

Kaisa Kallio

VETYTALouden tulevaisuuden mahdollisuudet

Kandidaatintutkinto
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Risto Mikkonen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kaisa Kallio: Vetytalouden tulevaisuuden mahdollisuudet
kandidaatintutkinto
Tampereen yliopisto
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Toukokuu 2023

Tässä työssä tutustutaan vedyn erilaisiin käyttökohteisiin sekä vedyn hyödyntämisen tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Lisäksi tarkastellaan vetytalouden tulevaisuuden mahdollisuuksia tutustumalla Suomen, EU:n sekä muutaman muun maan vetystrategioihin ja niihin liittyviin haasteisiin ja rajoitteisiin. Tavoitteena tässä työssä on arvioida vedyn tarjoamia etuja useista teollisuuden sekä energiasektorin näkökulmista vihreän siirtymän ja hiilestä irtautumisen kannalta. Eri vetystrategioiden toteutusmahdollisuuksia arvioidaan teknisistä ja taloudellisista näkökulmista sekä arvioidaan poliittisten ohjaustoimien vaikutusta vetytalouden tulevaisuuteen.

Työssä esitellään vedyn tuotannon ja varastoinnin mahdollisuuksia sekä haasteita. Lisäksi perehdytään tällä hetkellä potentiaalisimpiin vedyn loppukäyttökohteisiin ja arvioidaan niiden merkittävyyttä tulevaisuuden tavoitteiden kannalta aiheesta tehtyjen tutkimusraporttien avulla. Tutustumalla EU:n komission hyväksymään vetystrategiaan saadaan arvioitua vetytalouden tulevaisuuden näkymiä ja vertailemalla strategian tavoitteita tiedossa oleviin haasteisiin saadaan kootua käsitystä strategian realiteetista. Suomen vetystrategiaa puolestaan voidaan arvioida vetyteknologioiden haasteiden lisäksi myös EU:n strategian avulla. Tietoa Suomen tulevasta kansallisesta vetystrategiasta saadaan Suomen valtioneuvoston vuonna 2023 hyväksymästä vetyä koskevasta periaatepäätöksestä.

Työssä havaitaan huomattavia haasteita Suomen ja EU:n vetystrategioiden täydellisessä toteutumisessa. Strategioissa määritellyt kunnianhimoiset tavoitteet vaatisivat valtavia investointeja ja paljon uutta infrastruktuuria. Lisäksi EU:n tavoite hyödyntää vihreää vetyä heti strategian siirtymävaiheessa on valtava taloudellinen riski eikä se todennäköisesti luo hyvää pohjaa vetymarkkinoille. Tämä osaltaan heikentäisi entisestään Suomen mahdollisuuksia toteuttaa vetytavoitteensa strategian mukaisessa aikataulussa.

Vetytalouden merkittävimmät rajoitteet ovat poliittisia ja taloudellisia, sillä kuten työssä havaitaan, sovelluskohteita on laajasti ja saavutettavat edut ovat merkittäviä. Vetyteknologiat eivät kuitenkaan pääasiallisesti ole kustannuskilpailukykyisiä. Myös vihreän ja päästöttömän vedyn tuotannon kustannukset ylittävät fossiiliset vaihtoehdot, eikä tuotantokapasiteetti tälläkään hetkellä vastaa vedyn kysyntää. Vedyn hyödyntämisen potentiaalin toteuttamiseksi vihreän vedyn tuotantoa sekä elektrolyysikapasiteettia olisi kasvatettava, mikä puolestaan vaatii huomattavia investointeja.

Avainsanat: Vetytalous, vihreä vety, vetystrategia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VETY NYKYPÄIVÄNÄ	2
2.1 Vedyn tuotantotavat	2
2.2 Vedyn varastointi	5
2.3 Vedyn sovelluskohteet	7
2.3.1 Vety teollisuuden sovelluksissa	8
2.3.2 Vety energian tuotannossa	10
2.3.3 Vedyn integrointi polttokennoissa	11
2.4 Power-to-X	13
3. VETYTALOUS JA SEN TULEVAISUUS	15
3.1 Vetytalous	15
3.2 Euroopan Unionin vetystrategia	16
3.3 Suomen vetystrategia	17
3.4 Maailman vetystrategiat	20
4. VETYTALouden HAASTEET	23
4.1 Tekniset haasteet vetytalousen toteutumisessa	23
4.2 Taloudelliset haasteet vetytalousen toteutumisessa	24
4.3 Suomen vetytalousen haasteet	25
5. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	29

1. JOHDANTO

Vedyn hyödyntäminen energiankantajana ei ole uusi keksintö ja monet vetyteknologiatkin ovat olleet olemassa jo pitkään, silti vedystä puhutaan nykypäivänä yhä enemmän. Vihreän siirtymän ja ilmastonmuutoksen myötä kiinnostus vetyyn on ollut kasvussa viimeisen vuosikymmenen aikana ja kiinnostus sen laajamittaiseen hyödyntämiseen on realisoitumassa lähitulevaisuudessa. Energiamurroksen myötä sääriippuvainen energiantuotanto kasvaa, mikä lisää tarvetta myös energian varastoinnille. Tulevaisuudessa vety voi auttaa tasaamaan energijärjestelmän tuotannon ja kulutuksen välisiä vaihteita sekä tarjota mahdollisuuden energian kausittaiselle varastoinnille. Vety on keskeisessä roolissa myös monien teollisuuden alojen hiilestä irtautumisessa sekä päästöttömän liikenteen kehittämisessä. Vety on myrkytön kaasu, jonka hyödyntämisestä sellaisenaan ei synny lainkaan haitallisia ympäristöpäästöjä, joten fossiilisten polttoaineiden korvaaminen vedyn avulla houkuttelee monilla eri aloilla. (Vartiainen 2020)

Tämän työn tavoitteena on tarkastella vedyn tarjoamia mahdollisuuksia sekä vetytalouden toteutumista tulevaisuudessa. Työssä tarkastellaan vedyn eri sovelluskohteita useilla eri osa-alueilla ja tutustutaan hyötyihin, joita vetyteknologioiden laajamittainen hyödyntäminen voisi tarjota. Teknologioiden tarkemmassa tarkastelussa huomioidaan myös erilaisten teknologioiden haasteet ja rajoitteet vetytalouden toteutumisen kannalta. Työn tavoitteena on hahmottaa vetytalouden nykytilaa sekä tulevaisuuden näkymiä ja tavoitteita tutustumalla Euroopan komission julkaisemaan vetystrategiaan, Suomen kansalliseen vetystrategiaan sekä muutamien muiden maiden julkaistuihin kansallisiin vetystrategioihin. Vetytalouden tulevaisuuteen vaikuttaa voimakkaasti vetyteknologioiden haasteet sekä poliittiset ohjaustoimet, joten työssä käsitellään myös näiden tuomia rajoitteita vetytalouden toteutumisessa.

Luvussa 2 käsitellään vetytalouden kulmakiviä kuten vedyn tuotanto- ja varastointitapoja sekä sovelluskohteita eri osa-alueilta. Luvussa 3 selvitetään kansallisia tavoitteita vetytalouden kehittymiselle tutustumalla vetystrategioihin Suomessa, EU:ssa ja maailmalla. 4. luvussa perehdytään vedyn hyödyntämisen ja vetytalouden toteutumisen haasteisiin teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Lisäksi selvitetään erityisesti Suomen haasteita vetytaloudessa. Lopuksi luvussa 5 kootaan yhteenveto aiheesta.

2. VETY NYKYPÄIVÄNÄ

Vety on ominaisuuksiensa ja myrkyttömyytensä ansiosta hyvin monikäyttöinen energi-
ankantaja. Vedyn käyttökohteita löytyy kuitenkin paljon myös energiasektorin ulkopuo-
lelta kuten teollisuudesta. Vedyn käytön edut muodostuvat pitkälti siitä, ettei vedyn hyö-
dyntämisestä synny sellaisenaan lainkaan hiilidioksidipäästöjä. Nykypäivänä suurin osa
vedystä tuotetaan kuitenkin fossiilisilla polttoaineilla kuten maakaasun höyryreformoin-
nilla. Täten vedyn tuotannon aiheuttamat ilmastopäästöt heikentävät vedyn hyödyntämi-
sen kannattavuutta. Ainoa täysin päästötön tuotantotapa on uusiutuvan energian hyö-
dyntäminen veden elektrolyysissä, mutta tuotantoa on vielä hyvin vähän. (Vredenburg
et al. 2021)

Tässä luvussa käydään läpi yleisimpiä vedyn tuotantotapoja ja erilaisia vedyn varastoin-
timenetelmiä. Lisäksi kerrotaan erilaisista vedyn hyödyntämismahdollisuuksista ja millai-
sia etuja vedyn laajemmalla hyödyntämisellä voitaisiin saavuttaa. Luvussa käsitellään
myös erilaisten tuotantotapojen, varastointimenetelmien sekä loppukäyttösovellusten
haasteita ja edelleen niiden välisiä syy-seuraussuhteita.

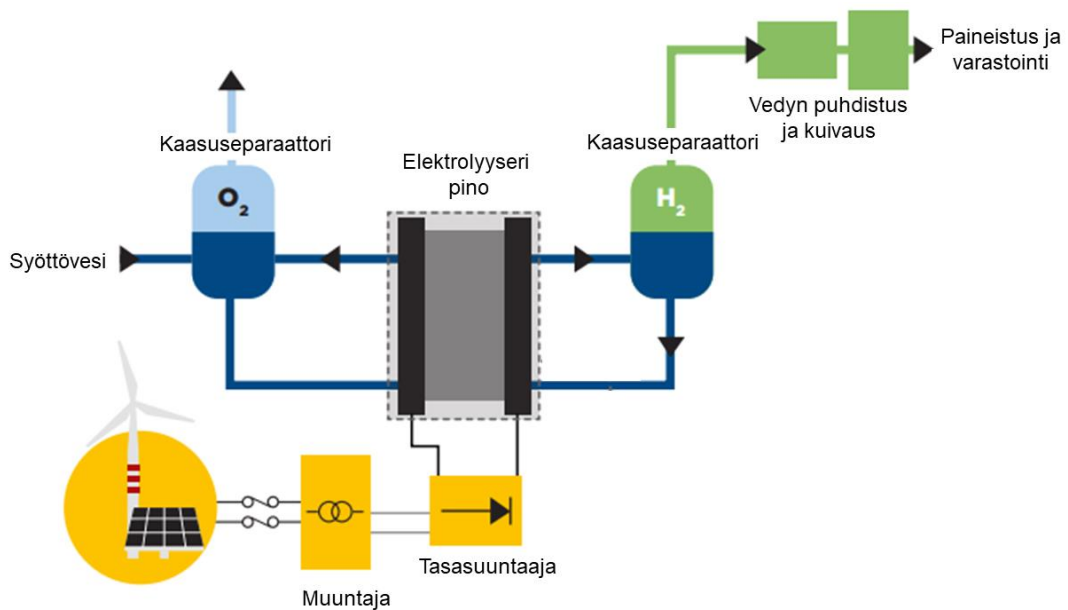
2.1 Vedyn tuotantotavat

Vetyä esiintyy luonnossa kemiallisina yhdisteinä etenkin vedessä ja hiilivedyissä. Vetyä
voidaan tuottaa fossiilisten polttoaineiden sekä uusiutuvan energian avulla useilla erilai-
silla menetelmillä (Ball & Weeda 2015, s. 7). Tuotettu vety jaotellaan sen tuotantopro-
sessissa syntyvien hiilidioksidipäästöjen mukaan joko vihreäksi, turkoosiksi, siniseksi tai
harmaaksi vedyksi. Näistä vain vihreä vety tuotetaan päästöttömästi uusiutuvalla ener-
gialla hyödyntäen veden elektrolyysiä (Vredenburg et al. 2021, s. 2). Vihreään vetyyn
voidaan joissain tilanteissa sisällyttää myös ydinvoimaa hyödyntämällä tuotettu vety, sillä
tuotannossa ei varsinaisesti synny hiilidioksidipäästöjä (Vartiainen 2020). Vähän pääs-
töjä tuottaviksi tuotantotyypeiksi kuitenkin luetaan myös sininen ja turkoosi vety, jotka
tuotetaan fossiilisten polttoaineiden avulla mutta hiilidioksidipäästöt kerätään talteen.

Veden elektrolyysi on prosessi, jossa sähköän avulla vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi.
Elektrolyysin peruseräite on melko yksinkertainen ja se sallii monia erilaisia variaati-
oita elektrolyysilaitteiston suhteen. Elektrolyysikenno koostuu kahdesta elektrodista, ka-
todista ja anodista sekä elektrolyytistä. Elektrolyytinä käytetty aine on keskeinen ero
erilaisten elektrolyyttikennojen välillä, sillä muuten kennojen perusrakenne on yleisesti

samanlainen. Veden elektrolyysi ei ole spontaani reaktio ja vaatii siksi ulkoisen jännitelähteen. Mitä pienemmällä ulkoisella jännitteellä reaktio saadaan aikaan, sitä parempi hyötysuhde elektrolyysikennolle saadaan. (IRENA 2020) Nykypäivänä elektrolyysilaitteistojen hyötysuhteet ovat noin 60–70 % ja loput käytetystä sähköstä menee hukkaan lämpönä (Vartiainen 2020).

