetypolttokennoille on 50-60 %. Tämä on parempi kuin polttomoottorin hyötysuhde. Vetypolttokennotyypit ovat PEM-polttokennot ja kiinteäoksidipolttokennot (SOFC). Polttokennojen etuna on ettei energiaa tarvitse varastoida akkuihin, sillä kemialliset reaktiot tuottavat sähköä koko ajan. Tosin pieni akku tarvitaan tehon tasaukseen. PEM-polttokennon rakenne näkyy kuvasta 4 [8] [41] [62].



Kuva 4. PEM-polttokennon toimintaperiaate [80]

Vetypolttokennossa vety varastoidaan ajoneuvon tankissa puristettuna kaasuna. Nestemäistä vetyä tutkitaan, mutta sitä ei käytetä maantieliikenteen ajoneuvoissa. Polttokennossa vety reagoi hapen kanssa tuottaen sähkövirtaa. Polttokennoautojen hyötynä on päästöttömyyden lisäksi hiljaisuus liikenteessä, toimintavarmuus sekä tankkauksen nopeus. Haittapuolena on vetykaasun kuljettaminen, siirtäminen ja varastoiminen. Lisäksi valmistuskustannukset ovat korkeita. Raskaan liikenteen käytössä vety on käytännöllisempi vaihtoehto painaville akuille. Myös vetylaivoja suunnitellaan tällä hetkellä. Taloudellisesti se ei kuitenkaan ole järkevää, joten hybridimallit ovat suosiossa [62] [63] [64] [67] .

7.6 Vedyn varastoinnin haasteet

Vedyn varastoimisessa on omat haasteensa, kuten suuret kustannukset sekä turvallisuusvaatimukset. Seuraavassa kerron tarkemmin vedyn varastoinnista ja esitän ratkaisuja vedyn varastointihaasteisiin. Vedyn varastointiin liittyviä haasteita Suomessa ovat etenkin varastointiin liittyvät kustannukset, turvallisuushaasteet ja skaalautuvien varastointiratkaisujen puute. Vedyn täysimittainen hyödyntäminen edellyttää tehokasta ja skaalautuvaa varastointia. Yhtenä mielenkiintoisena ratkaisuna esittelen metallihydridit, jotka mahdollistavat vedyn kemiallisen varastoinnin. Lisäksi esittelen jo vakiintuneita sekä uusimpia varastointitekniikoita [50] [62] [64] .

Vetyä voidaan varastoida kaasumaisessa tai nestemäisessä olomuodossa. Vety on molekyylikooltaan pieni, sen tiheys on erittäin matala, ja sillä on alhainen kiehumispiste. Vetykaasulle tarvitaan korkeapainesäiliöitä, nesteelle kryogeenisiä lämpötiloja. Paineistetun vetykaasun tiheyttä saadaan kasvatettua ja voidaan varastoida enemmän vetyä. Tämän jälkeenkään ei saavuteta ihanteellista tiheyttä. Tarvitaan suuria säiliöitä, tämä taas lisää investointikustannuksia [62] [63] [64] .

Vedyn varastoinnin haasteena on myös vetyaurastuminen, joka liittyy vedyn pieneen atomikokoon. Atomikoon ansiosta vety pääsee tunkeumaan rakenteiden metallihilaan ja vaikuttaa haitallisesti materiaalien ominaisuuksiin. Metallin haurastuminen voi johtaa taipuisuuden ja murtumakestävyyden alenemiseen. Testaaminen on paras tapa varmistaa materiaalin toimiminen käytännön olotilassa. Jos testaaminen ei onnistu, niin yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat alumiiniseokset, kupariseokset ja ruostumaton teräs [62] [64].

Vetysäiliöitä voidaan erotella materiaalin ja paineenkeston perusteella. Tyypin 1 säiliöt ovat kokonaan metallista valmistettu ja ne ovat hinnaltaan edullisia mutta samalla raskaita. Tyypin 2 säiliön sisäosa on vahvistettu painetta kestäväällä komposiitilla. Tyypin 3 säiliöt ovat komposiittimateriaalista tehty ja sisus on metallia. Ne kestävät jopa 700 barin paineen. Säiliöt ovat kalliita. Tyypin 4 säiliöt ovat hiilikuituvahvistettuja komposiittisäiliöitä, joiden sisäsäiliö on polymeeriä. Tyypin 4 säiliöitä voi liikutella keveyden takia [62].

