



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**VETYPOHJAISTEN POLTTOAINEIDEN
TUOTANTO**

FANNY PEKKALA

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Vetyperusteisten polttoaineiden tuotanto

Fanny Pekkala

Oulun yliopisto, ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 37 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: TkL Kaisu Ainassaari

Työn ohjaajat Oomi Solar Oy:llä: DI Olli Tuomivaara ja Ins. (AMK) Neil Livingstone

Tämä kandidaatintyö toteutetaan yhteistyössä Oomi Solar Oy:n kanssa. Oomi Solar Oy on suomalainen energiayhtiö, joka on aloittanut toimintansa vuonna 2024. Koko Suomessa toimiva Oomi Solar keskittyy kiinteistö- ja maavoimaloiden sekä teollisen kokoluokan aurinkopuistojen toimittamiseen. Oomi Solar Oy on Oomi Oy:n sisaryhtiö.

Koko maailmaa koskettava ilmastonmuutos edellyttää uusia teknologioita sen hillitsemiseksi. Kansainvälisesti on kiinnostuttu vedystä sen monipuolisuutensa vuoksi sekä siksi, että sen jalosteilla voidaan korvata fossiilia raaka-aineita useissa sovelluksissa. Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin vihreästä vedystä valmistettavien synteettisten polttoaineiden, kuten e-metanolin, e-metaanin, e-ammoniakin ja Fischer-Tropsch-polttoaineiden tuotantoa, käyttökohteita ja kannattavuutta. Vedyn ja siitä jalostettavien polttoaineiden vertailussa keskityttiin tarkastelemaan kuljetus-, varastointi- ja käyttömahdollisuuksia. Vedyn varastoinnin ja kuljetuksen tiedetään olevan haastavaa, joten vetyjalosteet tarjoavat ratkaisuja näihin haasteisiin.

Suora vetykäyttö tarjoaa puhdasta polttoainetta ja vähäisiä ympäristövaikutuksia, mutta sen varastointi ja kuljettaminen vaativat erityisiä infrastruktuureja ja teknologioita. Synteettiset polttoaineet tarjoavat vaihtoehdon vedyn varastoinnille ja käytölle, ja niiden valmistusprosessit voivat hyödyntää uusiutuvia energialähteitä. Synteettisillä polttoaineilla voidaan korvata kokonaan fossiilisia polttoaineita tai vähentää niiden käyttöä. Tällä hetkellä vety ja vetyperusteiset polttoaineet eivät ole taloudellisesti kilpailukykyisiä, mutta jo 2030-luvulla tilanteen odotetaan muuttuvan.

Asiasanat: vihreä vety, synteettiset polttoaineet, vetytalous

ABSTRACT

Hydrogen-based fuels production

Fanny Pekkala

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2024, 37 pp

Supervisor at the university: Lic. Tech. Kaisu Ainassaari

Supervisor at the Oomi Solar Oy: M.Sc. Tech. Olli Tuomivaara and B. Eng. Neil Livingstone

This bachelor's thesis is conducted in collaboration with Oomi Solar Oy. Oomi Solar Oy is a Finnish energy company that began operations in 2024. Operating throughout Finland, Oomi Solar focuses on providing solar power solutions for properties, ground-mounted installations, and industrial-scale solar parks. Oomi Solar Oy is a sister company of Oomi Oy.

Global climate change necessitates new technologies to mitigate its effects. International interest in hydrogen is growing due to its versatility and the potential to replace fossil raw materials in various applications. This bachelor's thesis examines the production, applications, and feasibility of synthetic fuels made from green hydrogen, such as e-methanol, e-methane, e-ammonia, and Fischer-Tropsch fuels. The comparison of hydrogen and hydrogen-derived fuels focuses on transportation, storage, and usage possibilities. Hydrogen storage and transportation are known to be challenging, and hydrogen-based fuels offer solutions to these issues.

Direct hydrogen use provides clean fuel with minimal environmental impact, but its storage and transportation require specialized infrastructures and technologies. Synthetic fuels offer an alternative for hydrogen storage and use, and their production processes can utilize renewable energy sources. Synthetic fuels can completely replace or reduce the use of fossil fuels. Currently, hydrogen and hydrogen-based fuels are not economically competitive, but by the 2030s, this situation is expected to change.

Keywords: green hydrogen, synthetic fuels, hydrogen economy

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	6
2 VEDYN TUOTANTO	7
2.1 Vety.....	7
2.2 Vihreän vedyn valmistus	9
2.2.1 AEL-tekno logia	12
2.2.2 PEM-tekno logia	13
2.3 Vedyn varastointi	15
2.3.1 Kaasumainen vety.....	16
2.3.2 Nestemäinen vety.....	17
3 SYNTEETTISTEN POLTTOAINEIDEN TUOTANTO JA KÄYTTÖKOHTEET ...	19
3.1 E-Metanoli.....	19
3.1.1 Käyttökohteet.....	20
3.1.2 Tuotanto	21
3.2 E-Metaani	24
3.2.1 Käyttökohteet.....	24
3.2.2 Tuotanto	24
3.3 E-Ammoniakki	26
3.3.1 Käyttökohteet.....	26
3.3.2 Tuotanto	27
3.4 E-FT-polttoaineet	28
3.4.1 Käyttökohteet.....	28
3.4.2 Tuotanto	28
4 SYNTEETTISTEN POLTTOAINEIDEN JA VEDYN VERTAILU	30
5 YHTEENVETO	33
LÄHDELUETTELO	34

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AEL	Alkalielektrolyysi
CAPEX	Pääomamenot
CCUS	Carbon capture, utilization and storage, hiilidioksidin talteenotto- hyödyntämis- ja varastointitekнологia
DME	Dimetyylieetteri
FT	Fischer-Tropsch
IEA	International Energy Agency, kansainvälinen energijärjestö
IMO	International Maritime Organization, kansainvälinen merenkulkujärjestö
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Hallitusten välinen ilmastopaneeli
LCHC	Levelized Cost of Hydrogen Calculator, vedyn kustannustason laskuri
LH2	Nestemäinen vety
MeOH	Metanoli
OPEX	Käyttökustannukset
PEM	Polymembraanielektrolyysi
PFSA	Perfluorosulfonihappo
P2X	Power-to-x, synteettisten polttoaineiden tuottamista sähkön avulla
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UHS	Underground hydrogen storage, maanalainen vetyvarasto
WGSR	Water-gas shift reaction, vesikaasun siirtoreaktio
ZBO	Zero boil-off, nollakiehumin

1 JOHDANTO

Nykyinen energiantuotanto ja kulutus ovat asettaneet maailmanlaajuisia haasteita ilmastomuutoksen hillitsemiseksi, joiden ratkaiseminen vaatii innovatiivisia lähestymistapoja sekä kestäviä energiaratkaisuja. Pariisin sopimuksella pyritään rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu 1,5 celsiusasteeseen suhteessa esiteolliseen aikaan. Yksi keskeisimmistä asioista kohti tätä pyrkimystä on siirtyminen vähähiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin. Tässä työssä perehdytään vetyperustisiin synteettisiin polttoaineisiin, kuten e-metaaniin, e-metanoliin, e-ammoniakkiiin ja Fischer-Tropsch-polttoaineisiin.

Vetyä ja vetyperustaisia polttoaineita pidetään keskeisinä tekijöinä siirryttäessä kohti vähäpäästöistä energiantuotantoa. Niiden puhtaat palamisolosuhteet tarjoavat mahdollisuuden merkittävään päästöjen vähentämiseen ja ympäristövaikutusten lieventämiseen. Lisäksi ne vähentävät riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Hallitusten välinen ilmastomuutospaneeli (IPCC) on nostanut maailmanlaajuisissa ilmastoskenaarioissa vihreän vedyn esille yhtenä välttämättömistä keinoista päästä Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteisiin. IPCC korostaa vedyn ja sähköpolttoaineiden käyttökohteina niitä osa-alueita, joita on vaikea suoraan sähköistää. (Sivill et al., 2022 s. 19)

Prosessia, jossa vedystä valmistetaan synteettisiä polttoaineita, käytetään nimitystä Power-to-X. Synteettisten polttoaineiden tarkoituksena on hyödyntää kasvihuonekaasuja ja muuntaa ne synteettisiksi polttoaineiksi ja arvokkaiksi kemikaaleiksi energian varastointiratkaisuna. Power-to-X-prosesseissa hyödynnetään uusiutuvaa energiaa, esimerkiksi tuuli-, aurinko- tai vesivoimaa, kemiallisen synteessin raaka-aineen tuottamiseksi. Vihreän vedyn tuottamiseen käytetään vesielektrolyysiä. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen joko hiilidioksidipäästöjä tuottavista prosesseista, esimerkiksi biokaasulaitoksesta tai suoraan hiilidioksidin talteenotolla. (Sivill et al. 2022. s.20)

Tämän työn tarkoituksena on esitellä sähköpolttoaineiden käyttökohteita ja tuotantoa sekä tutustua pintapuolisesti vedyn varastointimenetelmiin. Työssä vertaillaan vedyn suoraikäyttöä ja varastoimista verrattuna sähköpolttoaineisiin.

2 VEDYN TUOTANTO

Vedyn valmistukseen on useita erilaisia menetelmiä, mutta tässä työssä keskitytään lähinnä vihreän vedyn valmistukseen elektrolyysillä. Vetyä voidaan kutsua vihreäksi vedyksi, jos elektrolyysin tarvitsema sähkö on tuotettu uusiutuvista lähteistä. Nykypäivänä vetyä tuotetaan pääasiassa fossiilisista energianlähteistä. Näin tuotettua vetyä kutsutaan harmaaksi vedyksi. Sininen vety eroaa harmaasta vedystä siten, että sen tuotannossa syntyvät hiilidioksidi päästöt otetaan talteen ja kierrätetään, mutta se ei ole vielä kovin yleistä. (Sivill et al., 2022. s. 14, 21)

2.1 Vety

Vety on kaikista yksinkertaisin alkuaine ja se esiintyy jaksollisessa järjestelmässä ensimmäisenä. Normaaleissa olosuhteissa vetymolekyyli (H_2) on väritön, hajuton ja mauton kaasu, joka koostuu kahdesta vetyatomista (H). Vety on yksi tärkeimmistä alkuaineista, koska sitä esiintyy useissa yhdisteissä, joista tärkeimpänä on vesi (H_2O). Sitä onkin eniten sitoutuneena maapallolla vesistöihin ja jäätiköihin. (Kelola 2021; Hydrogen – H 2024) Alla olevassa taulukossa on eriteltyä vedyn ominaisuuksia.