Vedyn tuotannossa käytettävä sähkö on merkittävä tekijä, jolla voidaan vaikuttaa prosessin päästöihin ja kannattavuuteen. Hyödyntämällä tuuli-, aurinko-, tai vesivoimalla tuotettua sähköä elektrolyysissä, saadaan tuotettua vähintäänkin lähes päästötöntä vetyä. Elektrolyysillä tuotettu vety on myös hyvin puhdasta verrattuna muilla tavoin tuotettuun vetyyn. (Ball & Weeda 2015, s. 7) Kuvassa 1 on esitelty vihreän vedyn tuotantoprosessi pääpiirteittäin. Vihreän vedyn valmistuksessa elektrolyysikkeno käyttää tasavirtaa, joten useimmiten energialähteestä saatava sähkövirta on tasasuunnattava ennen sen hyödyntämistä. Toisaalta, jos elektrolyysikkeno on yhdistetty suoraan tasavirtaa tuottavaan energialähteeseen, kuten aurinkopaneeleihin, tasasuuntausta ei tarvita.



Kuva 1. Vihreän vedyn tuotanto uusiutuvan energian ja veden elektrolyysin avulla. Kuva mukailtu lähteestä (IRENA 2020).

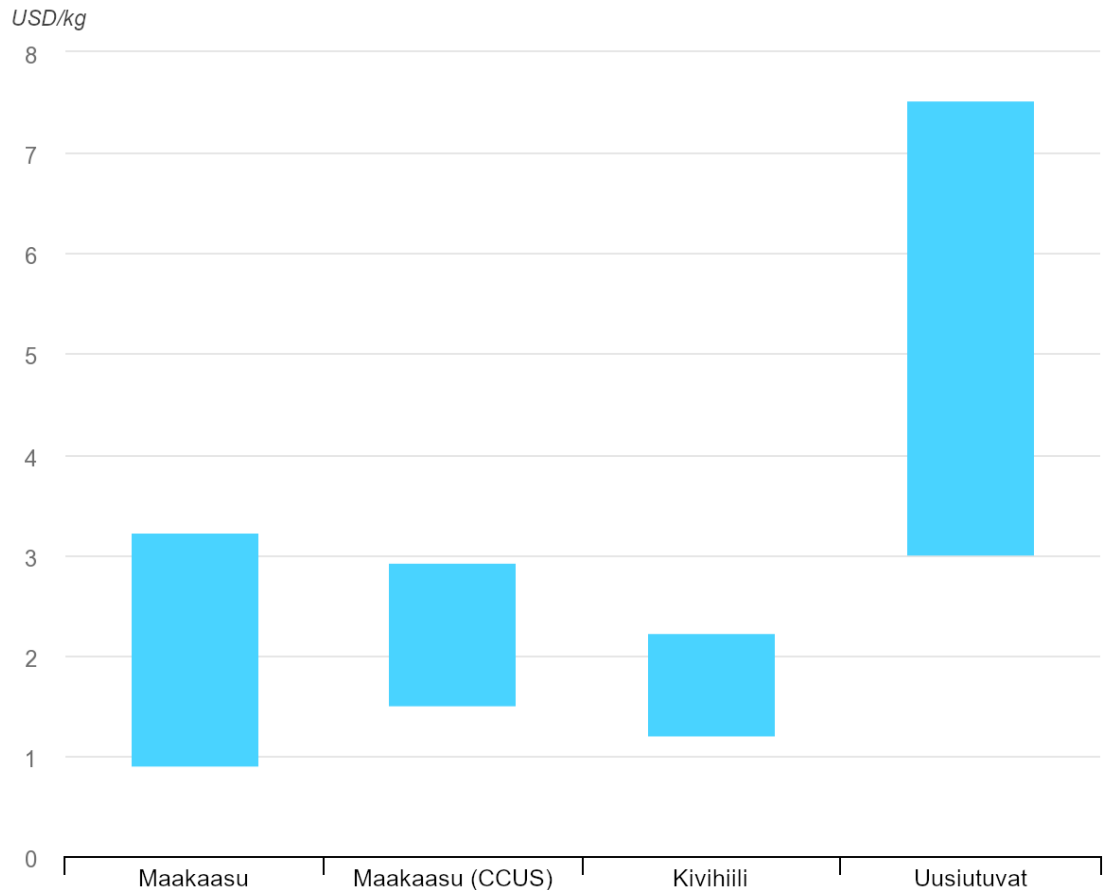
Tällä hetkellä tunnetuin käytetty teknologia on alkalinen elektrolyysikkeno, jossa elektrolyytinä käytetään alkalista liuosta kuten kaliumhydroksidia. Muita yleisesti käytettyjä ja hyvin potentiaalisia teknologioita ovat polymeerielektrolyysi (PEM), missä kennon elektrolyytinä käytetään kiinteää polymeerikalvoa sekä kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC), missä elektrolyytinä on kiinteä keraaminen materiaali. (IRENA 2020, s. 31–32) Vuonna 2021 vain noin 4 % tuotetusta vedystä tuotettiin elektrolyysillä. Tuotetun uusiutuvan energian osuus oli noin 33 %, joten täysin vihreää vetyä tuotettiin vain noin 1 %. (IRENA n.d.)

Loput vedyn tuotantotyypeistä nojaavat vahvasti fossiilisiin polttoaineisiin. Vetyä tuotetaan esimerkiksi maakaasusta, metaanin termisenä hajoamisena. Menetelmää kutsutaan myös metaanin pyrolyysiksi ja sen hiilidioksidipäästöt ovat hyvin vähäiset. Metaani hajotetaan prosessissa alkuaineiksi eli hiileksi ja vedyksi. Reaktiossa ei ole osallisena happea, joten hiilidioksidipäästöjä ei synny, vaan hiili saadaan talteen kiinteänä hiilimustana. (Tiihonen 2021, s. 8–9) Pyrolyysillä tuotettua vetyä kutsutaan turkoosiksi vedyksi (Vartiainen 2020).

Toinen vähän hiilidioksidipäästöjä tuottava, fossiilisia polttoaineita hyödyntävä vedyn tuotantotyyppi hyödyntää hiilidioksidin talteenotto- ja varastointilaitteistoja (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS). Kun tuotantoprosessissa syntyneet hiilidioksidipäästöt kerätään talteen, tuotettua vetyä kutsutaan siniseksi vedyksi. Myös sininen vety tuotetaan pääosin maakaasusta esimerkiksi höyryreformoinnilla. Prosessissa metaanin hiili ja vety otetaan talteen, hiili hapetetaan ja lopputuotteina syntyy vetyä ja hiilidioksidia. (Keipi et al. 2018, s. 3) Sininen vety ei siis ole päästötöntä ja CCUS-laitteistot ovat tois-teiseksi hyvin kalliita (Vredenburg et al. 2021, s. 2).

Ehdottomasti suurin osa tuotetusta vedystä tänä päivänä on niin kutsuttua harmaata vetyä. Harmaa vety tuotetaan fossiilisia polttoaineita hyödyntäen eikä prosessissa syntyviä hiilidioksidipäästöjä oteta talteen. Valtaosa harmaasta vedystä on tuotettu maakaasusta reformoimalla ja tuotannosta syntyy merkittävät hiilidioksidipäästöt. Syy siihen, että ilmaan vapautunutta hiilidioksidia ei oteta talteen, on CCUS-laitteistojen korkea hinta, mikä heikentää vedyn tuotannon kannattavuutta. (Vredenburg et al. 2021, s. 2) Vuonna 2021 noin 96 % tuotetusta vedystä oli tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, tästä noin 47 % oli tuotettu maakaasusta ja loput muilla fossiilisilla polttoaineilla kuten kivihiilellä (IRENA n.d.).

Kuvassa 2 on esitetty vedyn eri tuotantotapojen tuotantokustannus arvioita vuodelta 2018. Vedyn tuottaminen uusiutuvalla energialla maksoi vuonna 2018 noin 3–7,5 USD/kg, kun taas vastaava määrä esimerkiksi maakaasulla tuotettuna maksoi vain noin 0,9–3,2 USD/kg. (IEA 2019)



Kuva 2. Vedyn tuotantotapojen kustannukset. Kuva muokattu lähteestä (IEA 2019).

Vedyn tuotanto elektrolyysin avulla uusiutuvaa energiaa hyödyntäen on yhä kallein tapa tuottaa vetyä. Uusiutuvaa energiaa ei vielä tuoteta riittävästi vedyn tuotannon tarpeisiin tai kannattavuuden näkökulmasta, sillä elektrolyysilaitteistot ovat yhä melko kalliita. (IEA 2019)

2.2 Vedyn varastointi

Vetytalouden toteutumisessa vedyn tehokas ja taloudellinen varastointi sekä kuljetus ovat merkittävässä roolissa. Nykypäivänä vetyä voidaan jo varastoida ja kuljettaa monella erilaisella menetelmällä. Tässä luvussa käsitellään kuitenkin vain tällä hetkellä yleisesti tunnetuimpia ja käytetyimpiä menetelmiä, sillä nämä ovat lähitulevaisuudessa vetytalouden kannalta merkittävimpiä. Vetyä voidaan sovelluskohteen mukaan varastoida paineistettuna kaasuna, tiivistettynä nesteeksi tai kiinteässä muodossa sitoutuneena kemiallisiin yhdisteisiin kuten metallihydrideihin. Vedyn korkea energiatiheys sen massa suhteutettuna tekee siitä erittäin potentiaalisen vaihtoehdon energian varastointiin verrattuna muihin vastaaviin polttoaineisiin. Vedyn energiatiheys voi olla jopa 33 kWh/kg,

eli noin 3 kertaa suurempi kuin dieselillä ja 2,5 kertaa suurempi kuin maakaasulla. Teknologioiden haasteet aiheutuvat muun muassa vedyn reaktiivisuudesta, sen paikoin vaatimasta hyvin alhaisesta lämpötilasta sekä hyvin pienestä tiheydestä. Normaalisissa ilmapaineissa 1 kg vetyä vaatii noin 11 m^3 tilan sen pienen tiheyden takia. (Rufer 2018, s. 227)

Vedyn varastointi nestemäisessä muodossa vähentää sen tilavuuden tarvetta verrattuna kaasumaisessa muodossa varastoituun vetyyn, sillä vedyn energiatiheys nestemäisessä muodossa on suurempi kuin kaasuna. Vety kuitenkin vaatii nesteytyäkseen kryogeenisen lämpötilan, sillä vedyn höyrystymislämpötila on $-250 \text{ }^\circ\text{C}$ eli noin $20,3 \text{ K}$ normaalipaineessa. Kryogeenisillä lämpötiloilla tarkoitetaan yleisesti alle 120 K lämpötiloja. Jäähdyttäminen vaatii huomattavan määrän energiaa, arviolta noin 35% vedyn energiasisälöstä. Lisäksi vedyn pitäminen nestemäisessä muodossa vaatii hyvää eristystä vetykiehuman (boil-off) pienentämiseksi. Vetykiehumasta aiheutuvien häviöiden tulisi pysyä ideaalisesti alle $0,4 \%$, jotta pitkäaikaisempi varastointi olisi kannattavaa. Nestemäisen vedyn energiatiheys tilavuusyksikköä kohden (volumetric energy density) on myös pienempi kuin monilla muilla polttoaineilla, esimerkiksi $1,7$ kertaa pienempi kuin maakaasulla. Tämä kasvattaa säiliön vaadittua tilavuutta verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, jotta riittävä energiamäärä varastossa saavutetaan. Nesteytetty vety on kuitenkin hyvin kevyttä eikä se vaadi korkeaa painetta, joten se tarjoaa paljon mahdollisuuksia varastointiin ja kuljetukseen. Jäähdytyksestä johtuvaa energian menetystä sekä vetykiehumasta aiheutuvia häviöitä kompensoi hyvin nestevedyn korkea energiatiheys. (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021)

Paineistettu kaasumainen vety on tällä hetkellä edullisin ja käytetyin vedyn varastointimuoto. Se sopii parhaiten myös moniin vedyn sovelluskohteisiin ja kuormittaa vähiten ympäristöä. (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021) Vety varastoidaan tavallisesti $350\text{--}700 \text{ bar}$ paineessa, sovelluskohteen mukaan. Kaasun paineistaminen tankkiin on yksinkertaisempi prosessi kuin vedyn nesteyttäminen ja vaatii noin $10\text{--}15 \%$ vedyn energiasisälöstä. Toisaalta kaasumaisessa muodossa vedyn energiatiheys jää alhaisemmaksi kuin nestevedyn. (Rufer 2018) Säiliön painetta nostamalla vedyn energiatiheyttä saadaan kuitenkin parannettua tilavuusyksikköä kohden. Säiliön korkea paine aiheuttaa haasteita tankin suunnitteluun, sillä korkeamman paineen kestämiseksi tankin seinämien on oltava paksummat. Tankin suunnittelussa tulee myös huomioida sen materiaali, sillä materiaali on kosketuksissa korkeassa paineessa olevan vedyn kanssa. Vety haurastuttaa materiaaleja tunkeutuessaan sen rakenteisiin, näin käy myös metalleille. Tankin massa vaikuttaa vedyn gravimetrisen energiatihetyteen eli energiaan massayksikköä kohden, joka on tyypillisesti kevyellä vedyllä erittäin hyvä. Edelleen tankin massa voidaan vaikuttaa

valitsemalla kevyitä, mutta kestäviä materiaaleja ja tästä syystä nykypäivänä valmistusmateriaalina käytetäänkin paljon esimerkiksi hiilikuitupohjaisia muoveja ja titaania. Myös tankin muoto vaikuttaa sen kestävyYTEEN ja suurin osa vetytankeista on tämän vuoksi sylinterin mallisia. (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021) Kuten maakaasua, myös vetyä voidaan varastoida myös maanalaisiin luoliin. Tällöin kaasua saadaan varastoitua suurempia määriä kuin maanpäällisiin tankkeihin. Luolan tulee kuitenkin olla hyvin tiivis vedyn pienen molekyylikoon vuoksi, jotta vuotoja ei pääse tapahtumaan. Esimerkiksi suolaluolat ovat luonnostaan hyvin tiiviitä ja pitävät kaasua hyvin sisällään. Lisäksi maaperän suolamuodostumiin voidaan keinoitekoisesti tehdä luolia kaasun varastoimiseksi ja jotkin maakaasun varastointiin ja kuljetukseen käytettävät menetelmät ovat käyttökelpoisia myös kaasumaiselle vedylle. (McPhail et al. 2012)