Ennen kuin vetysäiliö otetaan käyttöön, sille täytyy tehdä testejä. Testien tarkoitus on testata säiliön toimintakykyä. Suomessa vety on luokiteltu vaaralliseksi aineeksi, joten varastoinnin on täytettävä vaarallisten kemikaalien käytön periaatteet [64].

Kun vetysäiliö on sisätiloissa, niin turvallisuusasioissa on oltava erityisen tarkka. Koska vety on niin kevyttä, niin kasaantuu lähelle kattoa. Ilmanvaihto on oltava erityisen hyvä, jotta vuototilanteissa vety saadaan ohjattua ulos. Vetylaitoksia suunniteltaessa on tilassa oltava asianmukaiset korkean tilan ilmanvaihto-, tunnistus- ja hallintatoimet. Myös palosammutusjärjestelmä on asennettava. Vetyvuotojen estämiseksi on syytä asentaa vuotohälyttimiä. Vuotestejä ja venttiilien tarkastuksia on tehtävä säännöllisesti. Samalla testataan ja huolletaan hälyttimet. Korkeassa paineessa vuotojen riski kasvaa. Koska vetykaasu hajutonta ja väritöntä, niin hajuaiisti ei kerro vetyvuodosta. Tarkistuksia liitokselle on tehtävä usein. Testausmenetelmiin kuuluvat muun muassa saippuakuplaliuos ja käsikäyttöinen vetyilmaisin. Liitännät on muutenkin tarkastettava kulumisen varalta [62] [64].

Säiliöiden lämpötilaa ja painetta on tarkkailtava koko ajan. Ajoneuvokäytössä säiliöiden tulee kestää $-40..+85$ °C lämpötilat. Teollisissa varastointiratkaisuissa lämpötilavaatimukset voivat poiketa tästä.. Lämpörajoitusten ylitys aiheuttaa kuormitusta säiliölle ja lyhentää sen käyttöikää. Lämpötilojen muutokset tulevat mahdolliseksi esimerkiksi silloin, kun säiliötä täytetään tai tyhjennetään. Täyttövaiheessa lämpötila nousee, tyhjennysvaiheessa lämpötila laskee. Lämpötilan hallintaan liittyen on otettava huomioon myös vetykaasun kulkeminen paineenalennusventtiilin läpi varastosäiliöön. Vedyn lämpötila nousee tällöin [62] [64].

Vetykaasu jäähdytetään ennen sen ohjausta varastosäiliöön. Jäähdytys tehdään yleensä lämmönvaihtimen avulla, jossa lämpö siirtyy vetykaasusta jäähdytysnesteeseen. Vesi on yleisesti käytetty neste lämmönvaihtimissa, sillä vesi on edullista ja sillä on matala viskositeetti sekä korkea lämpökapasiteetti [62] [64].

7.7 Uusia vedyn varastointiratkaisuja

Uusia ratkaisuja vedyn varastoinnin ongelmiin ovat muun muassa maanalaiset kallio- tai luolat (suolaluolat), metallihydridit ja nesteytetty vety. Metallihydridit varastoivat vetyä sitomalla sitä metalliseoksiin. Vety vapautuu hybridistä lämmittämällä, esimerkiksi vetyautoissa on hyödynnetty tekniikkaa, tosin kaupallisissa autoissa sitä ei vielä käytetä. Tämä soveltuu esimerkiksi pienempien vetymäärien varastointiin. Seuraavassa tätä tarkemmin [62] [63] [64].