Taulukko 1. Vedyn ominaisuuksia. (Tukes 2024)

Moolimassa	2,02 g/mol
Tiheys (20°C;1,013 bar)	0,08375 kg/m ³
Noste ilman suhteen	14 kertaa kevyempi
Diffuusiovakio ilmassa NTP	0,61 cm ² /s
Sulamis- tai jäätymispiste	-259 °C
Kiehumispiste	-253 °C
Minimi syttymisenergia ilmassa	0,017 mJ
Laminaarinen palamisnopeus	2,7 m/s
Itsesyttymispiste	560 °C
Syttymisalue, pitoisuus ilmassa	4–75 til-%
Räjähdyalue	18–59 til-%
Lämpöarvo (lower heating value)	120 mJ/kg

Hiilineutraalille vedylle nähdään kansainvälisesti suuri potentiaali erityisesti teollisuudessa ja liikenteessä. Vety taipuu moneksi ja siksi sitä voidaankin käyttää polttoaineena, prosessien raaka-aineena, energiankantajana sekä väliaineena energian

varastointiin. Fossiilisten raaka-aineiden korvaajana vety tulee olemaan avainasemassa, sillä sitä voidaan valmistaa täysin puhtaasti tai vähähiilisesti. Puhtaasti valmistettua vetyä kutsutaan myös vihreäksi vedyksi. Kuitenkin tänä päivänä suurin osa vedystä tuotetaan vielä fossiililla energianlähteillä. (Sivill et al., 2022. s. 19)

Nykyisin vetyä käytetään pääasiallisesti ammoniakkin valmistukseen ja öljynjalostukseen, mutta kehitysasteella on uusia prosesseja ja teknologioita fossiilisten raaka-aineiden ja polttoaineiden korvaamiseksi vetyteknologialla. Metanolin, metaanin, bensiinin, kerosiinin ja dieselin valmistukseen voidaan myös hyödyntää vetyä. Tästä menetelmästä käytetään nimitystä Power-to-X (P2X). Vedyn lisäksi synteettisten hiilivetyjen valmistukseen tarvitaan hiilidioksidia (CO_2). (Sivill et al., 2022 s. 20)

Suomessa vedyn tuotanto on tällä hetkellä 140 000–150 000 t/a, jonka energiasisältö on 4,7–5,0 TWh. Tästä noin 99 % tuotetaan fossiilisista polttoaineista, enimmäkseen maakaasusta (Huttunen et al., 2022 s. 190). Maakaasusta vetyä tuotetaan höyryreformoimalla. Höyryreformoinnissa hiilen ja vedyn väliset sidokset katkaistaan ja hiili hapetetaan hiilidioksidiksi. Tuotteeksi saadaan vetyä ja hiilidioksidia. On mahdollista myös käyttää biometaania, jolloin hiilen kiertokulku saadaan suljettua. Lähtöaineena voidaan myös käyttää metaania raskaampia hiilivetyjä, mutta silloin hyötysuhde ei ole niin hyvä sekä vetymäärän nähden hiilen päästöt ovat suuremmat. (Motiva 2023)

2.2 Vihreän vedyn valmistus

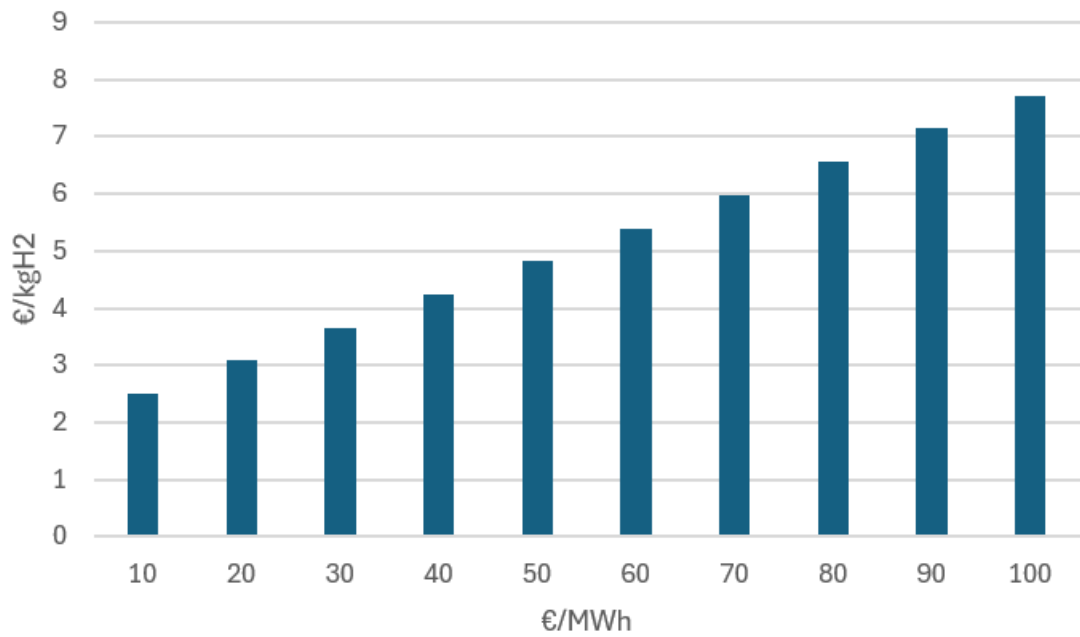
Vihreäksi vedyksi kutsutaan vetyä, joka on tuotettu elektrolyysiprosessilla, jonka tarvitsema sähköenergia on tuotettu uusiutuvasti. Vihreää vetyä kutsutaan myös puhtaaksi vedyksi tai uusiutuvaksi vedyksi. Vihreän vedyn tavoitteena on saada ilmastoalämmittäviä päästöjä vähennettyä niiden osalta, joiden tuotanto riippuu vedystä. Vihreää vetyä voidaan myös hyödyntää sähköpolttoaineiden valmistuksessa. (IRENA 2020)

Uusiutuvia sähköntuotantotapoja ovat esimerkiksi aurinkoenergia ja tuulivoima. Elektrolyysissä vedestä halkaistaan sähköenergian avulla erilleen happi ja vety seuraavan reaktioyhtälön (1) mukaisesti.

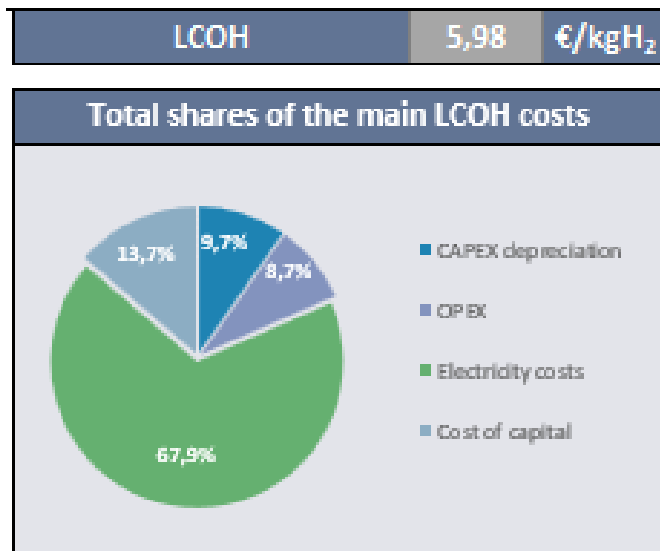


Elektrolyysiin tarvitaan yksinkertaisuudessaan elektrodit eli anodi ja katodi sekä elektrolyytti. Nykyisin on olemassa neljä erityyppistä elektrolysaattoria: alkali (AEL), polymembraani (PEM), anioninvaihtokalvo (AEM) ja kiinteäoksidikenno (SOEC). AEL- ja PEM-teknologia ovat kaupallisessa käytössä, kun taas AEM- sekä SOEC- teknologia ovat tällä hetkellä vielä varhaisemmassa kehitysvaiheessa. Edellä mainittujen teknologioiden välillä on kuitenkin merkittäviä eroja niiden toimintaperiaatteissa. SOEC esimerkiksi vaatii hyvin korkeaa lämpötilaa (700–850 °C), kun PEM-teknologialle riittää alhaisempi lämpötila (50–80 °C). Toimintapaineissa on myös suuria eroavaisuuksia. SOEC-teknologialle riittää alhainen, noin 1 bar paine, mutta muut tarvitsevat korkeamman paineen. Näiden erojen vuoksi laitteistoissa käytettävät materiaalit eroavat toisistaan merkittävästi. (IRENA 2020 s. 32)

Vedyn valmistus elektrolyysillä kuluttaa paljon sähköä, joten sen hinta on huomattavasti korkeampi kuin kemiallisilla tuotantotavoilla. Harmaan vedyn hinta on noin 1,5–2 €/kg ja vihreän vedyn noin 4–6 €/kg, mutta kansainvälinen energijärjestön (IEA) arvion mukaan ero tasaantuu vuoteen 2050 mennessä. Sähkön hankintakustannuksilla on määräävä vaikutus vihreän vedyn tuotannossa. Alla olevassa kuvassa on esitetty karkeasti sähkön hinnan vaikutukset vedyn kilohintaan. (Sivill et al., 2022. s. 139)



Kuva 1. Vedyn hinta suhteessa sähkön hintaan (Mukaiillen Agora LCHC, 2023)