Metallihydrideillä tarkoitetaan vedyn varastointia metalliyhdisteeseen ja se perustuu vedyn atomien liukenemiseen metallin kidehiltaan. Metallihydridiä voidaan käyttää toistuvasti varastoimaan ja vapauttamaan vetyä muuttamalla paine- ja lämpötilaolosuhteita. Metallihydridin muodostamisessa vapautuu sama määrä lämpöenergiaa kuin sen purkuun vaaditaan. Reaktiot ovat toisilleen käänteisiä ja kumpikin tapahtuu vakiopaineessa, joten hydridin muodostaminen on eksotermisen ja purkaminen on endotermisen reaktio (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021, s. 9). Metallihydridi muodostetaan korkeassa paineessa ja purkaminen tapahtuu matalassa paineessa. Vetyä voidaan varastoida ja purkaa hydridistä toistuvasti, mutta toistojen määrää rajoittaa epäpuhtauksien kertyminen metalliyhdisteeseen. Varastoimalla vetyä metallihydridiin voidaan saavuttaa huomattavasti suurempi tiheys vedylle kuin paineistetulla kaasulla tai nestevedyllä. Käytetyn metallin mukaan vedyn tiheys hydridissä voi vaihdella välillä 90–150 kg/m³. Tulee kuitenkin huomioida, että metallihydrit ovat yleensä hyvin raskaita ja gravimetrinen energiatiheys jää matalaksi, sillä vedyn osuus metallihydridin painosta on lopulta vain noin 2 %. Juuri metallihydritankin painon vuoksi, hydritit eivät ole kannattavia liikkuvissa sovelluskohteissa kuten ajoneuvoissa. Ajomatkat yhden ”tankkauksen” aikana ovat huomattavasti pienempiä etenkin raskaalla metallihydritankilla varustetuissa ajoneuvoissa kuin vastaavissa, jotka hyödyntävät esimerkiksi paineistettua kaasua. Tulevaisuudessa kevyempien metallihydridien kehitys voi kuitenkin tarjota uusia mahdollisuuksia myös hiilineutraaliin liikenteeseen. (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021)

2.3 Vedyn sovelluskohteet

Vedyllä on pitkä historia energian tuotannossa, energian siirrossa sekä teollisuuden prosesseissa ja päästöttömässä liikenteessä, mutta kehitys on monella alalla ollut hyvin hidasta ja ajoittain jopa olematonta. Ilmastonmuutoksen myötä kiinnostus vetyä kohtaan

on kuitenkin taas kasvanut ja vety on monella alalla tarjonnut uusia mahdollisuuksia fossiilisista polttoaineista ja hiilestä irtautumiseen. Kiinnostus vedyn hyödyntämiseen ja vetytalouteen onkin johtanut jo uusiin investointeihin jopa valtiollisella tasolla. Ratkaisevia tekijöitä vetytalouden toteutumisen ja etenkin hiilestä irtautumisen kannalta on päästötömästi tuotetun vedyn haasteet. Vihreä vety on moneen sovelluskohteeseen edelleen liian kallista ja sitä tuotetaan kysyntään nähden liian vähän. Vedyn hyödyntäminen ei siis vielä tarkoita päästöttömyyttä, sillä valtaosa tuotetusta vedystä on fossiilisilla polttoaineilla tuotettua harmaata vetyä. Harmaan vedyn tuotannosta syntyvät päästöt ovat ympäristön kannalta hyvin merkittäviä. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen on kuitenkin jo askel oikeaan suuntaan päästöjen vähentämisen ja hiilineutraaliuden kannalta. Merkittävä kysyntä tuotetulle vedylle on tällä hetkellä teollisuudessa ja etenkin teräksen ja raudan tuotannossa. Lisäksi kemianteollisuudessa, kuten ammoniakkin ja metanolin tuotannossa ja öljyn jalostuksessa hyödynnetään paljon vetyä. Vedyn potentiaalisia sovelluskohteita on myös energian tuotannossa sekä hiilettömässä liikenteessä. (IEA 2019)

2.3.1 Vety teollisuuden sovelluksissa

Vetyä voidaan hyödyntää monilla eri teollisuuden aloilla ja vety nähdään monella alalla potentiaalisena ratkaisuna hiilestä irtautumiseen (decarbonisation). Suurin kysyntä vedylle teollisuudessa muodostuu teräksen tuotannosta, ammoniakkin ja metanolin valmistuksesta, öljyn jalostuksesta sekä sementin tuotannosta.

Raudan ja teräksen tuotannosta syntyy noin 7 % maailmanlaajuisista kasvihuonekaasupäästöistä (Carbon Brief 2020, Our World in Data 2020 mukaan). Vaikka metallien kiertäyksellä on vaikutusta tuotannon aiheuttamiin päästöihin, se ei kuitenkaan määrällisesti eikä laadullisesti riitä korvaamaan uutta tuotantoa. Yksi vaihtoehto teräksen tuotannon hiilestä irtautumiseen on niin kutsuttu sähköinen rikastus ("electrowinning"), missä metalli erotetaan malmista elektrolyysin avulla. Tämä teknologia on kuitenkin vasta testausvaiheessa. Raudan ja teräksen valmistuksessa rautamalmi sulatetaan ja koksien avulla siitä saadaan erotettua puhdasta rautaa ja happea, lopputuotteena syntyy kuitenkin hiilidioksidia. Vetyä voidaan hyödyntää prosessissa polttoaineena koksien sijasta, jolloin prosessin hiilidioksidipäästöt vähenevät noin 20 %. Prosessissa kuitenkin hyödynnetään edelleen kivihiiltä malmin pelkistämiseen. Uudempi menetelmä on raudan suorapelkistys vedyn avulla (direct reduced iron, DRI), missä vetyä hyödynnetään pelkistysaineena eikä malmia tarvitse sulattaa sulatusuunissa. Lopputuotteena ei synny lainkaan hiilidioksidia vaan ainoastaan vettä. Vuonna 2020 noin 7 % teräksestä tuotettiin hyödyntämällä DRI-menetelmää. Tämän myötä teräksen tuotanto oli neljänneksi suurin tuotetun vedyn kuluttaja. Teräksen tuotannossa on siis paljon potentiaalia irtautua hiilestä vedyn avulla

mutta toistaiseksi ongelmana on vedyn päästötön tuotanto. Vihreää vetyä ei nykypäivänä tuoteta riittävästi teräksen tuotannon tarpeisiin ja korkean hintansa vuoksi sen hyödyntäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Carbon Briefin tuottaman artikkelin mukaan, päästötön teräs tulee todennäköisesti aina olemaan kalliimpaa kuin fossiililla polttoaineilla tuotettu teräs. Artikkelissa esitetäänkin niin kutsutun ”vihreän teräksen” tarvitsevan valtiollista tukea ja avustusta ollakseen kilpailukykyinen ja kannattava vaihtoehto. (Carbon Brief 2020)

Norjalainen start-up yrityksestä lähtöisin oleva Blastr aikoo perustaa Suomeen vihreää terästä tuottavan tehtaan. Inkooseen perustettavan tehtaan suunnitellaan tuottavan noin 2,5 miljoonaa tonnia vihreää terästä vuodessa. Terästehtaan yhteyteen suunnitellaan myös vihreän vedyn tuotantolaitos. Inkoon tehtaalla teräksen valmistuksessa on tarkoitus korvata kooksi ja kivihiili vedyllä ja vähentää näin 95 % teräksen tuotannon päästöistä. Hanke on yksi suurimmista Suomeen suunnitelluista teollisuusinvestoinneista ja erityisen merkittävä Suomen vihreän siirtymän kannalta. Hanke on ollut jo ensimmäisellä rahoituskierröksellä ja tuotannon on suunniteltu alkavan jo vuonna 2026. (Hemgård 2023)

Myös sementintuotanto voisi hyötyä vedystä, sillä tuotannon kemialliset prosessit vaativat korkeita lämpötiloja, jotka nykypäivänä saavutetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita. Sementin tuotannosta syntyy noin 3 % globaaleista ilmastopäästöistä ja näitä päästöjä voitaisiin vähentää polttamalla vetyä fossiilisten polttoaineiden sijasta. Kemiallisista prosesseista syntyvät päästöt vastaavat noin kolmasosaa koko tuotannon päästöistä, kun ei huomioida vaaditun energian tuotannon päästöjä. Haasteena sementintuotannon hiilestä irtautumiseen vedyn avulla on kuitenkin se, että vedyn käyttäminen polttoaineena vaatisi täysin uuden tuotantoinfrastruktuurin rakentamisen. (Carbon Brief 2020)

Kemianteollisuudessa vety on tärkeä raaka-aine, erityisesti ammoniakin sekä metanolin tuotannossa. Ammoniakkia käytetään laajasti lannoitteiden valmistukseen ja metanolia puolestaan esimerkiksi liuottimissa. Näiden kemikaalien kysynnän odotetaan kasvavan tulevaisuudessa ja niiden hyödyntämistä myös vedyn varastointi- ja kuljetusmuotona on pohdittu, sillä esimerkiksi ammoniakki on kuljetuksessa käyttökelpoisempaa kuin vety.

Öljyn jalostuksessa vedyllä on myös tärkeä rooli. Vetyä voidaan hyödyntää prosessissa poistamaan rikkiä ja muita epäpuhtauksia. Vaikka öljyn käyttö tulevaisuudessa todennäköisesti vähenee, polttoaineiden rikkipitoisuusrajoitusten tiukentuessa vedyn kysyntä öljyn jalostuksessa saattaa jopa kasvaa. (Carbon Brief 2020)

2.3.2 Vety energian tuotannossa

Vedyn monipuolisuus tarjoaa potentiaalisia hyödyntämismahdollisuuksia myös energiantuotannon kehittymisessä. Näistä tunnetuimpia on muun muassa vedyn hyödyntäminen energiantuotannon ja -kulutuksen tasaajana sekä maakaasun korvaaminen kaasuturbiineissa sähköntuotannossa.

Uusiutuvien energiantuotantomuotojen, kuten aurinko- ja tuulivoiman, käyttö yleistyy ja kehittyä jatkuvasti. Etenkin aurinko- ja tuulivoimalla tuotettu energia on kuitenkin vahvasti riippuvaista muun muassa sääoloista, eikä tuotanto tällöin ole tasaista kuten esimerkiksi ydinvoimalla. Tämä johtaa siihen, että tuotanto ja kysyntä eivät vastaa aina toisiaan ja syntyy niin kutsuttua ”hukkaenergiaa” tai energiaa joudutaan tuottamaan vastaamaan kysyntää muilla keinoin. Yhdeksi ratkaisuksi on kaavailtu vedyn hyödyntämistä tuotannon vaihteluiden tasaajana. Erityisen aurinkoisina tai tuulisina aikoina, kun tuotanto ylittää kysynnän, ylimääräinen tuotanto voitaisiin varastoida vedyn muodossa. (Carbon Brief 2020) Käytännössä tämä toteutettaisiin siis veden elektrolyysin avulla. Tuotettu vety voitaisiin hyödyntää myöhemmin teollisuudessa, polttoaineena tai muuttaa polttokennon avulla takaisin sähköenergiaksi. (IRENA 2019, s. 9) Lyhytaikaisessa energian varastoinnissa akut toimivat yleensä vetyä tehokkaammin niiden erittäin hyvän hyötysuhteen ansiosta. Akkujen käyttökelpoisuus energiavarastona kuitenkin heikkenee, kun energiaa tulisi varastoida pidempiä aikoja tai varastoitavan energian määrä on hyvin suuri. Akkujen itsepurkautumisen vuoksi energian varastointi akkuun viikoiksi kerrallaan ei ole kannattavaa. Lisäksi akuston olisi oltava huomattavan suuri, jotta siihen saataisiin varastoitua suuri määrä energiaa, kun taas vastaava määrä energiaa olisi huomattavasti helpompi varastoida vedyn muodossa. (Carbon Brief 2020)