Metallihydridit muodostuvat vetymolekyylien sitoutumisessa metalliseokseen kemiallisen reaktion kautta. Vety pystyy muodostamaan hybridejä usean metallin, kuten magnesiumia, titaania ja litiumin kanssa. Kun vety halutaan taas käyttöön, niin hybridiä lämmitetään ja vety irrotetaan hybridistä. Kun vetyä varastoidaan hydridiin, niin erinomaisina etuina ovat, alhainen

lämpötila sekä matala paine. Rajoittavia tekijöitä ovat varastointikapasiteetti sekä rajallinen sitouttaminen hydridiin ja irrottaminen siitä. Vaikka metallihydrit ovat vakaita ja materiaaleja, niin vedyn hydridistä vaatii jossakin tapauksissa korkean lämpötilan. Esimerkiksi LiH vaatii noin 900 asteen lämpötilan vedyn vapauttamiseksi. Tämän takia magnesiumihydridi onkin lupaavampi materiaali vedyn varastointiin [62] [63].

Magnesiumilla on suuri vedyn varastoitteisuus. Myös metalliseoksia, kuten FeTi, on tutkittu niiden alhaisten lämpötilojen takia. Rajoittavana tekijänä metalliseoshydridillä on alhaiset vetypitoisuudet. Esimerkiksi magnesiumipohjaisia hydridejä on kehitetty paljon, niitä on tälläkin hetkellä käytössä. Myös erilaisten katalyyttien hyödyntäminen reaktion nopeuttamiseksi on tutkimuksen kohteena. Metallihydrit ovat tällä hetkellä sopivia vedyn varastointimenetelmiä pienimuotoiseen varastointiin. Kuljetustarkoitukseen metallihydrit ovat huonoja, tosin FeTi-hydridin on tutkittu olevan sovelian kuljetustarkoitukseen [62] [63].

Vetyyn verrattuna ammoniakkin kuljetus ja varastointi ovat turvallisempia ja edullisempia. Ammoniakki voi toimia erittäin hyvänä vetyenergian kantajana. Ammoniakilla on suuri vetypitoisuus massaa ja tilavuutta kohden. Ammoniakki varastoi vetyä suuremmalla tilavuusenergiatiheydellä kuin nestemäinen vety, mutta massakohtainen energiatiheys on alhaisempi. Ammoniakin varastointi nestemäisenä tapahtuu 10-15 barin paineessa tai käyttäen -33 celsiusasteen lämpötilaa. Ammoniakkia on käytetty teollisessa ja laajassa skaalassa yli sadan vuoden ajan. Tällöin sen tuotanto, tekniikka ja käytännöt ovat kehittyneet korkealle tasolle [47] [48] [67] .

Vety voidaan sitoa ammoniakkiin kuljetusta ja varastointia varten, ja esimerkiksi voimalaitoksissa erottaa takaisin vedeksi. Tämä vaatii kuitenkin 500–800°C lämpötiloja, mikä vaikuttaa energiatehokkuuteen. Erityisesti meriliikenteessä ammoniakkaa voidaan varastoida ja kuljettaa suuria määriä [48] [67].

LOHC eli nestemäisten, orgaanisten vedynkantajien etuina ovat muun muassa alhainen myrkyllisyys, korkea varastointikapasiteetti, helppo käsiteltävyys ja kuljettaminen ei vaadi erityistä suojausta kuten vedyllä ja ammoniakilla. LOHC-molekyyleillä on vedyn varastoinnissa kaksi vaihetta vaihetta: hydraus ja dehydraus. Hydrauksessa vety absorboituu LOHC-molekyylin ja dehydrauksessa vety vapautetaan molekyylistä endotermisessä reaktiossa. Molekyylit ovat käyttökelpoisia uudelleen prosessin jälkeen. Lupaavimpana on DBT eli dibentsyyliolueeni. Se pystyy varastoidaan vetyä 6,2 % sen painosta ja sillä on alhainen syttyvyys. DBT:n hydraus ja dehydrausprosesseilla voidaan päästä 60-75 % tehokkuuteen [62] [66].

Katalyyttien kehittäminen dehydrausprossiin on tärkeää, sillä nykyiset katalyytit ovat jalometalleja, kuten platinaa ja palladiumia. Tämä on myös erittäin kallista. Eli kustannustehokkaampien katalyyttien kehittäminen on välttämätöntä [62] [66].