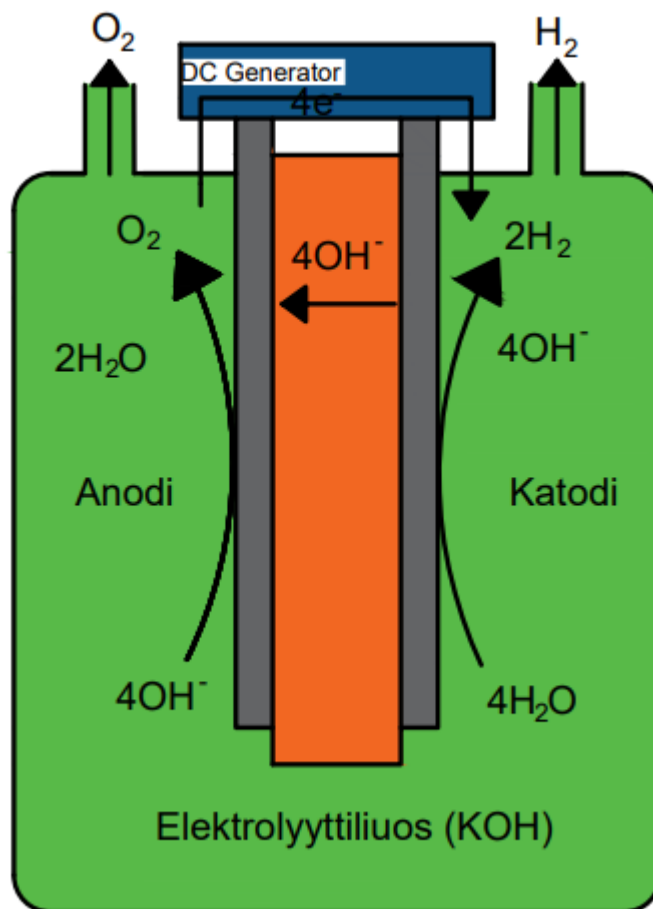
Kuva 2. Vedyn valmistuksen kulujakauma, kun sähkön hinta on 70 €/MW/h (Mukaiillen Agora LCHC, 2023)

Kuvasta 2. huomataan, että suurin osa vedyn tuotantokustannuksista syntyy elektrolyysissä. Vedyn tuotantokustannuksiin tietysti vaikuttavat useat eri tekijät, kuten kulutus, käyttöaste, elektrolyyseri, laitteiston käyttöikä ja niin edelleen. Yllä olevien

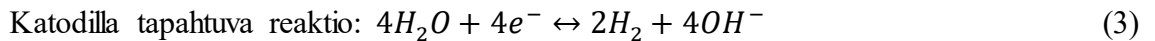
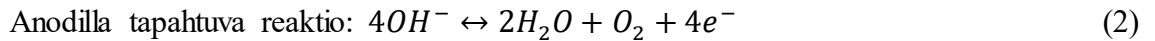
kuvien 1 ja 2 vedyn hinta on laskettu hyödyntäen Agoran Levelised Cost of Hydrogen Calculator- ohjelmaa.

2.2.1 AEL-tekniologia

Alkalielektrolyysi on elektrolyysitekniikoista halvin ja eniten käytetty. Se on myös melko yksinkertainen menetelmä ja laitteisto on helppo valmistaa. Alkalielektrolyysissä kaksi metallielektrodiä upotetaan elektrolyyttiliuokseen. Elektrodit eivät koostu jalometalleista, vaan yleensä käytetään nikkeliä, joka on pinnoitettu ruostumattomalla teräksellä. Elektrolyyttiliuoksena käytetään useimmiten kaliumhydroksidiliuosta (KOH). Varauksenkantaja-anioni OH^- , yhdessä KOH ja veden kanssa kulkeutuu elektrodilta toiselle välikalvon huokoisen rakenteen läpi (kuva 3). Tämä mahdollistaa sähkökemiallisen reaktion tapahtumisen. (IRENA 2020 s. 33)



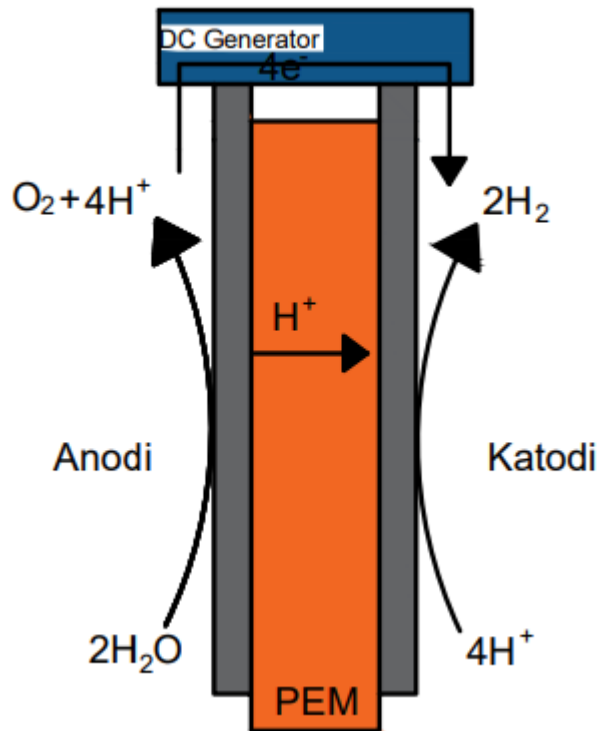
Kuva 3. Alkalielektrolyysi (Mukailen IRENA 2020 s. 31)



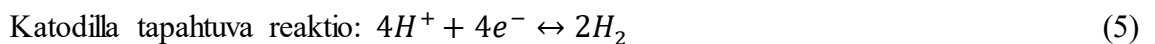
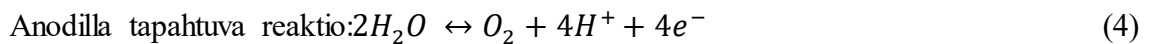
Tyypillinen toimintalämpötila on 70–90 °C ja paine 1–30 baarin välillä. Tulevaisuudessa painetta on mahdollista kasvattaa n.70 baariin tai jopa sen yli. Paineen nosto ilmakehän painetta korkeammaksi aiheuttaa lisäkustannuksia, koska laitteistoa täytyy uusida, mutta se voi tulla silti kannattavaksi vedyn varastointia ja kuljetusta ajatellen. Esimerkkinä käyttöpaineen nosto voi tuoda n. 135 €/kW investointikustannuksia, kun painetta nostetaan 1 bar paineesta 15 bar paineeseen. Alkalielektrolyysin etuina on sen toimintavarmuus sekä pitkä käyttöikä, joka voi olla yli 30 vuotta. (IRENA 2020 s. 43, 70)

2.2.2 PEM-teknologia

Polymeerimembraanielektrolyysi (PEM) on lähin alkalielektrolyysille kilpaileva teknologia. Se on vielä yksinkertaisempi järjestelmä kuin AEL-elektrolyysi, mutta toistaiseksi vielä kalliimpi. PEM-elektrolyysissä elektrodien välissä on kiinteä elektrolyytti, joka vastaa ionien kuljettamisesta elektrodilta toiselle. Nestemäistä elektrolyyttiliuosta ei tarvita ollenkaan, koska kuljetus tapahtuu kiinteäoksidikomponenttien sisällä (Kuva 4). Elektrodeina käytetään jalometalleja. Happipuolella iridiumoksidia ja vetypuolella platinaa. (IRENA 2020 s. 33) ’



Kuva 4. Polymeerimembraanielektrolyysi. (Mukaillen IRENA 2020 s. 31)



Kiinteänä elektrolyyttinä käytetään perfluorosulfonihappoa (PFSA). PFSA-kalvon sekä elektrodien kehittynyt rakenne mahdollistaa korkeamman hyötysuhteen saavuttamisen. PFSA on kestävä sekä kemiallisesti, että mekaanisesti. Se mahdollistaa suuret paine-erot ja siksi PEM-kenno voikin toimia jopa 70 baarin paineessa happipuolen ollessa ilmakehän paineessa (1,013 bar). PFSA mahdollistaa myös reversiibelit reaktiot, mutta niitä ei ole vielä tehty kaupallisesti, koska ne ovat paljon monimutkaisempia ja vaarantavat kestävyuden nykyisissä olosuhteissa. PEM-elektrolyserit ovat yksinkertaisimmasta ja pienikokoisimmasta päästä, mutta ne ovat melko herkkiä epäpuhtauksille. Nykyään elektrodipinta-ala lähestyy 2000 cm². (IRENA 2020 s. 35, 70)

PEM-teknologian etuna on sen nopea käynnistysaika, joka on kylmäkäynnistyksessä noin 5 minuuttia sekä nopea sammutusaika, joka on muutamia sekunteja. Tämä on suuri etu

silloin kun käytetään uusiutuvaa energiaa. Elektrolyysiteknologia voi tarjota merkittävää joustavuutta uusiutuvan energiantuotannon kausivaihteluiden mukaisesti. (IRENA 2020 s. 35)

2.3 Vedyn varastointi

Vedyn tuotanto ja kulutus eivät aina välttämättä kohtaa paikallisesti ja ajallisesti. Uusiutuvan energian, kuten tuuli- ja aurinkoenergian, saatavuus voi vaihdella kausittain merkittävästi. Tästä syystä hyödynnetään vedyn varastointimenetelmiä, joilla voidaan puskuroida kysynnän ja tarjonnan kausivaihteluita. Sähkön varastointi vetyyn toimii esimerkiksi siten, että kesällä aurinkoenergiasta tuotettu ylimääräinen energia varastoidaan vedyksi ja muunnetaan sähköksi, kun energian tarve talvella kasvaa. (Luo et al., 2024 s. 1)

Vedyn varastointiin liittyy kuitenkin erilaisia haasteita. Sen sulamispiste on -259 °C ja kiehumispiste -253 °C , joten se vaatii erittäin kylmiä olosuhteita pysyäkseen nesteenä. Kaasumaisen vedyn energiatiheys on 3 Wh/l normaalioloissa (20 °C , 1 atm). Yksi kilogramma vetykaasua vaatii 11 m^3 varastointitilavuuden normaaliolosuhteissa. Jotta varastointi suuressa mittakaavassa olisi kannattavaa, vaatii se suuren varastointitiheyden. Vedyllä on myös hyvin alhainen syttymisenergia ($0,017\text{ mJ}$), joten se syttyy hyvin pienestäkin kipinästä. Tämä asettaa omat haasteensa varastoinnille ja kuljetukselle. Vedyn molekyylikoko on pieni ja se pystyy tunkeutumaan pienistäkin raoista, mikä kasvattaa sen räjähdysvaara sekä kykyä karata varastointisäiliöstä. (Tukes 2024)

Vedyn varastoinnin haasteena on myös se, että se haurastuttaa metalleja. Vety kykenee tunkeutumaan metalliin ja voi aiheuttaa sen mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä ja ennenaikaista rikkoutumista (Li et al., 2021 s. 23). Tämä aiheuttaa ongelmia etenkin pitkäaikaisessa varastoinnissa. Vetytalouden kannalta on tärkeää tiedostaa vedyn aiheuttamat haasteet ja kehittää niihin ratkaisuja.