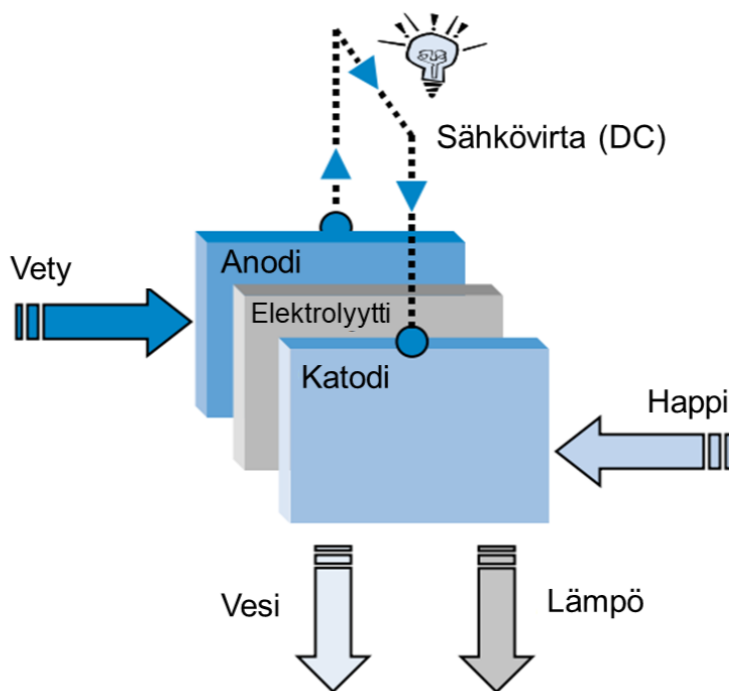
Käsiteltäessä nimenomaan suuremman kokoluokan energiantuotantoa vedyn potentiaali näkyy kaasuturbiinien käytössä maakaasun korvaajana. Vetyä voidaan sekoittaa maakaasun kanssa perinteisissä kaasuturbiineissa, jolloin tuotannon päästöjä saadaan vähennettyä. Maakaasuturbiinien sijasta tulevaisuudessa voitaisiin hyödyntää täysin vedyllä toimivia kaasuturbiineja, jolloin tuotannosta ei syntyisi lainkaan hiilidioksidipäästöjä. (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021) Pienemmissä tai hajautetun tuotannon sovelluksissa sähköntuotantoon voidaan myös hyödyntää vetypolttookennoja, joita käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.3.

Carbon Briefin artikkelissa kuitenkin kerrotaan, ettei energiasektori todennäköisesti ole vedyn ensisijainen sovelluskohde. Esimerkiksi elektrolyysilaitteistojen kallis hinta vaikuttaa alan kehitykseen merkittävästi, sillä toistaiseksi on kannattavampaa hyödyntää uusiutuvaa energiaa muualla kuin vihreän vedyn tuotannossa. Lisäksi ”ylimääräisen” energian hyödyntäminen vaatisi vielä paljon infrastruktuuria esimerkiksi tuotantolaitosten ja

vedyn varastoinnin myötä. (Carbon Brief 2020) Toisaalta elektrolyysin hyödyntäminen uusiutuvan energian varastoinnissa voisi saada elektrolyysilaitteistojen korkeat hinnat laskemaan ja tehdä vedyn tuotannosta taloudellisesti kannattavampaa (IRENA 2019).

2.3.3 Vedyn integrointi polttokennoissa

Niin yksittäiset kuin teollisuuden suuremmatkin kuluttajat voivat tavoitella päästöttömyyttä ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämistä vedyn avulla. Vetytalouden kehityksen myötä vedystä voivat hyötyä niin rahtiliikenne kuin yksityisautoilukin sekä monet energiasektorin ja teollisuuden prosessit. Moniin sovelluskohteisiin sopii vedyn hyödyntäminen polttokennossa. Vetyä polttoaineena käyttävät polttokennot ovat monikäyttöisiä ja päästöttömiä. Polttokennon tyypillinen rakenne on hyvin samankaltainen kuin elektrolyysikennon ja prosessi on käänteinen veden elektrolyysi. Prosessi on esitettyä kuvassa 3. Polttokenno koostuu kahdesta elektrodista ja elektrolyytistä. Anodille syötetään vetyä ja katodille happea. Katalyytin ansiosta vedyn atomit hajoavat anodilla protoneiksi ja elektroneiksi. Anodilta protonit siirtyvät katodille elektrolyytin läpi ja elektronit suljetun, ulkoisen virtapiiriin kautta tuottaen piiriin sähkövirran. Polttokennossa tapahtuvan sähkökemiallisen reaktion seurauksena vapautuu lämpöä ja lopputuotteena syntyy vettä ja sähköenergiaa. (OECD 2005)



Kuva 3. Polttokennon tyypillinen rakenne ja toimintaperiaate. Kuva mukailtu lähteestä (OECD 2005).

Polttokennoja on useita erilaisia, keskeisenä erona niissä on käytetyt elektrolyytit. Toimintaperiaate ja rakenne kaikilla on kuitenkin yleisesti sama. Polttokennoja voidaan kytkeä sarjaan, jotta saavutetaan sovelluskohteen vaatima jännite. Vetytalouden kannalta keskeisimmät polttokennotyypit ovat kiinteäoksidipolttokennot (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) ja kiinteäpolymeeripolttokennot (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEM). SOFCilla on korkeampi hyötysuhde kuin PEM-kennoilla. SOFCilla hyötysuhde energian muuntamiselle on tyypillisesti 60 % (Bhat, 2018) kun taas PEM-kennolle vastaava hyötysuhde on tyypillisesti korkeintaan 50–60 %. Polttokennojen hyötysuhdetta heikentää muun muassa reaktiossa syntyvä lämpö. Hyödyntämällä myös syntynyt lämpö, polttokennon hyötysuhdetta saadaan parannettua. Yhdistetyssä järjestelmässä teoreettinen maksimihyötysuhde SOFCille voi olla jopa yli 80 % ja PEM kennolle alle 70 %.

SOFCit eivät kuitenkaan sovellu kaikkiin käyttökohteisiin niiden korkean käyttölämpötilan vuoksi. Ne toimivat 800°C – 1000°C lämpötiloissa toisin kuin PEM-kennot, joille vastaava on vain 40°C – 80°C. Kiinteissä sovelluskohteissa lämpötila ei kuitenkaan ole niin suuri ongelma ja toisaalta syntynyt lämpö voidaan myös käyttää hyödyksi. (Tashie-Lewis & Nnabuife 2021) Polttokennoja voidaan myös käyttää vain osittaisella kuormalla täyden kuormituksen sijaa, jolloin niiden hyötysuhde voi olla jopa parempi. Tämän ansiosta polttokennot sopivat erityisen hyvin joustaviin sovelluskohteisiin kuten sähköverkon tasapainottamiseen ja taajuuden vaihteluiden tasaamiseen. (IEA 2019)

Alhaisemman toimintalämpötilansa ansiosta PEM-kennot sopivat niin kiinteisiin kuin liikenteenkin sovelluksiin. SOFC-kennojen korkea toimintalämpötila tekee niistä kalliita ja epäsouvia liikenteen käyttöön. PEM-kennot nähdäänkin sopivimpana vaihtoehtona vetyautoihin. (OECD 2005) Vetyautot kilpailevat ladattavien sähköautojen kanssa päästötömän liikenteen kehityksessä. Vetyautoissa onkin monia samoja etuja kuin sähköautoissa kuten lyhyet käynnistysajat ja hiljaisuus. Sähköautoihin verrattuna vetyautoilla on kuitenkin vielä paljon tarvetta kehittyä, jotta ne pärjäisivät markkinoilla. Akkukäyttöisillä sähköautoilla energian muunnoksen hyötysuhde on parhaimmillaan yli 90 %, kun taas polttokennojen hyötysuhteet ovat noin 50–60 %, jolloin polttokennoauton hyötysuhde jää vielä tätäkin alhaisemmaksi. Hyötysuhde on kuitenkin vetyautoilla edelleen parempi kuin perinteisillä polttomoottori autoilla. Merkittävänä tekijänä vetyautojen yleistymisen hitaassa kehityksessä on myös puuttuva infrastruktuuri. Vetyautot tarvitsisivat laajan tankkausverkoston yleistykseen yksityisautoilussa ja tämän puuttuessa, vetyauton ostaminen yksityiskäyttöön ei ole kovin kannattavaa. Muun muassa tästä syystä vetyautojen oletetaan yleistyvän ensin raskaamman liikenteen kuten kuljetusalan ja bussien käytössä. Polttokennoautoilla onkin tässä etulyöntiasema sähköautoihin verrattuna, sillä polttokennot toimivat raskaassa liikenteessä paremmin kuin monet akut. Lisäksi vetyauto

saadaan ”tankattua” vain muutamissa minuuteissa, kun taas sähköauton lataus vie huomattavasti pidempään. (Ball & Weeda 2015)

Polttokennojen toinen merkittävä käyttökohde on uusiutuvan energian yhteydessä. Polttokennojen avulla voidaan hyödyntää Power-to-Power-tekniologiaa (P2P), missä sähköenergia varastoidaan vedyn kemialliseksi energiaksi ja muutetaan edelleen polttokennon avulla takaisin sähköenergiaksi. Elektrolyysin ja polttokennojen avulla etenkin sääriippuvaisen energian tuotannon niin kutsuttu hukkaenergia saadaan hyödynnettyä silloin, kun energiantuotanto on vähäistä. SOFCit ovat tällaisiin sovelluskohteisiin erittäin sopivia, sillä niiden hyötysuhde on parempi eikä polttokennon tuottama lämpö ole ongelma. (IRENA 2018; IRENA 2019)

Polttokennoja voidaan myös hyödyntää varavirtalähteinä kohteissa, jotka vaativat sähkövirtaa myös sähkökatkojen aikana, kuten sairaalat. Nykypäivänä monissa tällaisissa kohteissa varavirtalähteenä on dieselillä toimiva generaattori. Polttokennot voisivat kuitenkin korvata nämä, sillä polttokennot vaativat vähemmän huoltoa, ovat hiljaisia eivätkä tuota päästöjä. (IRENA 2018) Polttokennot sopivat varavirtalähteiksi hyvin myös tietoliikenteen käyttöön, esimerkiksi teletorneihin ja datakeskuksiin. Dieselillä toimiviin generaattoreihin verrattuna polttokennot tarjoavat näissäkin sovelluskohteissa huomattavia etuja. Esimerkiksi teletornien varavirtalähteinä polttokennot ovat erityisen hyviä, sillä ne toimivat dieselgeneraattoreita paremmin erilaisissa lämpöolosuhteissa, jopa -40°C – 50°C lämpötiloissa. (IEA 2019)

2.4 Power-to-X

Power-to-X-tekniologialla (P2X) tarkoitetaan sähkönenergian muuttamista toiseen muotoon kuten esimerkiksi polttoaineeksi tai kaasuksi. P2X-tekniologian avulla pyritään vähentämään esimerkiksi liikenteen ja muiden vaikeasti sähköistettävien tai hiilestä riippuvaisen alojen ilmastopäästöjä, etenkin hiilidioksidipäästöjä. P2X-tekniologiassa keskeistä onkin uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen sähköntuotannossa. Tekniologiaa voidaan hyödyntää myös sähköenergian varastoinnissa. Sääriippuvaisen uusiutuvien energiamuotojen kuten tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto ei aina vastaa senhetkistä kysyntää, joten Power-to-X-tekniologian avulla ”ylimääräinen” sähkö saadaan varastoitua ja edelleen hyötykäyttöön. (Burre et al. 2020) Tekniologiaa voidaan myös soveltaa synteettisten polttoaineiden valmistukseen, jotka voivat korvata perinteisiä fossiilisia polttoaineita. Kun valmistusprosessissa käytetään uusiutuvaa energiaa, siitä saadaan päästötöntä ja voidaan edesauttaa esimerkiksi liikenteen hiilestä irtautumista. (LUT 2022)

Uusiutuvan energiantuotannon yleistymisen kannalta P2X-tekniologia on ratkaisevassa asemassa. Teknologian avulla uusiutuvien energiamuotojen taloudellinen ja ympäristöllinen potentiaali saadaan hyödynnettyä, kun energia saadaan hyödynnettyä kokonaisuudessaan tuotannon ja kysynnän vaihteluista huolimatta. (Burre et al. 2020) Tuotettua sähköenergiaa voidaan varastoida akkuihin, mutta kuten aiemmin on todettu (katso luku 2.3.2), akut eivät sovellu hyvin pitkäaikaiseen energian varastointiin tai suuriin energiamääriin. Tähän tarkoitukseen P2X-tekniologia soveltuu hyvin, sillä energiaa voidaan varastoida muotoon, jossa sitä on kannattavampi varastoida pitkäaikaisesti. Yksi vaihtoehto on Power-to-Hydrogen eli P2H₂, missä (uusiutuvalla) energialla tuotettu sähköenergia varastoidaan vedyn kemialliseksi energiaksi. Monissa maissa energian kulutus ja uusiutuvan energian tuotanto vaihtelevat vuodenajan mukaan suuresti, joten energiaa tulisi saada varastoitua kuukausiksi kerrallaan. Esimerkiksi pohjoisessa energiaa tarvitaan muun muassa lämmittämiseen talvisin huomattavasti enemmän, mutta samalla aurinkovoimalla tuotetun energian määrä vähenee reilusti. (IRENA 2019) Tällaiseen käyttöön akut eivät yleensä ole edullinen ratkaisu mutta toimivalla varastointimenetelmällä vety voisi toimia ratkaisuna tähän ongelmaan.