Vetyä voidaan varastoida myös maan alle geologisiin rakennelmiin, kuten **suolaluoliin tai kallioluoliin** sekä öljyvarastoihin. Esimerkiksi Pohjois-Ruotsin Luulajaan on Vattenfallin ja SSAB:n toimesta rakennettu kallioluola, johon varastoidaan vetyä [22] [62].

Suomessa ei vielä ole vedylle rakennettuja kallioluolia, mutta tutkimus käy ahkerana niiden ympärillä. Esimerkiksi HUG-hankkeen (Hydrogen UnderGround) teemana on keskittyminen vedyn maanalaiseen varastointiin. Tässä kaksivuotisessa hankkeessa on VTT:n ja Geologian tutkimuskeskuksen lisäksi 16 yritystä [62] [73] [81].

7.8 Yhteenveto vedyn varastointiin ja käyttöön liittyvistä haasteista

Vetytalouteen liittyy useita teknisiä, taloudellisia ja yhteiskunnallisia haasteita. Nämä haasteet ovat ratkaistava, jotta vihreän vedyn tuotanto ja käyttö laajenevat tulevaisuudessa. Taulukossa 4 on esitetty keskeisimmät haasteet ja niihin liittyvät ratkaisuehdotukset tutkimustiedon sekä meneillään olevien hankkeiden perusteella.

Taulukko 4. Vedynkäytön tulevaisuuden haasteita ja ratkaisuehdotuksia.

Haaste	Ratkaisuehdotus
Vihreän vedyn korkea hinta verrattuna harmaaseen vetyyn	Vihreän vedyn tuotantotuet Elektrolyysilaitteistojen skaalautumisen edistäminen
Puutteellinen infrastruktuuri	Investoinnit vetyputkistoihin Tankkausverkoston kehittäminen
Varastointi ja kuljetus	Uusien varastointimenetelmien tutkimus ja kehitys. Esimerkiksi hydridit, kallioluolat
Turvallisuus- ja hyväksyntä	Turvallisuusstandardit, koulutukset ja käytännöt Avoin viestintä
Energiatehokkuus	Elektrolyysimenetelmien tehokkuuden parantaminen Hukkalämmön hyödyntäminen

Ratkaisut kuvaavat vetytalouden kehityssuuntaa ja niissä korostuu teknologian kehitys ja investointien merkitys.

8. Yhteenveto

Tässä työssä on tarkasteltu vihreän vedyn tuotantoa, sen taloudellisia ja teknisiä lähtökohtia sekä vedyn laajempaa roolia tulevaisuuden energiankantajaksi erityisesti sektoreilla, joissa päästöjen vähentäminen on sähköön suoralla käytöllä haastavaa. Näitä ovat muun muassa raskas teollisuus, meriliikenne sekä lentoala. Selvityksessä käy ilmi, että sovellukset ovat toteuttamiskelpoisia jo nyt, mutta niiden laajamittainen käyttö edellyttää taloudellisesti kannattavaa ja jatkuvaa vihreän vedyn tuotantoa.

Vetytalouden kehitystä määrittelevät seuraavat keskeiset tekijät: uusiutuvan sähkön saatavuus sekä elektrolyysilaitteiston kustannukset ja käyttövarmuus. Sähkö on selvästi suurin kustannustekijä vihreän vedyn tuotannossa, minkä vuoksi vedyn kannattava valmistaminen edellyttää matalia sähkön hintoja sekä joustavaa energian tuotantoa. Taloudellisinta on tuottaa vetyä hetkinä, jolloin sähkön hinta on alhainen. Esimerkiksi tuulisina ajankohtina tai yöaikaan.

Investointien ja hankkeiden sijoittuminen kannattaa suunnata alueille, joilla uusiutuvan energian tuotanto on runsasta sekä sähköverkko on vahva. Myös hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa voi nostaa hankkeen kannattavuutta.

Taloudellisten edellytysten ohella vetytalouden eteneminen riippuu myös hyväksyttävyydestä. Uusiutuvan energian laajentaminen kohtaa uusia paikallista vastustusta. Siksi avoin viestintä sekä alueellisten hyötyjen esille tuominen ovat tärkeitä. Hankkeiden toteutuminen vaatii investointitukia, sujuvia lupaprosesseja sekä EU-sääntelyn johdonmukaisuutta. Toisaalta vetytalouden ympärille syntyvät työpaikat ja muut hankkeet voivat lisätä yleistä hyväksyntää.