Varastointiin on kuitenkin olemassa useita erilaisia tapoja. Varastointimenetelmät voidaan jakaa maanalaisiin (UHS), maanpäällisiin ja materiaalipohjaisiin menetelmiin. Nykyisin vetyä varastoidaan eniten kaasuna tai nesteenä paikallisissa varastoissa, mutta

tulevaisuuden vetytalouden kannalta suuren mittakaavan maanalaiset varastot tulevat tarpeeseen (Sivill et al., 2022. s. 1–2, 142).

Maanpäällinen varastointi tapahtuu yleensä kaasusäiliöissä. Se on tarkoitettu loppukäyttöön ja sillä pyritään täyttämään tuntikohtaiset tai päivittäiset tarpeet. Materiaalipohjainen varastointi varastoi vedyn fysikaalisen tai kemiallisen adsorptiomekanismin avulla. Sillä pystytään varastoimaan vetyä pitkäaikaisesti ja turvallisesti. Kustannukset voivat kuitenkin olla melko korkeat, koska fysikaalisen ja kemiallisen adsorption aikaansaamiseksi tarvitaan vaativat olosuhteet. Maanalainen varastointi voidaan toteuttaa jo olemassa olevissa luonnollisissa varastointipaikoissa tai suunnitelluissa varastoissa. Luonnollisia varastointipaikkoja ovat esimerkiksi tyhjentyneet hiilivetykentät ja pohjavesikerrostumat. Suunniteltuja varastointipaikkoja sen sijaan ovat luolastot ja hylätyt kaivosalueet. Maanalaiset varastointipaikat vaikuttavat tällä hetkellä potentiaalisimmalta tulevaisuuden vetytalouden kannalta, koska niillä on potentiaalia pitkäaikaiseen varastointiin suuressa mittakaavassa, mikä mahdollistaa kausittaisen tarjonnan ja kysynnän tasapainottamisen. Maakaasun ja hiilidioksidin varastointihankkeista saatuja kokemuksia voidaan hyödyntää UHS-hankkeiden kehittämisessä ja näin ollen parantaa turvallisuutta ja vähentää kustannuksia. (Luo et al., 2024 s. 1–2)

2.3.1 Kaasumainen vety

Vedyn tiheys kaasuna normaalissa ilmanpaineessa (1 atm) on erittäin alhainen, $0,0838 \text{ kg/m}^3$. Vetyä yleensä varastoidaan korkeasti paineistettuna kaasuna sen tehokkuuden vuoksi. Varastointi paine on yleensä 200–700 bar välillä. Vetysäiliöt ovat painelaitteita ja niitä koskee painelainsäädäntö. (Luo et al., 2024; Tukes 2024)

Vetyä voidaan varastoida pienessä tai keskisuuressa mittakaavassa maanpäällisissä painesäiliöissä. Painesäiliöt jaetaan viiteen eri tyyppiin niiden ominaisuuksien mukaan. Tyyppin I säiliöitä käytetään usein teollisissa sovelluksissa. Säiliöt ovat kokonaan metallisia, eikä niissä ole erillistä ulkokuorta. Valmistus on melko yksinkertaista ja edullista, mutta ne ovat painavia ja siksi soveltuvat lähinnä kiinteään käyttökohteeseen tai teollisuuteen. Paine on yleensä 20–30 MPa. (Tukes 2024)

Tyypin II säiliöillä voidaan saavuttaa hieman parempi varastointikapasiteetti kuin tyypillä I. Tyypin II säiliöt ovat tyypillisesti alumiinisylintereitä, jotka on päällystetty hiilikuidulla, lasikuidulla tai aromaattisella polyamidilla. Päällysteen tarkoituksena on vahvistaa seinämän rakennetta, jotta se kestäisi korkeampaa painetta. Lisäksi sisäkuoresta voidaan tehdä ohuempi ja näin säiliön painaa vähemmän kuin tyypin I säiliö. Tyypin I painesäiliö kestää säiliöistä kaikista eniten painetta eikä sen maksimipainetta ole määritelty (Tukes 2024)

Tyypin III säiliöt tehdään komposiittimateriaalista kuten lasikuidusta, aromaattisesta polymeeristä tai hiilikuidusta. Sisäpuolella on erittäin ohut alumiininen tai teräksinen pinnoitus. Komposiittisäiliöiden paineenkestävyys on hyvä verrattuna kokonaan teräksisiin säiliöihin kuten tyypin I. Paineen sieto perustuukin täysin komposiittimateriaaliin. Maksimipaine alumiini-lasikuiturakenteelle on n. 30 MPa, alumiiniaromaattinen polymeeri- rakenteelle n. 43 MPa ja teräs-hiilikuiturakenteelle 70 MPa. (Tukes 2024)

Tyypin IV säiliöt ovat kokonaan komposiittimateriaaleista. Sisäkerros on pinnoitettua komposiittimateriaalia ja ulkokuori on hiilikuidun ja kestumuovin sekoitusta. Sisäpuolella voi olla polymeerikerros. Tyypin IV etuna on sen keveys. Ne voivat olla jopa 70 % kevyempiä kuin tyypin I säiliöt. Tästä syystä tyypin IV säiliöt soveltuvat hyvin liikkuviin ja lentoteknisiin sovelluksiin. Haittapuolena niissä on korkeammat valmistuskustannukset kuin muissa tyypeissä. Komposiittisäiliöt ovat myös turvallisempia kuin metallisäiliöt. Maksimipaine on noin 100 MPa. (Tukes 2024)

2.3.2 Nestemäinen vety

Suuren vetymäärän varastointiin käytetään yleensä nestemäistä vetyä (LH₂), koska sen varastointitiheys on 70,9 kg/m³, mikä on huomattavasti suurempi kuin kaasumaisen vedyn. Sitä voidaan käyttää avaruusteknisissä ja lentoteknisissä sovelluksissa. Nestemäisenä vetyä on myös hyödynnetty jakelussa kuorma-autoilla, joiden kapasiteetti voi olla jopa 60 000 litraa. Nestemäinen vety sopii hyvin pitkien matkojen kuljetukseen sen hyvän energiatihedyn vuoksi. (Luo et al., 2024)

Nesteenä varastoinnin etuina ovat sen tilansäästö, korkea puhtausaste ja mahdollisuus matalapaineiseen varastointiin. Yleensä varastointipaine on alle 5 baaria. Nestemäisen

vedyn varastoinnin haasteina ovat korkea energiankulutus, erityisvaatimukset säiliömateriaalille ja suurimpana haasteena vedyn höyrystymisen aiheuttamat vetypäästöt. Höyrystymisestä seurauksena nesteytykseen käytetty energia menee hukkaan sekä höyrystynyt vety pääsee ilmakehään. LH2 varastoidaan yleensä hyvin eristettyihin kryogeenisiin säiliöihin, mutta lämpövuotoa tapahtuu silti jonkin verran. Lämpövuoto voi aiheuttaa vedyn osittaista höyrystymistä. Tämän vuoksi varastoinnissa on keskityttävä tehokkaiden eristysjärjestelmien suunnitteluun säiliöiden termisen eheyden varmistamiseksi. (Tukes 2024; Yin et al., 2024 s. 1302–1303)

Höyrystymistä voi kuitenkin rajoittaa noin 0,1 prosenttiin päivässä tehokkaalla tyhjiöeristetyllä säiliöllä, jossa ruostumattomasta teräksestä valmistetun sisemmän säiliön ja ferriittisestä teräksestä valmistetun ulkosäiliön väliin on asennettu monikerroksisia eristeitä, kuten lasikuitua, alumiinikalvoja ja polymeerilevyjä (Tukes 2024). Säiliöiden eristystekniikat jaetaan passiiviseen lämpösuojaeristykseen ja aktiiviseen lämmönsiirtoeristykseen. Passiivisessa lämpösuojaeristystekniikassa käytetään tehokkaita eristemateriaaleja, kuten huokoista vaahtomuovia, kuituvahvistettua muovia ja aerogeeliä. Nämä yhdessä monikerroksisen eristyksen kanssa mahdollistavat lämmönsiirron minimoimisen ja kryogeenisen ympäristön ylläpitämisen. Passiivinen eristys tarjoaa suhteellisen yksinkertaisen ja kustannustehokkaan ratkaisun riittävän eristyskyvyn saavuttamiseksi monissa eri sovelluksissa. Aktiivisessa lämmönsiirtotekniikassa käytetään jäähdytintä jäähdyttämään varastointisäiliössä olevaa vetyä ja se voi mahdollistaa nollakiehumisvarastoinnin (ZBO). Tällöin LH2 höyrystyminen ja häviäminen saadaan eliminoitua. Aktiiviseen lämmönsiirtoon liittyy kuitenkin erilaisia haasteita, kuten järjestelmän koon, painon ja monimutkaisuuden kasvu sekä suurempi energiankulutus ja korkeammat kokonaiskustannukset. Aktiivinen lämmönsiirtotekniikka tarjoaa mahdollisuuksia ZBO-varastointiin, mutta se on monimutkaisempi järjestelmä ja kustannukset ovat korkeat, kun taas passiivinen lämpösuojaeristys tarjoaa kustannustehokkaan ja luotettavan ratkaisun kryogeenisten olosuhteiden ylläpitämiseksi. (Yin et al., 2024 s. 1303–1304)

3 SYNTEETTISTEN POLTTOAINEIDEN TUOTANTO JA KÄYTTÖKOHTEET

Vedystä voidaan valmistaa erilaisia synteettisiä polttoaineita. Vetyperusteisten polttoaineiden valmistuksessa käytetään lähtöaineina vedyn lisäksi hiilidioksidia. Hiilidioksidin tuotannossa voidaan käyttää CCUS-teknologiaa eli hiilidioksidin talteenotto-, hyödyntämis-, ja varastointitekniologiaa. Hiilidioksidi otetaan usein talteen suoraan jonkun hiilidioksidia tuottavan prosessin savukaasuista tai suoraa ilmasta.