Energian varastoimisella vedyn muodossa on monia etuja, vetyä voidaan hyödyntää sellaisenaan monissa sovelluskohteissa, sen avulla voidaan valmistaa muita hiilineutraaleja polttoaineita tai se voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi polttokennon avulla. Uusiutuvan energian avulla tuotettu vety, eli vihreä vety, on lisäksi erittäin puhdasta, joten se on erityisen monikäyttöistä. (IRENA 2019; Burre et al. 2020) Energian muuttaminen vedyksi voisi tukea myös hajautettua energiantuotantoa, kun energia voidaan kuljettaa vedyn muodossa alueille, joissa sähköä ei saada verkosta.

Vetypolttokenno on myös sopiva sähköverkon tasauskäyttöön taajuuden vaihteluissa, sillä monien polttokennojen käynnistysajat ovat hyvin lyhyitä ja ne toimivat joustavasti osittaisellakin kuormalla. Vetytalouden kannalta P2H₂-tekniologian kehittyminen on merkittävässä roolissa, sillä sen avulla vihreän vedyn tuotanto ja käyttö yleistyvät ja voisivat alkaa syrjäyttää harmaata vetyä esimerkiksi teollisuuden prosesseissa. Sähköenergian varastoinnilla vedyn kemialliseksi energiaksi saadaan myös tehostettua uusiutuvan energian varastointia ja edelleen tehtyä uusiutuvista energiamuodoista taloudellisempia ja kannattavampia. Tekniologia on kuitenkin nykypäivänä vielä uutta ja sen kehitys on vasta alussa. Osin tästäkin syystä se on vielä liian kallista eikä uusiutuvan energian tuotantoa ole tarpeeksi kompensoimaan kallista tekniologiaa. (IRENA 2019)

3. VETYTALOUS JA SEN TULEVAISUUS

Maailmalla ollaan kasvavissa määrin huolissaan maapallon tilasta ja pyritään kehittämään ratkaisuja ilmastonmuutoksen hillitsemiseen. Päästövähennystavoitteet ovat saaneet monet kiinnostumaan jälleen myös vedyn tarjoamista teknologioista ja näitä onkin viime vuosina kehitetty entistä tavoitteellisemmin. Monet maat ympäri maailmaa ovat julkaisseet strategioita vetytalouden edistämiseksi ja tehneet investointeja vetyteknologioiden tueksi. (Carbon Brief 2020)

Tässä luvussa tarkastellaan vetytalouden nykytilaa ja tulevaisuuden näkymiä niin Suomessa, EU:ssa kuin muuallakin maailmassa. Vetytalous voi toteutua monella eri tavalla ja erilaisissa mittakaavoissa muiden hiilineutraalien teknologioiden kanssa. Tämä luku käsittelee erilaisia skenaarioita vetytaloudesta hiilineutraalin tulevaisuuden mahdollistajana.

3.1 Vetytalous

Vetytalouden konseptin esitteli ensimmäisen kerran John Bockris 1970-luvun alussa. Alkuperäisen konseptin ideana oli vedyn tuottaminen veden elektrolyysin avulla, jakelu putkistoissa tehtaisiin, koteihin ja tankkausasemille, missä vety muutettaisiin edelleen esimerkiksi sähköenergiaksi polttokennojen avulla. (Beswick et al. 2021) Vetytalouden perusajatus on edelleen nykypäivänä hyvin samankaltainen. Nykyään vetystrategioissa korostetaan kuitenkin enemmän päästötöntä ja hiilineutraalia tulevaisuutta sekä ilmastonmuutoksen torjumista. Vetytaloudella tarkoitetaan vihreään vetyyn pohjautuvan teknologian hyödyntämistä kasvavan puhtaan energian tarpeeseen sekä fossiilisten polttoaineiden korvaamista päästöttömillä vaihtoehdoilla. (VTT n.d.)

Kuten tässäkin työssä huomataan, vedyn monipuolisuuden ansiosta sen hyödyntämismahdollisuuksia on lähes kaikkialla. IEAn vuonna 2019 julkaisemassa raportissa kerrotaan, kuinka vedyn monet hyödyt saavat helposti kuvittelemaan hiilineutraalia tulevaisuutta kaikenkattavan vetytalouden ansiosta. Raportissa kuitenkin huomautetaan, että lista vedyn ongelmista on yhtä pitkä kuin lista sen eduista. (IEA 2019) Vetytalouden ainoan mahdollisen toteutumismuodon ei kuitenkaan tarvitse olla kaikenkattava vetytalous. Nykypäivänä on paljon muitakin teknologioita, joiden avulla voidaan saavuttaa esimerkiksi päästöttömyys. Näistä merkittävämpänä on eri alojen sähköistyminen. (Carbon Brief 2020) Vety on tärkeässä roolissa uusiutuvien energiamuotojen yleistymisessä ja

päästöttömän energiantuotannon mahdollistamisessa. Lisäksi vedyllä on suurta potentiaalia aloilla, jotka olisi esimerkiksi vaikea sähköistää tai muuten irrottaa hiilestä. Vety nähdäänkin potentiaalisena osana ja mahdollistajana päästöttömässä ja hiilineutraalissa tulevaisuudessa. (Beswick et al. 2021)

Vedylle on nykypäivänä paljon kysyntää ja kehitteillä on useita teknologioita eri aloilla vedyn hyödyntämiseen. Vetytalouden kannalta vihreän vedyn tuotanto ja hyödyntäminen on kuitenkin liian vähäistä ja valtaosa käytetystä vedystä on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, ilman hiilen talteenottoa. Kiinnostus vihreää vetyä kohtaan on kuitenkin ollut viime vuosien ajan kasvussa ja monet maat ovatkin julkaisseet tai kertoneet suunnittelevansa vetystrategian tavoitellessaan hiilineutraaliutta. Yksi merkittävimmistä vetystrategioista tähän mennessä on Euroopan komission vuonna 2020 julkaisema strategia, minkä avulla pyritään saavuttamaan EU:n tavoitteet päästöjen vähentämisessä. On siis selvää, että vetyteknologiaa tarvitaan hiilineutraalin tulevaisuuden saavuttamiseen. Epäselvää tosin on vielä se, millaisen roolin vety tulee tulevaisuudessa ottamaan erilaisilla osa-alueilla. (Carbon Brief 2020)

3.2 Euroopan Unionin vetystrategia

Euroopan Unioni hyväksyi tämänhetkisen vetystrategiansa heinäkuussa 2020. Strategiaa on sittemmin tarkennettu, mutta keskeisimpiä prioriteetteja ovat investoinnin sekä tuotannon ja kysynnän tukeminen, markkinasäännöstön ja vetyinfrastruktuurin luominen, tutkimusyhteistyö sekä kansainvälinen yhteistyö. Vuonna 2020 julkaistussa strategiassa määritetään tavoitteita ja skenaarioita vuoteen 2050 saakka. Strategiassa on määritetty välitavoitteita vuosille 2024 ja 2030 muun muassa elektrolyyssikapasiteetin ja vedyn tuotannon suhteen. Vuonna 2022 vedyn tuotanto vastasi vain noin 2 % Euroopan energian kulutuksesta ja noin 96 % tuotetusta vedystä tuotettiin fossiilisilla polttoaineilla. (European Commission n. d.) Vuosittain vedyn tuotannosta syntyy EU:ssa noin 70–100 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt. Vetystrategian keskiössä onkin vedyn käytön lisäämisen lisäksi myös vedyn tuotannon muuttaminen hiilineutraaliksi. (Euroopan Komissio 2020) Vuonna 2019 Euroopan komissio julkaisi Euroopan vihreän kehityksen ohjelman ja vetystrategian kehittäminen määriteltiin osaksi sitä. Vihreän kehityksen ohjelma vastaa Euroopassa julistettuun ilmastohätätilaan ja sen virallisena tavoitteena on tehdä Euroopasta ensimmäinen ilmastoneutraali maanosa vuoteen 2050 mennessä. Tällä hetkellä tavoitteena on ilmastopäästöjen vähentäminen 55 %:lla vuoteen 2030 mennessä, ja muun muassa tähän tavoitteeseen pyritään vastaamaan vetystrategian avulla. (European Commission 2021)

Yksi vetystrategian tärkeimmistä toimista on investointiohjelman luominen. Se tapahtuu vuonna 2020 perustetun eurooppalaisen puhtaan vedyn allianssin (European Clean Hydrogen Alliance) avulla. Eurooppalainen puhtaan vedyn allianssi on liittouma, jonka keskeisin tavoite on kehittää selkeä ja toteutuskelpoinen investointihankkeiden jatkumo ja sillä on tärkeä asema EU:n vetystrategian mahdollistamisessa. Allianssi kokoaa yhteen uusiutuvan ja vähähiilisen vedyn tuotantoon sekä kysyntään, kuljetukseen ja jakeluun liittyvät investoinnit, mutta ei siis itse rahoita hankkeita, vaan kerää investointeja erilaisilta sidosryhmiltä. (European Commission 2021)

Strategian mukaan uusiutuvan sekä vähähiilisen vedyn tuotannon ja kysynnän lisääminen toteutetaan erilaisilla tukitoimilla ja kannustimilla niin loppusijoituskohteissa kuin tuotannossakin. Vetystrategiassa määritellään myös valtioiden rajat ylittävän vetyinfrastruktuurin luomista vedyn jakelun, kuljetuksen sekä markkinoiden käyttöön. Strategialla edistetään myös oikeudenmukaisten ja vapaiden vetymarkkinoiden sekä kaupankäynnin sääntöjä. Tavoitteena on saada vetymarkkinat asiakkaille luotettaviksi ja maksukykyisiksi, sillä epävarma markkinatilanne ei houkuttele investointeja (Euroopan Komissio 2020)

Vetyyn liittyvää tutkimusta on tuettu EU:ssa jo ennen vetystrategian julkaisua, mutta strategiassa määritellään selkeämmät toimet tutkimuksen ja investoinnin tueksi. Strategiassa esiteltiin esimerkiksi 100 MW elektrolyysilaitteistoa koskevan ehdotuspyynnön toteutuminen vuoden 2020 aikana. Strategiassa korostetaan myös innovaatioiden kestävyysvaatimusten toteutumista, sillä vetystrategialla pyritään myös välttämään kaikki vedyn mahdolliset haittavaikutukset. (Euroopan Komissio 2020)

Kansainvälisesti EU:n tavoitteena on vahvistaa johtoasemaansa vetyteknologioiden osalta sekä lisätä uusiutuvaan sähköön ja vetyyn liittyvää yhteistyötä etenkin energiayhteisön maiden kanssa. Lisäksi strategiassa mainitaan Afrikkaan liittyvä potentiaali uusiutuvan energian ja vedyn tuotannossa. Tavoitteena on luoda uusiutuvan vedyn yhteistyöprosessi Afrikan unionin ja EU:n välille. (Euroopan Komissio 2020)

3.3 Suomen vetystrategia

Suomen ilmastotavoitteet ovat maailman mittakaavassakin hyvin rohkeita ja päästöttömyystavoitekin on kunnianhimoisempi kuin monilla muilla EU mailla. Suomen vetytaloustavoitteet eivät ole tässä suhteessa poikkeus. Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä ja vetytalous on merkittävässä asemassa tämän tavoitteen edistämisessä. (Teknologiateollisuus 2021) Keväällä 2023 kautensa päättävä hallitus ei ehtinyt laatia Suomelle kunnollista vetystrategiaa. Alkuvuodesta 2023 hallitus kuitenkin hyväksyi

valtioneuvoston periaatepäätöksen vetyyn liittyen. Periaatepäätöksen taustalla on linjaus, jonka mukaan ilmasto- ja energiastrategian osana laaditaan Suomelle kansallinen vetystrategia. Päätöksessä valtioneuvosto kuvaa vedylle asetettuja tavoitteita sekä toimia, joilla näitä tavoitteita voidaan edistää. Suomi tavoittelee johtavaa asemaa koko Euroopan vetytaloudessa ja vedystä kaavaillaan merkittävää osaa Suomen viennille. Suomesta vedyn vienti sellaisenaan esimerkiksi Eurooppaan on haastavaa puuttuvien kuljetusyhteyksien vuoksi mutta vedyn muita lopputuotteista kuten vedyn avulla valmistetusta vihreästä teräksestä suunnitellaan vientituotetta. (Valtioneuvosto 2023; Teknologiateollisuus 2021)