Selvityksessä nousi esille se, että vetytalouden kasvun ja kehityksen ei tule perustua pelkkään vihreän vedyn tuotantoon. Vetytalous edellyttää toimivia ratkaisuja vedyn varastointiin, kuljetukseen sekä jatkojalostukseen. Selvityksen mukaan vihreän vedyn suurimmat haasteet liittyvät sen matalaan energiatiheuteen, varastoinnin korkeisiin kustannuksiin sekä laajemman vedyn kuljetusinfraan puutteeseen.

Tämän vuoksi Power-to-X-tuotteet ovat keskeinen vaihtoehto vedyn hyödyntämiselle, sillä ne mahdollistavat tehokkaamman energian varastointitavan kuin vety. Vertailussa e-ammoniakki nousi teknisesti ja logistisesti lupaavimmaksi vedyn kantajaksi. Synteettisen ammoniakkin tuotanto, varastointi ja kuljetus hyödyntävät jo olemassa olevaa infraa.

Lähteet

- [1] European commission. 2023. Delegated Act on Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO).
https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen/renewable-hydrogen_en
- [2] European Parliament Research Service. 2023. Hydrogen in the EU.
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI\(2023\)747085_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI(2023)747085_EN.pdf)
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA). 2023. Renewable Power Generation Costs in 2023. Tuulivoiman kustannusten lasku.
<https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>
- [4] Suomen uusiutuvat ry. 2025. Tuulivoima Suomessa 1.6.2025. Tuulivoiman nopea kasvu.
https://suomenuusiutuvat.fi/media/tuulivoima_vuositolastot-6_2025.pdf
- [5] Motiva. 2024. Aurinkosähkön ja sähkönkulutuksen yhteensovittaminen.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosa_hkon_ja_sahkonkulutuksen_yhteensovittaminen
- [6] Maa- ja metsätalousministeriö. 2025. Vesivoiman vaikutus Suomen sähköjärjestelmään ja merkittävimpien vesivoimakohteiden tunnistaminen. Lyhennetty linkki <https://urly.fi/3ZHU>
- [7] Luonnonvarakeskus (LUKE). 2023. Puun käyttö energiantuotannossa.
https://www.luke.fi/en/statistics/wood-consumption/wood-in-energy-generation-2023?utm_source=chatgpt.com
- [8] Maritime Logistic Research Center (MLRC). 2024. Polttoaine Tietopaketti: Vety. UUPO-hanke. Rauma.
<https://www.merilogistiikka.fi/wp-content/uploads/2024/10/7.-Vety-polttoaine-tietopaketti-paivitetty-231024.pdf>
- [9] Vattenfall. Maailman ensimmäinen fossiilivapaa patoluukku.2025.
<https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/maailman-ensimmainen-fossiilivapaa-patoluukku#download-page>
- [10] IEA. Iron and steel technology roadmap. 2020.
https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
- [11] Energiavirasto/LUT-yliopisto.2025. Suomen sähköntuotanto-miten kapasiteetti kehittyy?
https://energiavirasto.fi/documents/11120570/232087336/Uusiutuvan_Energian_Paiva_Vakkilain_en_20250123.pdf