3.1 E-Metanoli

Metanoli (CH_3OH , MeOH) on väritön vesiliukoinen neste, jolla on mieto alkoholin haju. Metanolin kiehumispiste on $64,6\text{ }^\circ\text{C}$ ja jäätymispiste $-97,6\text{ }^\circ\text{C}$. Se on tärkeä orgaaninen aine kemianteollisuudessa ja sen kysyntä on ollut vuonna 2019 n. 98 miljoonaa tonnia. Luonnostaan metanolia esiintyy hedelmissä, vihanneksissa, fermentoiduissa elintarvikkeissa ja juomissa sekä ilmakehässä. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021. s. 22)

Nykyään metanolia voidaan tuottaa hiililähteistä, kuten maakaasusta, hiilestä, biomassasta, sivutuotevirroista ja hiilidioksidista, mikä on peräisin eri lähteistä. Suurin osa metanolista tuotetaan nykyisin maakaasusta ja loput hiilestä. Vain 0,2 % tuotetaan uusiutuvista lähteistä. Metanoli jaetaan neljään eri luokkaan sen valmistusmenetelmän mukaan. Vihreä, sininen, harmaa ja ruskea metanoli. Tässä työssä käsitellään vihreää metanolia, jonka alle kuuluvat biometanoli, bio-e-metanoli ja e-metanoli. Ilmaston ja ympäristön kannalta paras tapa olisi valmistaa metanoli uusiutuvista lähteistä, kuten esimerkiksi vedystä, joka on tuotettu elektrolyysillä ja hiilidioksidista, joka on otettu talteen ilmasta tai jostakin uusiutuvasta lähteestä. Taloudellisista syistä metanolin tuotanto edellä mainitulla tavalla on hyvin vähäistä. Uusiutuvista lähteistä sähköenergian avulla valmistettua metanolia kutsutaan vihreäksi e-metanoliksi (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021 s. 23)

3.1.1 Käyttökohteet

Metanolia voidaan käyttää polttoaineena joko sellaisenaan, bensiinin kanssa sekoitettuna, biodieselin valmistuksessa tai metyyli-tert-butyylieetterin (MTBE) ja dimetyylieetterin (DME) muodossa. DME:ä voidaan käyttää nestekaasun korvikkeena esim. ruoanlaitossa ja lämmityksessä. Nestekaasuun voidaan myös sekoittaa DME:ä 20 % ilman, että laitteisiin tarvitsee tehdä muutoksia. Metanolin suora käyttö on lisääntynyt 2000-luvun alusta yli 10 prosenttia. Korkean oktaanilukunsa ansiosta sitä voidaan käyttää polttomoottoreissa bensiinin korvikkeena tai sekoitettuna bensiiniin. Bensiiniin ja dieseliin verrattuna metanolin energiatiheys on vain noin puolet, joten polttoainesäiliön kokoa on säädettävä, mikäli halutaan saavuttaa samanlainen toimintasäde. Useat kiinalaiset autonvalmistajat tarjoavat metanolikäyttöisiä henkilö- ja pakettiautoja sekä kuorma- ja linja-autoja, jotka voivat käyttää polttoaineena M85:tä (85 % metanolia, 15 % bensiiniä), M100:aa (puhdasta metanolia) tai metanolin ja bensiinin sekoituksia, joiden metanolipitoisuus on pienempi. DME on herättänyt kiinnostusta dieselpolttoaineen korvikkeena, koska sillä on korkea setaaniluku eikä se tuota pienhiukkaspäästöjä. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021. s. 25)

Metanoli soveltuu myös muunneltuihin dieselmootoreihin sekä kehittyneisiin hybridi- ja polttokennoajoneuvoihin. Metanolipolttokennot (DMFC) voivat muuntaa metanolin kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi. Hybridi- ja polttokennoajoneuvoissa metanoli reformoidaan ajoneuvossa vedyksi, joka syötetään joko polttokennoon ajoneuvon akkujen lataamiseksi tai polttokennoajoneuvon suoraksi käyttövoimaksi. Metanolin käytön etuna on se, ettei tarvita kalliita ajoneuvon sisäisiä järjestelmiä, joilla varastoida tai siirtää vetykaasua korkeassa paineessa. Eri autoyhtiöt ovat testanneet ja osoittaneet metanolin potentiaalia polttokennoajoneuvojen käyttövoimana useissa eri prototyypeissä. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021 s. 27; Verhelst et al., 2019 s. 49)

Meriliikenne on tieliikenteen lisäksi osoittanut kiinnostustaan metanolin hyödyntämiseksi. Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on ottanut käyttöönsä merialuksia koskevat NO_x-päästömääräykset, joiden tarkoituksena on vähentää päästöjä. Meriliikenteessä käytettävien polttoaineiden sallittu rikkipitoisuus on myös laskemassa. Metanoli on kokonaan rikitön ja sitä poltettaessa ei synny lähes lainkaan pienhiukkas- tai

NO_x-päästöjä. EU:n yhteisen tutkimuskeskuksen laatimassa raportissa todetaan, että nesteytetty maakaasu ja metanoli ovat tällä hetkellä lupaavimmat vaihtoehtoiset polttoaineet meriliikenteessä. Metanolin soveltuvuus meriliikenteeseen liittyy sen hyviin turvallisuusominaisuuksiin sekä hyvin vähäisiin päästöihin verrattuna nykyisin käytössä oleviin polttoaineisiin. (Verhelst et al., 2019 s. 75)

Ilmailukäyttöön metanolia itsessään ei pidetä sopivimpana vaihtoehtona sen pienen tilavuus-energiatiheyden vuoksi. Metanoli voisi kuitenkin olla potentiaalinen ehdokas edistyneemmissä hybridilentokoneissa, joissa käytetään polttokennon ja akun yhdistelmää. Tämän tyyppisillä sähkökäyttöisillä hybridilentokoneilla olisi useita etuja, kuten vähemmän saasteita, melua ja päästöjä sekä energian käyttö vähenisi noin 40–60 prosenttia. Hybridilentokone soveltuisi hyvin erityisesti lyhyille alueellisille lennoille. Metanolia on jo kokeiltu drone-tyyppisissä laitteissa ja siten on saatu pidennettyä kantomatkaa ja lentoaikaa. Pieni metanolipolttomoottori voi ladata akkua lennon aikana, mikä mahdollistaa pidemmät lentoajat. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021. s. 29)

Metanoli soveltuu hyvin myös keittimiin, koska se ei tuota nokea, hajua tai savua. Pelkästään Kiinassa metanolia käytettiin keittimissä yli 5 miljoonaa tonnia vuonna 2018. Sitä voidaan hyödyntää polttoaineena myös lämmön ja höyryn tuottamiseen teollisuuskattiloissa sekä sähköntuotantoon kaasuturbiineissa. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021. s. 29)

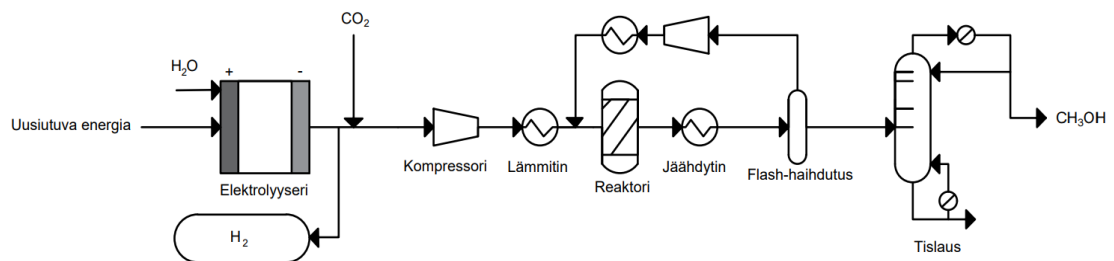
3.1.2 Tuotanto

E-metanoli on kemiallisesti identtinen fossiilisista lähteistä peräisin olevan metanolin kanssa. Suurimpana erona on se, ettei e-metanoli aiheuta läheskään niin paljon kasvihuonekaasuja elinkaarensa aikana, kuin fossiilisista lähteistä peräisin oleva metanoli. ((IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021 s. 32)

E-metanolia valmistetaan katalyyttisesti hiilidioksidista ja vihreästä vedystä. Sitä voidaan tuottaa sähkökemiallisilla prosesseilla monin eri tavoin. Yksinkertaisin ja kehittynein menetelmä tuottaa e-metanolia on valmistaa vetyä elektrolyysillä, jota seuraa katalyyttinen reaktio hiilidioksidin kanssa. Toinen tapa on tuottaa sekä hiilidioksidi että vety elektrolyysin avulla, minkä jälkeen synteetikaasu muunnetaan e-metanoliksi. Tällä

tavalla voitaisiin saavuttaa korkeampi muuntohyötysuhde, mutta se on vähemmän kehittynyt kuin perinteinen vesielektrolyysi. Perinteinen vesielektrolyysi on megawattiluokkaa, kun taas jälkimmäinen on kilowattiluokkaa. Myös hiilidioksidin ja veden suoraa sähkökemiallista muuntamista metanoliksi tutkitaan, mutta toistaiseksi on saavutettu vain rajallinen hyötysuhde ja tuotto laboratoriomittakaavassa. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021 s. 42–43)

Elektrolyysin jälkeiset tuotantolinjan viisi vaihetta on esitetty kuvassa 5. Ensimmäisenä seoskaasut hiilidioksidi ja vety paineistetaan noin 100 baariin kompressorin avulla, josta ne johdetaan lämmittimeen esilämmitettäväksi n. 250 celsiusasteeseen. Lämmittimen tuotos sekoitetaan synteetikaasun kanssa ja johdetaan reaktoriin n. 280 celsiusasteen lämpötilassa. Reaktorin tuote johdetaan jäähdytimeen, jonka jälkeen kaasu-neste-seos erotellaan. Kaasuvirta kierrätetään takaisin prosessiin konversion parantamiseksi ja nestevirta tislaukkolonniin, josta saadaan puhdasta metanolia. (Huang et al., 2022 s. 3)



Kuva 5. Metanolin tuotantoprosessi. (Mukaillen Huang et al., 2022 s. 3)

E-metanolin valmistukseen katalyyttisesti käytetään yleensä adiabaattista kiintopetireaktoria. Katalyyttien pääkomponentit ovat kupari (Cu) ja sinkki (Zn). Alla esitetään esilämmitetyn vedyn ja hiilidioksidin muuntaminen katalyyttisesti metanoliksi hiilidioksidin vetykäsittelyyn (6), käänteisen vesikaasun siirtoreaktion (7) ja hiilimonoksidin vetykäsittelyyn (8) avulla. (Sollai et al., 2023 s. 4)



Yleisesti ottaen jokainen prosessiin tuleva CO₂-molekyyli poistuu metanolimolekyylinä. Jokainen CO₂-molekyyli vaatii kolme molekyyliä vetyä ja tuottaa yhden molekyylin vettä jokaista metanolimolekyyliä kohti. Yhden metanolitonnin tuottamiseen tarvitaan noin 1,38 tonnia hiilidioksidia ja 0,19 tonnia vetyä, mikä tarkoittaa noin 1,7 tonnia vettä lähtöaineena. Sähköä tarvitaan yhden tonnin tuottamiseen noin 10–11 MWh, josta suurin osa kuluu elektrolyysissä. 100 MW:n elektrolyysilaitteella voitaisiin tuottaa noin 225 t/d e-metanolia. Perinteiseen megametanolitehtaaseen, jonka tuotantokapasiteetti on 2 500 t/d, tarvittaisiin gigawattiluokan elektrolyyseri. Näin suurten elektrolyyserien tuotantokapasiteettia on vielä kehitettävä. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE., 2021. s. 43)

3.2 E-Metaani

Metaani (CH_4) on yksinkertaisin hiilivety ja alkaani. Se on hajuton ja ilmaa kevyempi kaasu, joka syttyy erittäin helposti. Metaaniin sulamispiste on hyvin alhainen $-182\text{ }^\circ\text{C}$, kuten myös sen kiehumispiste $-162\text{ }^\circ\text{C}$. Metaania löytyy luonnosta, sillä se on maakaasun pääkomponentti.