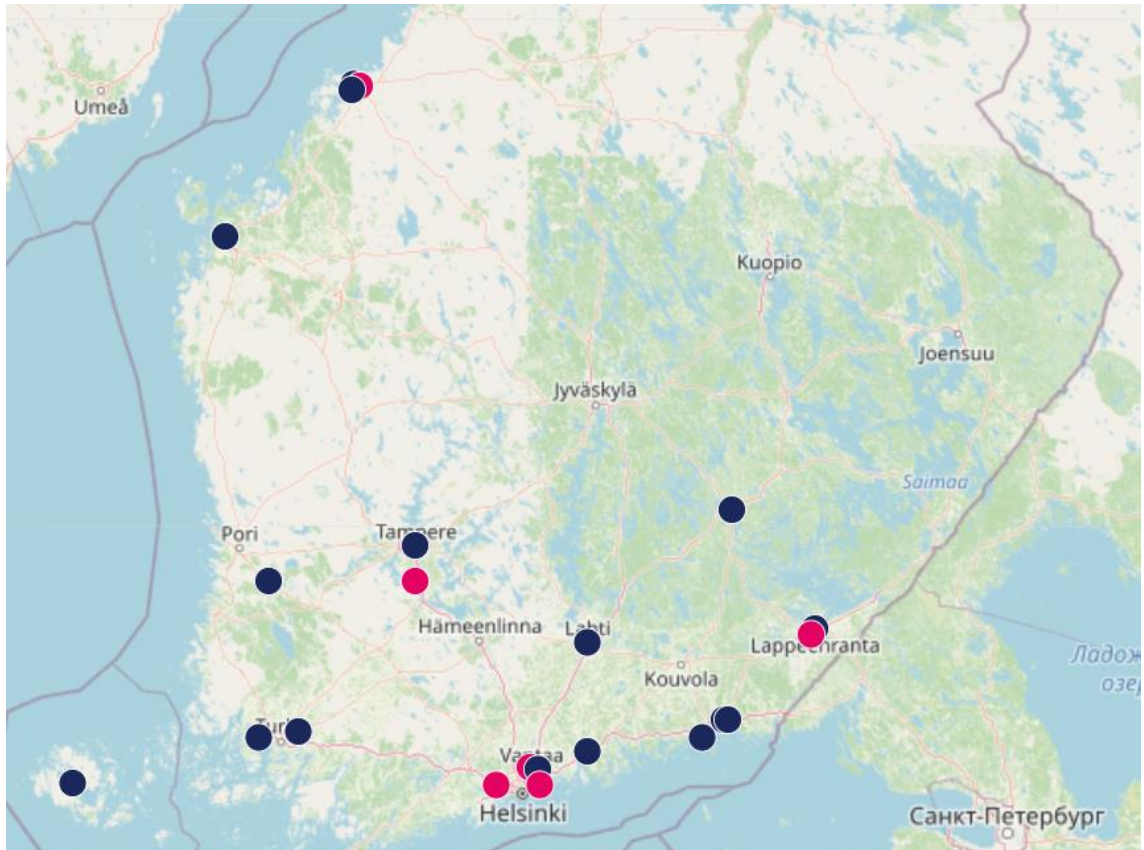
Suomella on erinomaiset edellytykset vetytaloudelle. Suomessa uusiutuvan energian tuotannon osuus energijärjestelmässä on jo suuri ja esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman tuotantokapasiteetti kasvaa jatkuvasti. Päästötön sähköntuotanto sekä toimiva ja luotettava sähköverkko ovat perusedellytyksiä vetytalouden toteutumiselle. Lisäksi Suomen vakaa poliittinen tilanne sekä ennakoitavat lupamenettelyt houkuttelevat yrityksiä ja sijoittajia myös ulkomailta. Samalla Suomen energiapolitiikka on jo pitkään tukenut uusiutuvaa energiaa, vihreää siirtymää sekä vetyteknologioiden kehitystä. Suomessa vetyteknologioiden tuntemus onkin jo hyvää, sillä niitä on tutkittu pitkään niin korkeakouluissa kuin VTT:nkin toimesta. Teknologia on kuitenkin Suomessakin vielä kallista. (Sallinen 2023)

Hallituksen vuonna 2023 hyväksymän periaatepäätöksen mukaan valtioneuvosto arvioi Suomella olevan edellytykset tuottaa jopa kymmenen prosenttia kaikesta EU-alueella tuotetusta päästöttömästä vedystä vuoteen 2030 mennessä (Valtioneuvosto 2023). Tavoite on hyvin kunnianhimoinen ja vaatisi toteutuakseen valtavia investointeja niin elektrolyysilaitteistoihin kuin uusiutuvan energian tuotantoonkin. Tosin, jos tuulivoimantuotanto jatkaa nykyistä kehitystään lähitulevaisuudessa, energiaa voitaisiin tuottaa riittävästi myös vedyn tuotannon tarpeisiin. (Sallinen 2023) Tällä hetkellä Suomessa vetyä valmistetaan vielä vähän ja lähinnä vain teollisuuden, kuten öljynjalostuksen käyttöön. Vuonna 2020 vetyä valmistettiin noin 145 000 tonnia ja suurin osa tästä valmistettiin maa-kaasun höyryreformoinnilla. Vetyä syntyy Suomessa myös teollisuuden prosessien sivutuotteena. Sivutuotteena syntynyt vety saattaa kuitenkin tarvita puhdistamista, mikä lisää sen käytön kustannuksia. Vuonna 2020 elektrolyysin avulla vetyä tuotti kaupallisessa mittakaavassa ainoastaan Woikoski Oy:n tehdas Kokkolassa. (Bröckl et al. 2022)

Valtioneuvosto on laatinut Suomelle viisi vetyskenaariota kuvaamaan kotimaisen teollisuuden, kansainvälisen liikenteen, raskaan tieliikenteen sekä vedyn ja sähköpolttoaineiden viennin mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Vetyskenaarioilla pyritään ennen kaikkea havainnollistamaan Suomen vetytalouden mahdollisuuksia ja rajoitteita. Skenaarioissa

kuvataan päästöttömän vedyn tuotantomäärien sekä tuulivoiman kapasiteetin kehitystä ja niiden vaatimia investointeja. Esimerkiksi päästöttömän vedyn tuotantomäärät vuonna 2030 vaihtelevat skenaarion mukaan välillä 3,7–7,9 TWh. Valtioneuvoston selvityksen mukaan Suomessa tärkeimmät päästöttömän vedyn loppukäyttäjät ovat terästeollisuus sekä öljyn- ja biopolttoaineiden jalostus. Viennin osalta Suomen mahdollisuuksia rajoittaa etenkin kansainvälisen kysynnän kehittyminen ja Suomen asema kansainvälisessä kilpailussa. Kotimaisena rajoittavana tekijänä skenaarioissa huomioitiin erityisesti kotimaisen maatuulivoiman saatavuus. (Bröckl et al. 2022)

Vuonna 2021 Suomen kansallinen vetyklusteri aloitti toimintansa. Vetyklusteriin kuului vuonna 2023 jo yli 60 vetyalan yritystä ja toimialajärjestöä. Vetyklusterin ensisijaisena tavoitteena on laatia oma versionsa kansallisesta vetystrategiasta ja olla mukana edistämässä Suomen päästöttömyystavoitteita. Vetyklusteri pyrkii helpottamaan tiedon jakamista, yhteishankkeita sekä Suomen vetytalouden edistymistä kaupallisesta ja kansainvälisestä näkökulmasta. Vuoden 2030 tavoitteiden saavuttamiseen vetyklusteri esittää listan konkreettisia toimia. Esityksessä mainitaan muun muassa uusiutuvan energian saanti Euroopan kilpailukykyisimpään hintaan, ensiluokkaista vetyteknologiaa ja -osaamista viennin kasvattamiseksi sekä Suomen viennin hiilikädenjäljen, eli viennin ympäristöhyötyjen ja päästövähennysten kasvattaminen moninkertaiseksi nettopäästöihin verrattuna. Vetyklusteri on asettanut väliaikatavoitteensa vuodelle 2025 ja esittää toimia, jotka tulisi tehdä välittömästi tai noin vuoden sisällä. Kuvassa 4 näkyy Suomessa tällä hetkellä suunniteltuja vetyprojekteja, joissa Suomen vetyklusteri on mukana. Karttakuvasse projektit, jotka ovat merkittynä pinkillä ovat demonstraatioprojekteja ja edelleen suunnittelu vaiheessa. Tummemmalla merkityt projektit ovat täyden investoinnin projekteja, joihin on jo tehty investointipäätöksiä. (Hydrogen Cluster Finland 2023)



Kuva 4. Suomessa suunnitella olevat vetyprojektit (*Hydrogen Cluster Finland 2023*).

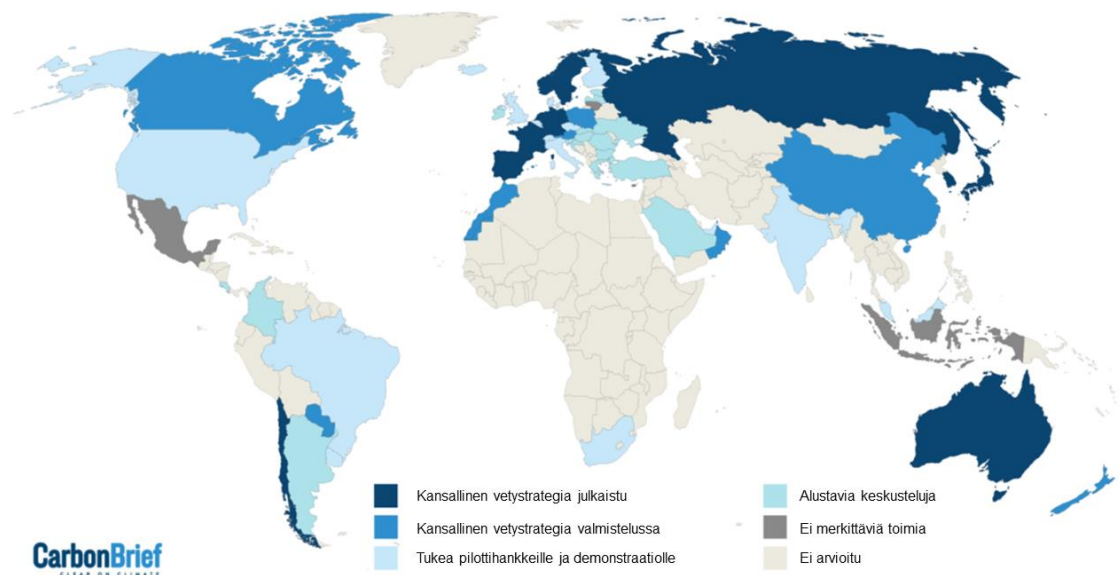
Suomen vetyprojektit keskittyvät lähinnä Etelä-Suomeen eikä pohjoisessa ole suunnitteilla lainkaan vetyyn liittyviä projekteja. Projekteja on myös suunnitella erityisesti rannikkoalueille. Uusiutuvan energian ja etenkin tuulivoiman tuotanto keskittyy Etelä-Suomeen sekä rannikkoalueille, minkä vuoksi myös vetyyn liittyvät projektit keskittyvät näille alueille. Etelä-Suomessa on myös enemmän teollisuutta, joka voisi hyötyä vedystä.

3.4 Maailman vetystrategiat

EU:n ja Suomen lisäksi monet muut maat ovat jo suunnitelleet ja luoneet itselleen tavoitteita vetytalouden suhteen. Maailman mittakaavassa Eurooppa erottuu kuitenkin vetystrategioiden keskittymänä. Tähän vaikuttaa varmasti Euroopan Unionin yhteiset ilmastotavoitteet ja vetystrategia. Eri maiden vetystrategioita muokkaa paljon kansalliset ilmastotavoitteet sekä esimerkiksi maan teollisuuden ja talouden rakenne. Vetytalous alkaa kehittyä monissa strategioissa nimenomaan teollisuuden prosessien kautta, mikä vaikuttaa eri maiden strategioihin. Toistaiseksi kunnianhimoisimmat strategiat ovatkin useimmin maissa, joissa on jo ennestään vedyn hyödyntämiseen soveltuva teollisuus. Myös tieliikenne näkyy monissa vetystrategioissa tulevaisuuden loppukäyttökohteena.

Etenkin Aasian maissa liikenne nähdään potentiaalisena käyttökohteena vedylle. Vihreän vedyn tuotannossakin on paljon eroavaisuuksia maiden välillä johtuen etenkin maiden erilaisista sähkön tuotannon rakenteista. Esimerkiksi Pohjois-Euroopassa vihreän vedyn tuotanto nojaa vahvasti tuulivoimaan, kun taas Etelä-Euroopassa aurinkovoima on huomattavasti suuremmissa roolissa. Eroja maiden välillä on myös suhtautumisessa vähähiiliseen vetyyn. Monissa maissa vähähiilinen vety, kuten sininen vety, nähdään mahdollisuutena ja tärkeänä osana vetystrategian toteutumista, mutta toisaalla tähdätään täysin päästöttömän vihreän vedyn tuotantoon. (Bröckl et al. 2022)

Kuvassa 4 näkyy maailman laajuinen tilanne vetystrategioiden suhteen vuonna 2020. Karttakuvasta voidaan huomata Euroopan olevan maanosana muita edellä vetystrategioiden suhteen. Vuoteen 2023 mennessä tilanne on kuitenkin kuvan tilanteesta kehittynyt ja useat maat ovat julkaisseet kansallisen vetystrategiansa. Eurooppa on silti edelleen vetytalouden ja julkaistujen strategioiden kannalta johtoasemassa.



Kuva 5. Maailman maiden vetystrategioiden vaiheet vuonna 2020. Kuva muokattu lähteestä (Carbon Brief 2020).