- [12] Lukasz Szablowski, Malgorzata Wojcik, Olaf Dybinski. Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. 2025. Energy, Elsevier.
- [13] Stargate hydrogen. 2025. Elektrolyysiprosessit.
<https://stargatehydrogen.com/blog/basics-of-hydrogen-electrolysis/>
- [14] TUKES. SOEC- elektrolyysi. 2024.
<https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#elektrolyysi>
- [15] HYGCEL-projekti. 2024. <https://www.lut.fi/en/hygcel/work-packages>
- [16] Greennorth energy. Naantalin hanke. 2025. <https://www.greennorth.energy/hankkeemme/>
- [17] Lapin AMK. AAVE-hanke. 2025-2027. <https://aavehanke.fi/>
- [18] P2X. Joensuun tehdas. 2029. <https://p2x.fi/hanke/>
- [19] BalticSeaH2-projekti. 2023-2028. <https://balticseah2valley.eu/project/>
- [20] JustH2Transit-hanke. <https://www.justh2transit.fi/fi>
- [21] Pohjois-Savon energian Masterplan-hanke. 2024-2026.
<https://navitas.fi/pohjoissavonenergiamasterplan>
- [22] HYBRIT- hanke. 2016-2026.
<https://group.vattenfall.com/fi/medialle/mediatiedotteet/2025/hybrit-fossiilivapaan-vetykaasun-l-aajamittainen-varastointi-on-todistetusti-mahdollista>
- [23] P2X Solutions. Vihreän vedyn tuotantolaitos. 2025.
<https://p2x.fi/p2x-solutions-kaynnisti-harjavallan-laitoksen-vihrean-vedyn-kaupallisen-toiminnan-ensimmaisena-suomessa/>
- [24] Kokkolan Hycamite. Vähähiilinen vety.
202https://hycamite.com/press-releases/hycamite-aloitti-vedyntuotantolaitoksen-rakennustyot-ko
<https://hycamite.com/press-releases/hycamite-aloitti-vedyntuotantolaitoksen-rakennustyot-ko>
[kkolassa/](https://hycamite.com/press-releases/hycamite-aloitti-vedyntuotantolaitoksen-rakennustyot-ko)
- [25] P2X Solutions. Joensuun ja Oulun tehtaas. 2028-2029. <https://p2x.fi/hanke/>
- [26] Energiequelle. Oulun vetylaitos. 2028.
<https://www.energiequelle.fi/hankkeet/vetyhankkeet/oulu-green-hydrogen-park>
- [27] Energiayhtiö Helen. Vihreän Vedyn tuotantolaitos. 2026.
<https://www.helen.fi/en/news/2024/helen-to-invest-in-helsinkis-first-green-hydrogen-production-plant>

- [28] Plug Power. Suomen vihreän vedyn tuotantolaitokset.
<https://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2023/05/Press-Release-Finland-finnish.pdf>
- [29] Ren Gas. Vihreän vedyn ja power-to-x- tuotteiden valmistus. 2027-2030.
<https://ren-gas.com/projektit/0>
- [30] Vetyalfa. Suomen vetyhankkeet. <https://vetyalfa.fi/hankkeet/>
- [31] Neste.2024. Hankkeen peruminen.
<https://www.neste.com/fi-fi/news/neste-tarkastelee-uusiutuvan-vedyn-suunnitelmaansa-ja-vetae-vtyy-porvoon-jalostamon-120-mw-elektrolysaattorin-investoinnista>
- [32] International PtX Hub. Mitä tarkoittaa Power-to-X.]<https://ptx-hub.org/how-ptx-works/>
- [33] LUT. Mitä tarkoittaa power-to-x. 2023.
<https://www.lut.fi/en/articles/power-x-p2x-what-does-it-mean-energy-and-food-production>
- [34] Li, X., Zhang, L., Zhang, C. ym. 2023. The Efficient Utilization of Carbon Dioxide in a Power-to-Liquid Process: An Overview. *Processes*, 11(7), 2089.
<https://doi.org/10.3390/pr11072089>
- [35] Rönsch, S., Schneider, J., Matthischke, S. et al. 2016. Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel*, 166, 276-296.
- [36] Niklas Ylen. 2025. Synteettisen metaanin valmistus hiilidioksidista. Opinnäytetyö.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/504061/YI%C3%A9n_Niklas.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [37] Q Power. 2025. E- metaanin tuotanto. [eMetaanin tuotanto on käynnistynyt Suomessa ensimmäistä kertaa - Q Power](#)
- [38] Götz, M. et al. 2016. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review
https://www.dvgw-ebi.de/medien/dvgw-ebi/2_themen/publikationen/2015-aug-goetz.pdf
- [39] Luoto Energia Oy. 2024. Rauman Power-to-Methane -hankkeen esittely.
<https://portofrauma.com/tiedote-26-6-2025-tes-ja-cpc-finland-kehittavat-500-mwn-e-ng-hankkeen-rauman-satamassa/>
- [40] Methanol Institute. 2021. Methanol Production Pathways and Carbon Neutral Methanol.
- [41] International Energy Agency(IEA). Future of Hydrogen. 2019.
https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