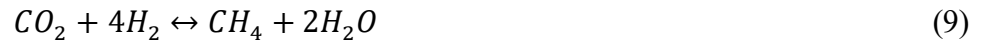
Hiilidioksidin muuntaminen metaaniksi on avain fossiilisten maakaasulähteiden rajallisuuteen liittyvien ongelmien ja ilmakehään pääsevien hallitsemattomien hiilidioksidipäästöjen poistamiseen. Power to Gas-teknologia (P2G) mahdollistaa metaanin potentiaalisen hyödyntämisen sähköenergian ja lämmöntuotannossa. Kuljetuksessa ja varastoinnissa voidaan käyttää jo olemassa olevia maakaasuinfrastruktuureja ja paikallista verkkoa. Fossiilisista lähteistä peräisin olevaa metaania kutsutaan harmaaksi tai ruskeaksi metaaniksi (Nemmour et al., 2023 s. 7). Nykypäivänä suurin osa tuotetusta metaanista on ruskeaa tai harmaata alhaisten kustannuksien vuoksi. E-metaani tuotetaan vihreästi elektrolyysillä tuotetusta vedystä ja hiilidioksidista ja on siksi tulevaisuuden kannalta kestävämpi valinta. (Bassano et al., 2019 s. 2)

3.2.1 Käyttökohteet

E-metaania voidaan käyttää fossiilisen maakaasun korvaajana, sillä se soveltuu suoraan olemassa olevaan infrastruktuuriin. E-metaania voidaan käyttää teollisuudessa, raskaassa liikenteessä, merenkulussa sekä lämmön ja sähkön yhteistuotannossa. Erityisesti raskaanliikenteen ja laivaliikenteen kokonaan sähköistäminen on haastavaa, joten metaani on hyvä vähäpäästöinen vaihtoehto (Gasum 2024).

3.2.2 Tuotanto

E-metaania tuotetaan Sabatierin prosessin avulla vedystä ja hiilidioksidista. Vety tuotetaan ensin elektrolyysillä ja hiilidioksidi otetaan talteen hyödyntämällä CCUS-teknologiaa, minkä jälkeen CO_2 hydrataan metaanireaktorissa Sabatierin reaktiolla e-metaanin tuottamiseksi. Sabatierin reaktio (9) on yhdistelmä käänteistä vesikaasun siirtoreaktiota (WGS) (10) sekä hiilimonoksidin metanoitumisreaktiota (11).



Katalyyttinen reaktio (9) on erittäin eksoterminen. Se toimii 250–400 celsiusasteessa ja 5–50 baarin paineessa. Prosessi on yksinkertainen ja suoraviivainen, mutta se vaatii 5,5 kiloa hiilidioksidia kutakin vety kiloa kohti. Ongelmana on usein se, että hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) järjestelmät sijaitsevat kaukana uusiutuvia energianlähteitä käyttävistä laitoksista, mikä lisää hiilidioksidin kuljetuskustannuksia. (Bassano et al., 2019 s. 3; Nemmour et al., 2023 s. 15)

Metanointiin käytetään eniten adiabaattisia tai polytrooppisia kiintopetireaktoreita. Näiden etuina ovat pitkät kontaktiajat sekä tasainen kontakti katalyytin ja kaasun välillä. Adiabaattinen versio on kaskadoitu prosessi, jossa adiabaattiset reaktorit toimivat sarjassa ja jokaisen reaktorin välissä on lämmönvaihdin sekä kaasun kierrätys. Lämmönvaihtimet ovat prosessissa hyvin tärkeitä, koska jos hiilidioksidin konversio jää liian matalaksi se ei sovellu maakaasuverkkoon. Polytrooppisessa reaktorissa asetetaan useita halkaisijaltaan suhteellisen pieniä putkia rinnakkain, joilla jäähdytetään reaktoria. Rinnakkaisten putkien lukumäärä määräytyy vaaditun tuotantonopeuden mukaan, mutta putkien lukumäärä valitaan vaaditun lämmönvaihtopinta-alan mukaan. Adiabaattisiin reaktoreihin verrattuna polytrooppisissa reaktoreissa lämpötilagradientit ovat pienempiä, mikä lisää järjestelmän käyttöikää ja tiettyä joustavuutta. Polytrooppiset reaktorit ovat kuitenkin kalliimpia ja suhteellisen monimutkaisia. (Ghaib ja Ben-Fares, 2018 s.371)

Maailmalla on muutamia e-metaanin tuotantolaitoksia, joista suurin on Saksassa sijaitseva Audi e-gas-laitos, joka käynnistyi vuonna 2013. Vetyä tuotetaan kolmella AEC-elektrolyysierillä, joiden sähköteho on yhteensä 6 MW, kun taas hiilidioksidi toimitetaan biokaasulaitoksesta. Vety sekoitetaan CO₂:n kanssa metaanilaitoksessa, jolloin syntyy uusiutuvaa synteettistä metaania, jota kutsutaan Audi e-gasiksi ja jonka sivutuotteina syntyy vain vettä ja happea. Tämä e-kaasu on suunnilleen samanlaista kuin fossiilinen maakaasu, ja se jaetaan olemassa olevan infrastruktuurin kautta paineistetun maakaasun

tankkausasemille. Audi e-gas-laitos tuottaa vuosittain noin 1000 tonnia e-metaania. (Nemmour et al., 2023)

3.3 E-Ammoniakki

Ammoniakki (NH_3) on kemiallinen yhdiste, joka on viime aikoina saanut paljon huomiota, koska sitä pidetään hyvänä vaihtoehtoisena polttoaineena ja tehokkaana energiantantajana tulevaisuudessa. Ammoniakilla on useita käyttötarkoituksia, mutta tällä hetkellä suurin osa ammoniakkituotannosta käytetään lannoitteisiin. (Nemmour et al., 2023) E-ammoniakin tuotanto on vielä hyvin alkutaipaleella, mutta pitkällä aikavälillä odotetaan e-ammoniakista tulevan tärkein hyödyke, kun uusiutuvaa energiaa kuljetetaan maanosien välillä (IRENA ja AEA., 2022 s. 11). E-ammoniakin tuotannossa ei käytetä lainkaan hiilidioksidia, joten se mahdollistaa hiilidioksidivapaan energiantuotannon.

3.3.1 Käyttökohteet

Ammoniakkia voidaan käyttää metanolin tavoin synteettisenä polttoaineena diesel- tai polttomoottoreissa sekä kaasuturbiineissa. Sillä nähdään myös suuri kapasiteetti vedyn kemiallisena varastointivälineenä. Ammoniakilla voidaan korvata hiiltä ja maakaasua peruskuormitus- ja huippuvoimalaitoksissa sekä laitoksissa, joissa käytetään kaasuturbiineja, uuneja tai polttokennoja. (IRENA ja AEA., 2022 s. 73)

Ammoniakkia on esitetty vedyn kantajaksi sen ominaisuuksien vuoksi. Vetyä ja typpeä saadaan halkaisemalla ammoniakki katalyyttisen krakkauksen avulla. Sovelluksesta riippuen ammoniakin osittainen hajottaminen voi riittää, jolloin saadaan polttoaineseos ammoniakista ja vedystä eri suhteissa. Vetyyn verrattuna ammoniakkia kuljetetaan miedommissa olosuhteissa, jolloin kuljetuskustannukset ovat alhaisemmat. Osittain tämä johtuu siitä, että ammoniakin tilavuustiheys on suurempi kuin vedyn sekä ammoniakille on jo olemassa maailmanlaajuinen infrastruktuuri. (IRENA ja AEA., 2022 s. 77, 86)

Kuten aiemmin jo todettiin, merenkulun kokonaan sähköistäminen ei ole mahdollista pitkien kuljetusmatkojen vuoksi. Ammoniakkia ehdotetaan korvaamaan raskasta polttoöljyä ja nesteytettyä maakaasua. IMO ei ole vielä hyväksynyt ammoniakkia merenkulun polttoaineeksi, joten toistaiseksi jokainen alus tarvitsee yksittäisen luvan

ammoniakin käyttöön polttoaineena. Irena arvioi, että ammoniakin kysyntä on noin 100–1000 miljoonaa tonnia vuoteen 2050 mennessä, riippuen ammoniakin osuudesta polttoaineseoksessa, kysyntäskenaariosta ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisvauhdista. (IRENA ja AEA., 2022 s. 83)

3.3.2 Tuotanto

E-ammoniakkia valmistetaan muilla Haber-Bosh-menetelmällä. Erona perinteiseen menetelmään on se, että vety tuotetaan elektrolyysillä maakaasun reformoinnin sijaan. Typpi voidaan erottaa ilmasta käyttäen kryogeenistä tislauksia, kalvoerotusta tai painevaihteluadsorptiota. Koko prosessin tarvitsema sähköenergia tuotetaan myös uusiutuvista lähteistä, yleensä tuulivoimalla tai aurinkosähköllä. Ammoniakkisynteesi on yhtälön 12 mukainen eksotermiinen reaktio vedyn ja typen välillä. (Nemmour et al., 2023 s. 8)



Haber-Bosh-ammoniakin synteesiprosessi koostuu synteesireaktorista, sekoitusyksiköistä, lämmönvaihtimista, kompressoreista ja ammoniakin erotusyksiköistä. Synteesireaktorissa, jossa yllä olevan reaktion (12) mukainen reaktio tapahtuu, lämpötila on tyypillisesti 350–550 °C ja paine 150–300 bar. Katalyyttinä käytetään rautapohjaisia katalyyttejä. (Wang et al., 2023 s. 5)