Saksa julkaisi kansallisen vetystrategiansa vuonna 2020 ja sen lisäksi Saksassa on julkaistu useampia alueellisia strategioita. Kansallisessa strategiassa määritetään tukea erilaisille vetyhankkeille niin Saksassa kuin kansainvälisissäkin yhteistyöhankkeissa. Strategian mukaan tukea myönnetään kuitenkin vain vihreän vedyn hankkeisiin. Vähähiilistä vetyä on strategian mukaan tarkoitus hyödyntää vain strategian alkuvaiheessa eli niin sanotussa ylimenovaiheessa. Vaikka Saksalla on tavoitteita elektrolyysikapasiteetin kasvattamiseksi, vetystrategia nojaa paljolti vedyn tuontiin. Saksan teollisuuden vedyn kysyntä oletetaan suureksi, joten tuontia tarvitaan sen kattamiseksi. Saksa on vihreän

vedyn tuotantoprojektien määrissä sekä julkisessa rahoituksessa mitattuna johtavassa asemassa, sillä Saksa tukee huomattavasti vihreän vedyn tuotantoa. (Bröckl et al. 2022)

Ranska julkaisi oman vetystrategiansa jo vuonna 2018. Tämän jälkeen strategiaa on muokattu muun muassa COVID-19-pandemian myötä ja osaksi Ranskan elvytysuunnitelmaa. Ranskan strategia koskee niin puhdasta kuin vähähiilistäkin vetyä ja Ranskan energiantuotantorakenteen vuoksi myös ydinvoimaa voidaan hyödyntää elektrolyysin energialähteenä. Ranskan tavoitteena on olla vetyteknologioiden johtava maa ja projektikehitys Ranskassa onkin erittäin vilkasta. Muita Ranskan vetystrategian suurempia painopisteitä ovat teollisuuden hiilestä irtautuminen ja etenkin raskaan liikenteen vetysovellukset. (Bröckl et al. 2022)

Ruotsissa vety sisältyy sähköistymisstrategiaan ja vuonna 2021 Ruotsi julkaisi kansallisen vety- ja sähköpolttoainestrategiansa. Strategiassa arvioidaan vedyn lisäksi sähköpolttoaineiden ja ammoniakkin tuotanto-, varastointi- ja loppukäyttöpotentiaalia useilla eri aikaväleillä. Lisäksi strategiassa arvioidaan vedyn hyödyntämistä energiavarastona etenkin sähköjärjestelmän joustavuuden kannalta. Myös Ruotsin vetystrategia suosii vihreää vetyä. Ensisijaisesti vetyä käytettäisiin kohteissa, joissa muut vaihtoehdot hiilestä irtautumiseen eivät olisi tehokkaita, taloudellisia tai kestäviä. Kuten Suomessakin, Ruotsissa vedyn kysyntä muodostuu pääosin teollisuudesta ja Ruotsin tilanteessa etenkin öljynjalostuksesta. Sähkönsiirtokapasiteetti kuitenkin rajoittaa strategian mukaan vihreän vedyn käyttöä etenkin alkuvaiheessa ja sen vuoksi teollisuudessa joudutaan ainakin aluksi turvautumaan hiilidioksidin talteenottoon. (Bröckl et al. 2022)

Euroopan ulkopuolellakin vetytaloutta on suunniteltu jo useissa maissa. Aasiassa vedyn hyödyntäminen keskittyy Eurooppaa enemmän liikenteeseen ja esimerkiksi Japanissa liikenteen päästöttömyyttä tuetaan voimakkaasti niin sähköautojen kuin vetyautojenkin kannalta. Japani julkaisi ensimmäisen kansallisen vetystrategiansa jo vuonna 2017, ollen näin yksi maailman ensimmäisistä vetystrategian julkaisseista maista. Japani tähtää strategiallaan vety yhteiskunnaksi muodostumista. Myös Kiina tukee voimakkaasti vedyn hyödyntämistä ja etenkin polttokennoteknologiaa. Yhdysvallat puolestaan ei ole asettanut konkreettisia kansallisia tavoitteita, mutta visioita vedyn hyödyntämisestä on ollut jo vuodesta 2002 saakka. Yhdysvalloissa yksittäiset osavaltiot ovat kuitenkin asettaneet itselleen kunnianhimoisia tavoitteita vedyn suhteen ja valtio kannustaa vähähiilisiin vetyhankkeisiin muun muassa veroetujen kautta. Kanada tavoittelee nollanetto päästöjä vuoteen 2050 mennessä ja julkaisi kansallisen vetystrategiansa vuoden 2020 lopulla. Kanadan strategiassa kaavaillaan puhtaan vedyn vientiä etenkin Yhdysvaltoihin, Aasiaan ja Eurooppaan yhteensopivien strategioiden tai maantieteellisen sijainnin takia. (Bröckl et al. 2022)

4. VETYTALouden HAASTEET

Vetytaloudessa on paljon mahdollisuuksia hiilineutraalin tulevaisuuden kannalta, mutta toisaalta lista vedyn käytön rajoitteista on lähes yhtä pitkä kuin lista vedyn hyödyistä. Osa vetyteknologian haasteista ovat samankaltaisia kuin millä tahansa uudella teknologialla, kuten korkeat hinnat tai heikko osaaminen. Vedyn hyödyntämisellä sekä vetytalouden yleistymisellä on kuitenkin myös täysin sille ominaisia rajoitteita. (Carbon Brief 2020) Monenkaan teknologian kohdalla poliittisilla päätöksillä ei ole yhtä vahvaa asemaa kuin vetytalouden kohdalla ja täten vetytalouden toteutuminen onkin vahvasti riippuvainen markkinoiden kehittymisestä sekä siihen vaikuttavista poliittisista ohjaustoimista. (Bröckl et al. 2022)

Tässä luvussa käsitellään vetytaloutta rajoittavia tekijöitä teknisestä sekä taloudellisesta näkökulmasta. Vedyn kohdalla poliittisia näkökulmia ei voida jättää huomioimatta, joten niitäkin sivutaan etenkin taloudellisten haasteiden kautta. Lisäksi tarkastellaan Suomeen liittyviä haasteita. Suomella on monia erityispiirteitä muuhun Eurooppaan verrattuna, ja näiden erityispiirteiden myötä Suomen vetytaloutta rajoittavat tekijät poikkeavat monista muista maista.

4.1 Tekniset haasteet vetytalouden toteutumisessa

Vaikka vetyteknologiaa sekä visioita vedyn laajamittaisesta hyödyntämisestä on kehitetty jo runsaasti, liittyy vedyn hyödyntämiseen yhä oleellisesti vetyteknologioiden tekniset rajoitteet. Vedyn ominaisuudet aiheuttavat jo itsessään merkittäviä haasteita vedyn hyödyntämiseen. Pienen molekyylikokonsa sekä tiheydensä vuoksi vedyn varastointi on hankalaa. Kuten luvussa 2.2 mainittiin, vedyn varastointi vaatii poikkeuksetta huomattavan tilavuuden hyvän energiasisällön saavuttamiseksi. Lisäksi eri varastointimenetelmissä syntyvät häviöt ovat vedyn tapauksessa otettava huomioon. Vety on väritön ja hajuton kaasu, joten vuotoja varastoista on vaikea havaita. Tämä lisää myös varastoinnin sekä kuljettamisen turvallisuusriskejä, sillä vety on erittäin räjähdysherkkää. Yleisesti vedyn hyödyntämisessä tulee ottaa huomioon sen reagoitiherkkyden tuomat turvallisuusriskit. (Carbon Brief 2020)

Vaikka vetyä on käytännössä rajattomasti, sen keräämisen ja jalostamisen haasteet rajoittavat käyttöönoton yleistymistä. Vedyn tuotanto ja muuttaminen hyödynnettävään muotoon vaativat suhteellisen paljon energiaa. Vaikka elektrolyysin ja polttokennojen

hyötysuhteet ovat yksinään kohtuullisen hyviä, prosessin erilaisissa välivaiheissa syntyvät häviöt heikentävät vetyenergian ja vetysovellusten kokonaishyötysuhdetta. (Aguilera 2022) Vain alle 30 % elektrolyysillä tuotetun vedyn tuotantoon käytetystä sähköstä saadaan muutettua takaisin sähköksi elektrolyysissä, kuljetuksessa, varastoinnissa ja polttokennoissa syntyvien häviöiden vuoksi. Toisaalta fossiilisia polttoaineita hyödyntävillä sovelluskohteilla hyötysuhteet ovat samaa suuruusluokkaa, ja esimerkiksi perinteinen polttomoottoriauto pystyy hyödyntämään vain noin 20 % polttoaineen energiasisällöstä. (Carbon Brief 2020)

Vetytalouden toteutumisen haasteena on myös vihreän vedyn tuotanto. Tuotannon tekniset haasteet liittyvät pääosin elektrolyysin heikkoon hyötysuhteeseen, mutta etenkin vetytalouden kannalta haasteet yltyvät tuotantoprosessia pidemmälle. Kuten luvussa 2.1 kerrotaan, lähes kaikki tällä hetkellä tuotettu vety tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla. Täten loppukäyttökohteet eivät voi hyötyä vedyn käytön positiivisista ympäristövaikutuksista ennen kuin vihreää vetyä tuotetaan tarpeeksi kattamaan kysyntää. Vihreän vedyn tuotannon lisääminen vaatisi kuitenkin paljon infrastruktuuria niin tuotantoon kuin jakeluun ja varastointiin. (Carbon Brief 2020) Vedyn hyödyntämisen yleistymistä ja vetytalouden toteutumista rajoittaa osaltaan myös korvaavien teknologioiden kehitys (Aguilera 2022). Vaikka korvaavien hiilineutraalien teknologioiden kehitys ei itsessään eikä esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta ole negatiivinen asia, se kuitenkin heikentää vedyn kannattavuutta. Vety on esimerkiksi akkuja sopivampi vaihtoehto tiettyihin sovelluskohteisiin, mutta jos kiinnostus vetyä kohtaan laskee, sen hyödyntäminen edes näissä käyttökohteissa ei välttämättä ole kannattavaa (Aguilera 2022).

4.2 Taloudelliset haasteet vetytalouden toteutumisessa

Vetytalouden toteutumisessa suurimmat rajoitteet ja haasteet ovat taloudellisia. Teknologia on jo monilta osin pitkälle kehittynyttä ja monet tekniset haasteet on saatu ratkaistua, mutta vedyn hyödyntäminen energiankantajana on edelleen kallista. Elektrolyysilaitteistot ovat yhä kalliita, vaikka niidenkin hinnat ovat kehityksen myötä olleet laskussa viime vuosikymmeninä. Lisäksi monia elektrolyysilaitteistoissa sekä polttokennoissa käytettyjä raaka-aineita louhitaan vain Venäjällä tai Afrikassa. Täten esimerkiksi Euroopassa ollaan riippuvaisia näiden metallien tuonnista ja maailman poliittisten tilanteiden muuttuessa raaka-aineiden hinnat voivat nousta hyvinkin korkeiksi. (Euroopan Komissio 2020)

Kuten luvussa 4.1 todettiin, ilman vihreän vedyn tuotannon lisäämistä, vedyn hyödyt jäävät marginaalisiksi. Tuotantokapasiteetin lisääminen vaatii kuitenkin merkittäviä investointeja niin elektrolyysilaitteistoihin, varastointiin kuin uusiutuvan energiantuotantoonkin. Vuonna 2018 julkaistussa visiossa hiilineutraalista EU:sta ennakoitiin, että vedyn

osuus Euroopan energiarakenteessa tulee kasvamaan nykyisestä noin 2 prosentista 13–14 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä ja tavoite on nostaa Euroopan elektrolyysikapasiteettia niin, että se olisi 40 GW vuoteen 2030 mennessä. Tämän tavoitteen saavuttaminen tulee vaatimaan valtavia investointeja ja arvioidaankin, että vuoteen 2050 mennessä investoinnit vihreään vetyyn voisivat nousta 180–470 miljoonaan euroon Euroopassa. Investointien tarve ei tokikaan rajoitu tuotantoon, vaan vedyn yleistyminen edellyttää myös toimivaa jakeluverkostoa. Nykypäivänä vihreä vety ei vielä ole kustannuskilpailukykyinen vaihtoehto fossiilisilla polttoaineilla tuotetulle vedylle. (Euroopan Komissio 2020)

Vetytalous ei synny ilman poliittista ohjausta, ja vedyn markkinakoko sekä muutosnopeus ovat vahvasti sidoksissa poliittisiin päätöksiin. Vetytalouden kannalta riskinä on myös ohjaustoimien suuntaaminen kestävyyttä pitkällä aikavälillä heikentäviin ratkaisuihin. Esimerkiksi sinisen vedyn ja CCUS-laitteistojen tukeminen on tällä hetkellä taloudellisesti kannattavampaa kuin vihreän vedyn tuotantoon investointi, mutta lopulta se on ilmaston kannalta haitallisempaa. Vetytalouden kehitystä tulisikin ennen kaikkea tarkastella kokonaisvaltaisesti energiasektorin ja loppukäyttökohteiden koko elinkaaripäästöjen kannalta unohtamatta muita vaihtoehtoja päästöjen vähennyksiin, kuten sähköistämistä. (Bröckl et al. 2022)

4.3 Suomen vetytalouden haasteet

Monet aiemmin mainitusta vetytalouden haasteista pätevät myös Suomessa, mutta on tarpeen huomioida myös muutamia Suomen kannalta oleellisia rajoitteita. Suomen maantieteellinen sijainti ja koko luovat haasteita vedyn viennille Eurooppaan, sillä siirtoyhteyksiä ei juurikaan ole. Lisäksi kansainvälinen kilpailu ja kysynnän kehittyminen vaikuttavat Suomen mahdollisuuksiin vedyn viennissä. Vaikka Suomessa onkin paljon potentiaalia lisätä tuulivoimaa, ei ole takuita siitä, että Suomi saisi vetymarkkinoilla tätä potentiaalia vastaavaa markkinaosuutta itselleen. (Bröckl et al. 2022)