- [42] Badger et al. 2024. A cradle-to-gate life cycle assessment of green methanol production using direct air capture. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ya/d4ya00316k>
- [43] Güleröğlu et al. 2025. Life Cycle Assessment of Green Methanol Production and Environmental Impact Comparison to Conventional Routes. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/2/624>
- [44] Methanol Institute. 2020. Metanolin turvallisen käytön käsikirja. https://methanolog.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf
- [45] Kumar, T.S., Manikandan, K., Rajendran, S. et al. 2023. Material compatibility of SI engine components towards corrosive effects on methanol–gasoline blends for flex-fuel applications. *Surface & Coatings Technology*.
- [46] Jiang, Y., Liu, H., Chen, Z. et al. 2025. Sustainable Anodes for Direct Methanol Fuel Cells: Advancing Beyond Platinum Scarcity with Low-Pt Alloys and Non-Pt Systems. *Sustainability*, 17(11), 5086. Methanol Institute. 2021. Direct Methanol Fuel Cells (DMFC). Technology Overview. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/11/5086>
- [47] IKSAD Publications. 2024. Dynamics of ammonia synthesis from industrial reactors: a gaze towards production diversity. https://www.researchgate.net/publication/380124128_DYNAMICS_OF_AMMONIA_SYNTHESIS_FROM_INDUSTRIAL_REACTORS_A_GAZE_TOWARDS_PRODUCTION_DIVERSITY
- [48] International Renewable Energy Agency (IRENA). 2022. Uusiutuva ammoniakki. <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia>
- [49] Kemia-lehti. 2024. AINA-hanke. <https://kemia-lehti.fi/ammoniakin-tutkimukseen-25-miljoonaa-euroa-vetytalous-edistyy/>
- [50] International Energy Agency (IEA). 2023. Global Hydrogen Review. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [51] H2 Cluster Finland. 2023. Clean Hydrogen Economy Strategy for Finland. Helsinki: H2 Cluster. <https://h2cluster.fi/wp-content/uploads/2023/06/H2C-H2-Strategy-for-Finland.pdf>
- [52] Fingrid Oyj. 2025. Prospects for future electricity production and consumption. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/fingrid_energiaennuste-q3-2025-eng.pdf
- [53] Fingrid Oyj. 2024. Q1/2024. 2024. Prospects for future electricity production and consumption.

<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q1-2024-fingrid.pdf>

[54] Peltonen, L. 2024. Tuulivoiman hyväksyttävyyys Suomessa – nykytila ja kehitysnäkymät. Itä-Suomen yliopisto.

<https://erepo.uef.fi/server/api/core/bitstreams/be46e082-6caf-4a7f-94bf-0938588f665a/content>

[55] European Parliamentary Research Service (EPRS). 2025. Renewable and low-carbon hydrogen – state of play and outlook.

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/767227/EPRS_BRI\(2025\)767227_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/767227/EPRS_BRI(2025)767227_EN.pdf)

[56] Energiateollisuus. 2025. Vetytalous tulee sittenkin.

<https://energia.fi/tiedotteet/vetytalous-tulee-sittenkin-direktiivi-kannustaa-investoinnit-liikkeelle/>

[57] Elinkeinoelämän keskusliitto. 2025. Vihreän siirtymän hankkeet.

<https://ek.fi/ajankohtaista/uutiset/hyvia-uutisia-vihreiden-investointien-etenemisesta/>

[58] Valtioneuvosto. 2023. Hallitus hyväksyi periaatepäätöksen vedystä.

<https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/hallitus-hyvaksyi-periaatepaatoksen-vedysta-suomella-edellytykset-valmistaa-10-prosenttia-eu-n-vihreasta-vedysta-2030>

[59] International Renewable Energy Agency(IRENA). 2020. Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to drive down cost.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf

[60] Saga Lindeberg. 2025. Review of waste heat recovery plans from green hydrogen production in Finland.