Ammoniakkisynteesin reaktoriympäristö ei sovellu hyvin uusiutuvan energian saatavuuden vaihteluun. Toiminta edellyttää lähes jatkuvaa vedyn, typen ja prosessisähkön tuottoa. Paineen ja lämpötilan vaihtelusta seuraa ongelmia prosessille, kuten esimerkiksi katalyytin vaurioitumista. Tuulivoiman ja aurinkoenergian ajoittaisen vaihtelun vuoksi energian saatavuus vaihtelee, mutta järjestelmää voidaan tukea akulla prosessin jatkuvuuden takaamiseksi. Akkuvarasto soveltuu tasaamaan tuntikohtaisia ja päivittäisiä vaihteluita. Käytössä on myös aurinkoenergiasta ja tuulivoimasta koostuvia hybridijärjestelmiä, joilla voidaan tasata energian saatavuuden vaihtelua. Tällä hetkellä on kehitteillä suunnitteluratkaisuja, joilla voidaan vähentää kuormituksen vaihtelua synteesikierrossa. (Wang et al., 2023 s. 2–3)

3.4 E-FT-polttoaineet

E-fischer-tropsch-polttoaineet (E-FT) ovat hiilivedyistä koostuvia polttoaineita, jotka tuotetaan sähköisellä fischer-tropsch-menetelmällä (FT). Fischer-tropsch-prosessi on heterogeenisesti katalysoitu menetelmä synteetikaasun muuntamiseksi nestemäisiksi hiilivedyiksi. Tuotteet ovat erilaisia yksinkertaisia hiilivetyketjuja, joiden pituus vaihtelee olosuhteista riippuen. Korkean lämpötilan FT-tuotteet ovat pääasiassa alkeeneita ja bensiiniä (Dieterich et al., 2020). FT-synteesiöljy on kiinnostava siksi, että sitä voidaan jatkojalostaa polttoaineiksi kuten e-dieseliksi tai e-lentopolttoaineeksi. (d'Amore et al., 2023 s. 1)

3.4.1 Käyttökohteet

FT-polttoaineilla voidaan korvata fossiilisia hiilipohjaisia polttoaineita vaikeasti sähköistettävissä sovelluksissa, kuten ilmailussa (d'Amore et al., 2023). Nestemäisiä tuotteita, joiden ketjussa on 10–23 hiiliatomia, voidaan käyttää korvaamaan bensiiniä tai dieseliä. Niiden etuina tavanomaisiin polttoaineisiin verrattuna on se, että niillä on alhainen aromaattipitoisuus eivätkä ne ole rikkipitoisia. Pieni osa FT-synteetin tuotteista voidaan käyttää suoraan dieselpolttoaineena, mutta muut tuotteet on jalostettava eri polttoaineiksi, kuten bensiiniksi tai lentopetroliksi. (Dieterich et al., 2020) FT-polttoaineita voidaan käyttää myös sekoitettuna polttoaineisiin. FT-polttoaineilla on pienemmät päästöt verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.

3.4.2 Tuotanto

Nestemäisen polttoaineen tuottamiseksi FT-synteetin avulla hiilidioksidi on muutettava hiilimonoksidiksi. Tämä voidaan suorittaa vesikaasun siirtoreaktion (WSG) avulla (13). Prosessin tarvitsema vety voidaan tuottaa elektrolyysillä ja hiilidioksidi CCSU-tekniologialla.



Tuotettu synteetikaasu muunnetaan hiilivedyiksi FT-synteetin avulla. Yksinkertaistettu reaktioyhtälö esitetään alla (14).



FT-synteesi on erittäin eksoterminen reaktio, joka tuottaa hiilivetyjä, joiden ketjun pituus on enintään 100 hiiliatomia. Ketjun pituus riippuu olosuhteista. Matalan lämpötilan FT-synteesi suoritetaan yleensä noin 200–240 celsiusasteen lämpötilassa. Paine on 15–30 baarin välillä ja katalyyttinä käytetään kobolttia. Matalan lämpötilan FT-synteesi mahdollistaa nestemäiset tai vahamaiset pitempi ketjuiset lajit, joiden hiililuku on korkea. (Alsunousi ja Kayabasi, 2024 s. 5) Korkean lämpötilan FT-synteesi suoritetaan lämpötilan ollessa 300–350 celsiusastetta ja katalyyttinä käytetään rautakatalyyttiä. Se tuottaa kaasumaisia ja lyhyt ketjuisia hiilivetyjä. (Jürgens et al., 2019 s. 234)

FT-synteesissä on käytetty erilaisia reaktorikonsepteja, kuten kiintopetireaktoreita, lietekuplakolonneja, jatkuvatoimisia sekoitusreaktoreita ja mikrorakenteisia reaktoreita (Alsunousi ja Kayabasi, 2024 s. 5). Reaktorin ulostulovirrasta voidaan erottaa hiilivedyt, jotka sisältävät reagoimatonta hiilimonoksidia ja vetyä, ja kierrätetään takaisin prosessiin (d'Amore et al., 2023 s. 5). FT-synteesin tuotteita ei voida välttämättä suoraan hyödyntää suoraan polttoaineina, joten ne tulee jalostaa. Jalostus tapahtuu yleensä hydrokrakkaamalla tuotevaa (Dieterich et al., 2020 s. 27).

Vuonna 2023 Teknologian tutkimuskeskus (VTT) ja sen kumppanit ilmoittivat, että kolmivuotinen e-fuel-tutkimushanke on tulossa päätökseen. Hankkeessa haluttiin testata ja kehittää sähköpolttoaineen tuotantoa kaupallisia sovelluksia ja tehdasmittakaavaa varten. Suomalaisen teknologian avulla valmistettiin onnistuneesti e-dieseliä yhdistämällä korkealämpötilaelektrolyysi, hiilidioksidin talteenotto ja Fischer-Tropsch-synteesi. Polttoainetta testattiin dieselikäyttöisessä traktorissa. AGCO Powerin tuotekehitysjohtaja Kari Aaltosen mukaan tulokset osoittavat, että uusi polttoaine on vähintään yhtä hyvää kuin fossiilinen diesel. (AGCO POWER 2023) Dieterich et al. (2020) mukaan FT-polttoaineet voivat merkittävästi vähentää fossiilisten polttoaineiden kysyntää ja voidaan todeta, että FT-diesel olisi taloudellisesti käyttökelpoista, jos sen hinta on raakaöljyn hintaa alhaisempi (Dieterich et al., 2020 s. 32).

4 SYNTEETTISTEN POLTTOAINEIDEN JA VEDYN VERTAILU

Vihreiden vetypohjaisten polttoaineiden merkitys kestävän energiantuotannon kannalta on kiistaton. Kuitenkin vedyn varastointiin liittyy omat haasteensa kuten kappaleessa 2 todettiin. Varastointi vaatii korkeaa painetta ja alhaisia lämpötiloja, mikä lisää varastointilaitteistojen ja infrastruktuurin kustannuksia. Lisäksi vedyn kyky ”karata” säiliöstä sekä sen metalleja haurastuttavat ominaisuudet aiheuttavat haasteita. Mikäli vety voidaan tuottaa ja kuluttaa samassa paikassa, voidaan välttyä siirtokustannuksilta, jotka voivat ääritapauksessa olla moninkertaisia vedyn tuotantokustannuksiin verrattuna (Sivill et al., 2022. s. 142).

Synteettiset polttoaineet ratkaisevat osan näistä ongelmista. Vetyjohdannaisia polttoaineita valmistetaan osin sen vuoksi, että vetyä on hankala varastoida tai kuljettaa sellaisenaan. Synteettisten polttoaineiden varastointi ja logistiikka on pääsääntöisesti helpompaa kuin vedyn (Sivill et al., 2022. s. 149). Esimerkiksi metaanille on jo valmis maailmanlaajuinen infrastruktuuri ja se voidaan ohjata suoraan maakaasuverkostoon. Metaania voidaan hyödyntää raskaassa liikenteessä sekä laivaliikenteessä, toisin kuin vetyä. Vedyn tiheys on pieni, joten polttoainetankkien koko olisi hyvin suuri. Taulukossa 2. on listattu mm. vedyn ja synteettisten polttoaineiden eroavaisuuksia käyttökohteen, lämpöarvon ja kuljetuksen/varastoinnin suhteen.

Ammoniakki nähdään potentiaalisena vedyn kantajana, kuten kappaleessa 3.3 todettiin. Kuljetuskustannukset ovat alhaisempia osittain sen takia, että ammoniakilla voidaan kuljettaa miedommissa olosuhteissa sekä sen tiheys on suurempi. Ammoniakilla on myös maailmanlaajuinen infrastruktuuri. Taulukosta 2. nähdään, että ammoniakin lämpöarvo on huomattavasti pienempi kuin vedyn, mutta sen potentiaali onkin varastoinnissa ja kuljetuksessa. Taulukon polttoaineista vedyn lämpöarvo on huomattavasti muita suurempi.

Taulukko 2. Vedyn ja vetypohjaisten polttoaineiden vertailu. (IRENA ja METHANOL INSTITUTE 2021; IRENA ja AEA 2022; Dieterich et al., 2020; Sivill et al., 2022.)

	Käyttökohde	Lämpöarvo	Varastointi/kuljetus
Vety	Energiavarasto, polttoaine	120 MJ/kg	Tulossa/vaiheessa (haastavaa)
Metaani	Fossiilisen maakaasun korvaaja	50 MJ/kg	Olemassa (helpompaa vs. vety)
Metanoli	Bensiinin korvike, laivat	19,9 MJ/kg	Ei laajaa, mutta olemassa
Ammoniakki	Laivat, vedyn kantaja	17,2 MJ/kg	Olemassa (helpompaa vs. vety)
Fischer-Tropsch- polttoaineet	Bensiinin/dieselin korvike	Riippuu polttoaineesta	Olemassa (helpompaa vs. vety)

Metanolin vahvuus on siinä, että sitä voidaan käyttää polttoaineena sellaisenaan tai bensiinin kanssa sekoitettuna tai siitä voidaan tuottaa dimetyylieetteriä yksinkertaisella dehydraatiolla. Tieliikenteessä metanolia on jo otettu käyttöön, mutta meriliikenteessä se on vielä suunnittelutasolla. Metanoli kiinnostaa merenkulun polttoaineena siksi, että sillä on hyvät turvallisuusominaisuudet sekä vähäiset päästöt nykyisiin meriliikenteen käyttämiin polttoaineisiin verrattuna. Nestemäisen metanolin käyttö hybridi- ja polttokennoajoneuvoissa ei tarvitse kalliita sisäisiä järjestelmiä, jotka pystyvät siirtämään ja varastoimaan vetyä turvallisesti.