EU-lainsäädäntö saattaa vaikeuttaa Suomen vetytalouden tavoitteita, jos siinä ei oteta huomioon Suomen erityispiirteitä. Ydinvoimalla ja biomassalla tuotetun vedyn sekä vähähiilisen vedyn ja maakaasun rajoittaminen siirtymävaiheessa heikentäisivät Suomen asemaa vetymarkkinoilla niin vedyn viennissä sellaisenaan, kuin loppukäyttöt tuotteidenkin viennissä. (Bröckl et al. 2022)

Lisäksi Suomen sähköverkko on osana Nordpool:ia yhdessä Ruotsin ja Norjan kanssa. Kummallakin maalla on runsaasti edullista vesivoimaa, jonka vuoksi Suomen uusiutuvan

energian hinta on usein korkeampia kuin muualla. Tämä heikentää Suomen kilpailuase-
maa vedyn suhteen verrattuna muihin Pohjoismaihin. Suomesta ei myöskään löydy luon-
non muovaamia suolaluolia tai vastaavia vedyn varastointiin sopivia piirteitä toisin kuin
muualta Euroopasta. (Laurikko et al. 2020)

5. YHTEENVETO

Nykypäivänä vetyteknologiat ja vetytalous ovat vahvasti sidoksissa päästövähennystavoitteisiin sekä hiilestä irtautumiseen. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää vetytalouden tulevaisuuden näkymiä sekä mahdollisuuksia, joita vedyn avulla voitaisiin tulevaisuudessa saavuttaa. Vaikka vety on monikäyttöinen ja tarjoaa paljon mahdollisuuksia esimerkiksi hiilestä irtautumiseen, ei vetytalouden toteutuminen ole läheskään ongelmatonta. Tästä syystä työssä käsiteltiin niin yksittäisten vetyteknologioiden kuin vetytalouden ja sille asetettujen tavoitteiden haasteita ja rajoitteita.

Ensimmäinen pullonkaula vetytalouden toteutumisessa ja vedyn avulla ympäristöpäästöjen vähentämisessä tulee vastaan heti vedyn tuotannossa. Vetyä voidaan tuottaa täysin päästöttömästi veden elektrolyysin avulla, mutta vuonna 2021 elektrolyysillä tuotettua vetyä oli vain 4 % ja fossiilisilla polttoaineilla tuotettua vetyä loput 96 %. Koska kaikki elektrolyysissä käytetty sähkö ei kuitenkaan ollut uusiutuvista energialähteistä, vihreää vetyä tuotettiin todellisuudessa vain noin 1 %. Vihreää vetyä ei siis tuoteta läheskään tarpeeksi vetytalouden kannalta ja kapasiteetin lisääminen vaatii valtavia investointeja niin tuotannon, varastoinnin kuin jakelunkin kannalta. Vihreä vety ei myöskään ole kustannuskilpailukykyistä fossiilisiin polttoaineisiin tai harmaaseen vetyyn nähden. Ilman riittävää vihreää vedyn tuotantoa myöskään vedyn loppukäyttökohteet kuten teollisuus eivät pääse irtautumaan hiilestä vedyn avulla.

Kiinnostus vetytaloutta kohtaan on kuitenkin ollut viimeisen vuosikymmenen aikana kasvussa ja monet valtiot ovat valmiita toteuttamaan tavoitteitaan vetyyn liittyen. Tämä näkyy etenkin viime vuosien aikana julkaistuissa ja suunnitelluissa vetystrategioissa. Yksi merkittävimmistä julkaistuista vetystrategioista on EU:n komission julkaisema strategia vuonna 2020. Siinä määritettiin muun muassa tavoitteet vihreän vedyn tuotantokapasiteetin kasvattamiselle niin, että vuoteen 2030 mennessä EU:n elektrolyysikapasiteetti olisi jo 40 GW. Tavoite on melko kunnianhimoinen, sillä vuonna 2020 Euroopan elektrolyysikapasiteetti oli alle 1 GW.

Myöskään Suomen vetyhaaveista ei kunnianhimoa puutu, vaikka varsinaista kansallista vetystrategiaa ei vuonna 2023 ole saatu julkaistua. Hallituksen hyväksymän periaatepäätöksen mukaan Suomen tavoitteena on muun muassa tuottaa jopa 10 % kaikesta EU-alueella tuotetusta päästöttömästä vedystä vuonna 2030. Ainoa haaste kyseisen tavoitteen kannalta ei ole edes se, että tuotantokapasiteetin kasvattaminen pitäisi aloittaa

Suomessa lähes nollasta, vaan myös EU:n määrittämät rajoitteet voivat vaikeuttaa Suomen edistymistä vetytavoitteiden kanssa. Mikäli esimerkiksi ydinvoiman hyödyntämistä päästöttömän vedyn tuotannossa rajoitetaan EU:ssa, Suomella tulee olemaan lisähaasteita tavoitteiden mukaisen tuotantokapasiteetin saavuttamisessa.

Vedyllä on paljon ominaisuuksia, jotka tekevät siitä merkittävän osa hiilineutraalia tulevaisuutta. Vedyn avulla uusiutuvaa energiaa voidaan lisätä energijärjestelmään niin, että tuotannon ja kysynnän vaihtelut saadaan tasattua ja kysynnän ylittävä tuotanto saadaan hyötykäyttöön. Vedyn etuna on etenkin sen monikäyttöisyys, sillä vety voidaan hyödyntää sellaisenaan monissa sovelluskohteissa tai muuttaa takaisin sähköenergiaksi polttokennon avulla. Lisäksi vedyllä on potentiaalia irrottaa sellaisia aloja hiilestä, joita esimerkiksi sähköistämällä ei saataisi hiilineutraaliksi. Jotta vedyn hyödyt saataisiin todella käyttöön, vetytalous tulisi toteuttaa muiden teknologioiden kuten akkujen rinnalla eikä pyrkiä korvaamaan toimivia ratkaisuja vedyllä. Tulevaisuudessa vetytalouden mahdollisuudet saadaan parhaiten hyödynnettyä, kun vedyn tuotantoa lisätään yhdessä kysynnän kanssa niillä aloilla, joissa vihreä siirtymä todella hyötyy vedystä. Tuotannon kasvettua vetyä päästään hyödyntämään myös aloilla, joissa vety ei ole ainoa tai edes ensisijainen vaihtoehto, kuten päästöttömässä liikenteessä. Vetytalouden kannalta siirtävävaihe on kriittisin ja sen vuoksi poliittisilla ohjaustoimenpiteillä on suuri merkitys vedyn kannalta lähitulevaisuudessa.

LÄHTEET

- Aguilera, R. F., & Inchauspe, J. (2022). An overview of hydrogen prospects: Economic, technical and policy considerations. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 66(1), 164–186. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12458>
- Ball, M., & Weeda, M. (2015). *The hydrogen economy—Vision or reality?* This paper is also published as Chapter 11 ‘The hydrogen economy—Vision or reality?’ in *Compendium of Hydrogen Energy Volume 4: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy*, Edited by Michael Ball, Angelo Basile and T. Nejat Veziroglu, published by Elsevier in 2015, ISBN: 978-1-78242-364-5. For further details see: [Http://www.elsevier.com/books/compendium-of-hydrogen-energy/ball/978-1-78242-364-5](http://www.elsevier.com/books/compendium-of-hydrogen-energy/ball/978-1-78242-364-5). | Elsevier Enhanced Reader. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032>
- Beswick, R., Oliveira, A., & Yan, Y. (2021). *A green hydrogen economy for a renewable energy society* | Elsevier Enhanced Reader. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701>
- Burre, J., Bongartz, D., Brée, L., Roh, K., & Mitsos, A. (2020). Power-to-X: Between Electricity Storage, e-Production, and Demand Side Management. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(1–2), 74–84. <https://doi.org/10.1002/cite.201900102>
- Euroopan Komissio (2020). KOMISSION TIEDONANTO EUROOPAN PARLAMENTILLE, NEUVOSTOLLE, EUROOPAN TALOUS- JA SOSIAALIKOMITEALLE JA ALUEIDEN KOMITEALLE *Ve-tystrategia ilmasto- ja energia- ja ympäristöalalla Euroopalla*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
- European Commission. (ei pvm.). *Hydrogen*. Noudettu 15. maaliskuuta 2023, osoitteesta https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en
- European Commission. (2021, heinäkuuta 14). *Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fi
- Hemgård, H. (2023). *Neljän miljardin euron investointi suunnitteilla Inkooseen*. Noudettu 5. huhtikuuta 2023, osoitteesta <https://www.businessfinland.fi/ajankohtaista/uutiset/tiedotteet/2023/neljan-miljardin-euron-investointi-suunnitteilla-inkooseseen>
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*.

- International Energy Agency (IEA). (2019). *The Future of Hydrogen – Analysis*. IEA. Noudettu 17. helmikuuta 2023, osoitteesta <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IRENA, (2018). *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*.
- IRENA, (2019). *Renewable Power-to-Hydrogen – Innovation Landscape Brief*.
- IRENA, (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal*.
- IRENA, (ei pvm.). *Hydrogen*. Noudettu 5. huhtikuuta 2023, osoitteesta <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- Jörissen, L. (2012). Prospects of Hydrogen as a Future Energy Carrier. Teoksessa S. J. McPhail, V. Cigolotti, & A. Moreno (Toim.), *Fuel Cells in the Waste-to-Energy Chain: Distributed Generation Through Non-Conventional Fuels and Fuel Cells* (ss. 189–203). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2369-9_12
- Keipi, T., Tolvanen, H., & Konttinen, J. (2018). *Economic analysis of hydrogen production by methane thermal decomposition_ Comparison to competing technologies | Elsevier Enhanced Reader*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.063>
- Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J., & Hurskainen, M. (2020). *NATIONAL HYDROGEN ROADMAP*.
- LUT-yliopisto. (2022, LUT). *Power-to-x (P2X) – Mitä se tarkoittaa ja miten se mullistaa energian- ja ruoantuotannon? | LUT-yliopisto*. <https://www.lut.fi/fi/artikkelit/power-x-p2x-mita-se-tarkoittaa-ja-miten-se-mullistaa-energia-ja-ruoantuotannon>
- OECD. (2005). *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*. Organisation for Economic Co-operation and Development. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/prospects-for-hydrogen-and-fuel-cells_9789264109582-en
- Rufer, A. (2018). *Energy Storage: Systems and Components*. Noudettu 8. helmikuuta 2023, osoitteesta https://web.s.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/bmxIYmtfXzE2MjU-wMjNfX0FO0?sid=8211a1b3-1271-460c-8d44-b639883d8f0a@redis&vid=0&format=EB&lpid=lp_233&rid=0
- Sallinen, P. (2023). *Vety-Suomen ensiaskeleet*. Noudettu 23. maaliskuuta 2023, osoitteesta <https://www.energiuutiset.fi/kategoriat/markkinat/vety-suomen-ensiaskeleet.html>
- Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., & Patronen, J. (2023). *Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet*.

- Staff, C. B. (2020, marraskuuta 30). *In-depth Q&A: Does the world need hydrogen to solve climate change?* Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-does-the-world-need-hydrogen-to-solve-climate-change/>
- Sudhakar, Y. N., Selvakumar, M., & Bhat, D. K. (2018). Chapter 5—Biopolymer Electrolytes for Fuel Cell Applications. Teoksessa Y. N. Sudhakar, M. Selvakumar, & D. K. Bhat (Toim.), *Biopolymer Electrolytes* (ss. 151–166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813447-4.00005-4>
- Tashie-Lewis, B. C., & Nnabuife, S. G. (2021). *Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy—A Technology Review | Elsevier Enhanced Reader*. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100172>
- Teknoliateollisuus. (2021). *Vetyklusteri haluaa Suomesta vetyliiketoiminnan globaalín veturin*. Teknoliateollisuus. Noudettu 23. maaliskuuta 2023, osoitteesta <https://teknoliateollisuus.fi/fi/ajankohtaista/uutinen/vetyklusteri-haluaa-suomesta-vetyliiketoiminnan-globaalín-veturin>
- Tiihonen, T. (2021). *TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF METHANE DECOMPOSITION PROCESS*.
- Valtioneuvosto. (2023, helmikuuta 9). *Hallitus hyväksyi periaatepäätöksen vedystä—Suomella edellytykset valmistaa 10 prosenttia EU:n vihreästä vedystä 2030*. Valtioneuvosto. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/hallitus-hyvaksyi-periaatepaatoksen-vedysta-suomella-edellytykset-valmistaa-10-prosenttia-eu-n-vihreasta-vedysta-2030>
- Vartiainen, E. (2020). *Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin*. *fortum.fi*. Noudettu 31. tammikuuta 2023, osoitteesta <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>
- VTT. (ei pmv.). *Vetytalous | VTT*. Noudettu 7. maaliskuuta 2023, osoitteesta <https://www.vttresearch.com/fi/beyond2030/hiilineutraalisuus/vetytalous>
- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). *Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen | Elsevier Enhanced Reader*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>