<https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/254c8791-2485-45c3-a200-e4d456160787/content>

[61] Juuso Klemi. LUT yliopisto. 2024. Elektrolyyseriteknikoiden edut ja haitat.

https://lutpub.lut.fi/bitstream/10024/168182/1/kandidaatintyo_klemi_juuso.pdf

[62] Hydrogen Europe. 2024. Hydrogen Infrastructure Report. Hydrogen Europe.

https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/10/2024.10_HE_Hydrogen-Infrastructure-Report.pdf

[63] International Renewable Energy Agency (IRENA). 2022. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal.

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf

[64] Turvallisuus- ja kemikaalivirasto(Tukes). 2023. Vety – turvallisuus, putkistot ja varastointi.

<https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#41ff0f76>

- [65] Gasgrid Finland/ Fingrid Oyj.2023. Energy transmission infrastructures as enablers of the hydrogen economy and clean energy system.
<https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid-Fingrid-hydrogen-economy-scenarios-5-2023-1.pdf>
- [66] Chiyoda Corporation. 2023. SPERA Hydrogen – LOHC Technology.
<https://www.chiyodacorp.com/en/service/lowcarbon/hydrogen/>
- [67] Det Norske Veritas (DNV). 2023.
Maritime Forecast to 2050 – Hydrogen & Ammonia Shipping.
<https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast/>
- [68] Euroopan komissio. 2021. Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 Climate Target.
<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/#:~:text=The%20Fit%20for%2055%20package%20is%20a,natural%20gas%20to%20renewable%20and%20low%2Dcarbon%20gases>
- [69] Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). 2023. Valtioneuvoston periaatepäätös vedystä.
<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/12f5e770-97c6-4ce9-a2ce-acd6b5c99339/content>
- [70] Elinkeinoelämän Keskusliitto.2021. Vihreän siirtymän hankkeet, dataikkuna.
<https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/>
- [71] Euroopan komissio. 2021. Fit for 55- ilmastotavoitteiden valmiuspaketti.
https://commission.europa.eu/topics/climate-action/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_fi
- [72] Finnish Consulting Group Oy (FCG). 2025. Vihreä vety ja Suomen vetytalous.
<https://www.fcg.fi/nakemyksia/tuulivoimasta-vihreaan-vetyyn-suomen-energiaturros-on-kaynnissa/>
- [73] Teknologian tutkimuskeskus Oy. 2025. Final report on common research needs & key results.
<https://www.finh2.fi/wp-content/uploads/final-report-on-common-research-needs-and-key-results.pdf>
- [74] Suomen valtioneuvosto. 2022. Ilmastolaki.
<https://www.finlex.fi/api/media/statute/18238/mainPdf/main.pdf?timestamp=2022-06-10T00%3A00%3A00.000Z>
- [75] Suomen vetytutkimusfoorumi. 2024. Kansallisen strategisen vetytutkimuksen tarpeet.
https://5b863a05-529f-41c7-8f9e-b93e5ff5eed9.filesusr.com/ugd/2e98da_2a3035465d0d4750a0196d61f466a718.pdf

- [76] Euroopan Unioni (EU). päivitetty 2024. EU:n päästökauppajärjestelmä ja sen uudistaminen. <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20170213STO62208/eu-n-paastokauppajarjestelma>
- [77] Sunfire GmbH. 2025. World's Largest SOEC Electrolyzer Started Up at Neste's Rotterdam Refinery. <https://sunfire.de/en/news/worlds-largest-soec-electrolyzer-started-up-at-nestes-rotterdam-refinery/>
- [78] Järvinen, L. 2025. Effect of impaired power quality on alkaline water electrolyzer performance and controllability. LUT University. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/168658/Lauri%20J%c3%a4rvinen_A4.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [79] International Energy Agency (IEA). 2020. Iron and Steel Technology Roadmap. https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
- [80] Wikimedia Commons. 2020. Proton Exchange Fuel Cell Diagram (CC0). https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Proton_Exchange_Fuel_Cell_Diagram.svg
- [81] Hydrogen UnderGround (HUG). 2024. HUG-hanke: Hydrogen UnderGround – maanalaisen vetyvarastoinnin konsepti Suomessa. <https://www.hug-h2storage.fi/>