FT-polttoaineet voivat toimia suoraan fossiilisen bensiinin tai dieselin korvikkeena, eivätkä ne vaadi muutoksia jo olemassa olevaan infrastruktuuriin. E-dieseliä on testattu diesel käyttöisessä traktorissa onnistuneesti. FT- polttoaineidenkin haaste tällä hetkellä on niiden korkea hinta verrattuna raakaöljyn hintaan.

Synteettisten polttoaineiden tuotannossa ongelmana kuitenkin on se, että mitä pidemmälle tuotteita jalostetaan, sitä suuremmaksi häviöt kasvavat. Monien vetyjalosteiden valmistuksessa menetetään valmistusprosessin aikana noin 45–60 % käytetystä sähköstä. Prosessioptimoinnilla voidaan lopulta vaikuttaa häviöihin melko rajallisesti, mutta tulevaisuudessa uusiin teknologioihin perustuvat ratkaisut voivat parantaa kokonaishyötysuhteita merkittävämmiin. Kokonaishyötysuhdetta voidaan parantaa hyödyntämällä häviössä syntyvää hukkalämpöä esimerkiksi johonkin toiseen prosessiin tai ohjata kaukolämpöverkkoon. Vedyntuotannossa syntyvä happi voidaan hyödyntää ja käyttää esimerkiksi teräs- ja kemianteollisuudessa. Happea voidaan hyödyntää myös energiantuotannon polttoprosesseissa. (Sivill et al., 2022. s. 22, 149)

Tällä hetkellä vihreän vedyn sekä synteettisten polttoaineiden tuotanto on kallista, mutta tulevaisuudessa siihen on tulossa muutoksia teknologioiden kehittyessä ja maailman muuttuessa. Lisäksi on erilaisia rahoitusohjelmia, kuten InvestEu (2017–2021), jossa yksi investointien kohdealue on kestävä infrastruktuuri (9,9 mrd. €), jolla voidaan rahoittaa muun muassa vetyprojekteja (Sivill et al., 2022. s. 54)

Suoravetykäyttö sekä synteettiset polttoaineet tarjoavat potentiaalisia ratkaisuja vedyn varastointiin ja käyttöön kestävän energiantuotannon näkökulmasta. Valittaessa optimaalista vaihtoehtoa on tärkeää arvioida kunkin vaihtoehdon vahvuudet ja heikkoudet sekä ottaa huomioon paikalliset olosuhteet, resurssit ja infrastruktuurit. Jatkuvan tutkimuksen ja innovaatioiden avulla voidaan kehittää entistä tehokkaampia ja kestävämpiä ratkaisuja vedyn varastointiin ja käyttöön tulevaisuudessa.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tarkastella polttoaineita, joita voidaan valmistaa vedystä. Työssä keskityttiin vihreästä vedystä tuotettujen polttoaineiden valmistukseen ja käyttökohteisiin. Lisäksi vertailtiin vedyn ja vetypohjaisten polttoaineiden eroavaisuuksia. Kirjallisuuskatsauksen perusteella tällä hetkellä vedyn valmistaminen fossiilisista lähteistä on kustannuksiltaan kannattavinta, mutta painopisteen uskotaan muuttuvan enemmän vihreän vedyn suuntaan ilmastopakotteiden vuoksi. Vihreän vedyn tuotanto ei aiheuta päästöjä ympäristöön, mutta kuluttaa paljon sähköä. Työssä todettiin, että sähkön hinnalla on suurin merkitys vedyn tuotantokustannuksiin.

Vedyn jalosteet, kuten e-metanoli, e-metaani, e-ammoniakki ja Fischer-Tropsch-polttoaineet tarjoavat ratkaisuja vedyn varastointiin ja kuljetukseen liittyviin haasteisiin. Vedyn sitominen näihin synteettisiin polttoaineisiin helpottaa käsittelyä, varastointia ja jakelua, sekä samalla vähentää varastointiin ja jakeluun liittyviä kustannuksia ja teknisiä haasteita. Lisäksi synteettisiä polttoaineita voidaan hyödyntää silloin, kun vety ei yksinään sovellu polttoaineeksi. Tällä hetkellä ne eivät kuitenkaan ole kilpailukykyisiä fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna korkeiden kustannusten vuoksi, mutta hintojen odotetaan laskevan tulevaisuudessa.

Vetypohjaisten polttoaineiden käyttö tarjoaa monia mahdollisuuksia vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja edistää kestäväää energiantuotantoa. Jatkuva teknologian kehitys ja innovaatiot voivat edelleen parantaa vetypohjaisten polttoaineiden kilpailukykyä ja kannattavuutta tulevaisuudessa, mikä tekee niistä houkuttelevan vaihtoehdon kestävään energian tavoitteiden saavuttamisessa. Huomionarvoista on kuitenkin se, että mitä moniportaisempi polttoaineen tuotantoprosessi on, sitä enemmän tulee energia- ja materiaalihäviöitä.

LÄHDELUETTELO

Agcopower, Vihreästä vedystä ja hiilidioksidista sähköpolttoainetta suoraan tankkiin – AGCO Powerin ja VTT:n E-fuel-hanke etenee ainutlaatuiseseen testausvaiheeseen. Verkkosivu. Viitattu 23.3.2024. <https://www.agcopower.com/fi/vihreasta-vedysta-ja-hiilidioksidista-sahkopolttoaainetta-suoraan-tankkiin-agco-powerin-ja-vttin-e-fuel-hanke-etenee-ainutlaatuiseseen-testausvaiheeseen/>

Umlaut & Agora Industry (2023): Levelized cost of hydrogen calculation tool. Version 1.0

Alsunousi, M., Kayabasi, E., 2024. The role of hydrogen in synthetic fuel production strategies. *Int J Hydrogen Energy* 54, 1169–1178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.359>

An, G., Liu, Y., Kang, L., 2021. Optimal design of synthetic ammonia production system powered by renewable energy for seasonal demands of ammonia. *Huagong Xuebao/CIESC Journal* 72, 1595–1605. <https://doi.org/10.11949/0438-1157.20200936>

Bassano, C., Deiana, P., Lietti, L., Visconti, C.G., 2019. P2G movable modular plant operation on synthetic methane production from CO₂ and hydrogen from renewables sources. *Fuel* 253, 1071–1079. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.05.074>

d'Amore, F., Nava, A., Colbertaldo, P., Visconti, C.G., Romano, M.C., 2023. Turning CO₂ from fuel combustion into e-Fuel? Consider alternative pathways. *Energy Convers Manag* 289, 117170. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117170>

Dieterich, V., Buttler, A., Hanel, A., Spliethoff, H., Fendt, S., 2020. Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer–Tropsch-fuels: a review. *Energy Environ Sci*. <https://doi.org/10.1039/d0ee01187h>

- Gasum. E-metaani – synteettinen ja uusiutuva kaasu. Verkkosivu. Viitattu 5.3.2024
<https://www.gasum.com/fi/gasum/tuotteet-ja-palvelut/e-metaani/>
- Ghaib, K., Ben-Fares, F.Z., 2018. Power-to-Methane: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 433–446.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.08.004>
- Huang, R., Kang, L., Liu, Y., 2022. Renewable synthetic methanol system design based on modular production lines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161, 112379. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112379>
- Huttunen, R., Kuuva, P., Kinnunen, M., Lemström, B., Hirvonen, P., 2022. Työ- ja elinkeinoministeriö, Hiilineutraali Suomi 2035-kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321>
- Hydrogen – H. 2024. Tietoa vedystä Lenntech nettisivustolta. Viitattu 2.2.2024.
<https://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>
- IRENA (2020) Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- IRENA and AEA (2022), Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn
- IRENA AND METHANOL INSTITUTE (2021), Innovation Outlook : Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Jürgens, S., Oßwald, P., Selinsek, M., Piermartini, P., Schwab, J., Pfeifer, P., Bauder, U., Ruoff, S., Rauch, B., Köhler, M., 2019. Assessment of combustion properties of non-hydroprocessed Fischer-Tropsch fuels for aviation. *Fuel Processing Technology* 193, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.015>
- Kelola, K. 19.10.2021. Mullistaako vety maailman energiajärjestelmän?. Verkkosivu. Viitattu 2.2.2024. <https://www.helen.fi/ajankohtaista/arjessa/ilmi%C3%B6t/vety>

- Li, W., Cao, R., Xu, L., Qiao, L., 2021. The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels - a review. *Corrosion Communications* 4, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.10.005>
- Luo, X., Tveit, S., Gholami, R., Andersen, P.Ø., 2024. Underground hydrogen storage (UHS) in natural storage sites: A perspective of subsurface characterization and monitoring. *Fuel* 364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131038>
- Nemmour, A., Inayat, A., Janajreh, I., Ghenai, C., 2023. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review. *Int J Hydrogen Energy* 48, 29011–29033. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.240>
- Motiva 9.6.2023. Vety. Verkkosivu. Viitattu 7.2.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viis_aasti/energia/lahteet/vety.
- Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., Patronen, J., 2022. Selvitys ja tutkimustoiminta Utrednings- och forskningsverksamhet Vetytalous-mahdollisuudet ja rajoitteet.
- Sollai, S., Porcu, A., Tola, V., Ferrara, F., Pettinau, A., 2023. Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO₂: A techno-economic assessment. *Journal of CO₂ Utilization* 68. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102345>
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes), Vedyn käsittelyn- ja varastoinnin turvallisuus. Viitattu 7.2.2024. <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#vedyn-varastointi>
- Verhelst, S., Turner, J.W., Sileghem, L., Vancoillie, J., 2019. Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Prog Energy Combust Sci* 70, 43–88. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>
- Wang, C., Walsh, S.D.C., Longden, T., Palmer, G., Lutalo, I., Dargaville, R., 2023. Optimising renewable generation configurations of off-grid green ammonia

production systems considering Haber-Bosch flexibility. *Energy Convers Manag* 280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116790>

Yin, L., Yang, H., Ju, Y., 2024. Review on the key technologies and future development of insulation structure for liquid hydrogen storage tanks. *Int J Hydrogen Energy* 57, 1302–1315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.093>