

Rea Leveälahti

POWER-TO-X-TEKNIIKAT ENERGIA- TUOTTEIKSI

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jukka Kontinen
Lokakuu 2023

TIIVISTELMÄ

Rea Leveälähti: Power-to-X-tekniikat energiatuotteiksi
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2023

Energiakriisin uhka ja ilmastonmuutoksen vaikutukset painostavat energiarakennetta muuttumaan. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, mitkä mahdollisuudet Power-to-X-tekniologialla tuotetuilla energiatuotteilla on tulevaisuuden energiantuotannossa. Power-to-X-tekniologiassa pyritään hiilineutraaliin tuotantomuotoon ja hyödynnetään vetyä joko sellaisenaan tai muiden energiatuotteiden valmistamiseen. Pohditaan, millaiset mahdollisuudet vedyllä on toimia tulevaisuuden energiantuottajana ja -kantajana.

Työ sisältää kolme osaa. Kirjallisuustutkimusosassa esitellään vety yleisesti ja vedyn tuotantoa veden elektrolyysillä kolmella eri elektrolyysilaitteistolla. Veden elektrolyysi toimii pohjustuksena Power-to-X-tekniologialle, josta kerrotaan tarkemmin seuraavassa alaluvussa. Tässä esitellyt Power-to-X-energiatuotteet toimivat tutkimuskohteena toisessa osassa, jossa suoritetaan niiden välinen taloudellinen vertailu. Toisessa osassa keskitytään elektrolysaattorien sekä koko Power-to-X-prosessin kustannuksiin. Pohditaan, mistä kaikesta tuotantokustannukset koostuvat. Kolmannessa osassa tutkitaan Power-to-X-tekniologian riskejä ja mahdollisuuksia tekniikan, talouden sekä politiikan näkökulmista. Tehdään katsaus Suomen sekä Euroopan tämänhetkisiin Power-to-X-projekteihin sekä tulevaisuuden näkyymiin.

Työssä saatiin tuotantokustannusten perusteella selville, että Power-to-X-tekniikat eivät ole vielä kilpailukykyisiä fossiililla polttoaineilla valmistettuihin energiatuotteisiin. Tekniikoista edullisimmaksi osoittautuu Power-to-Hydrogen-prosessi, koska se ei sisällä synteetisyksiköitä, jotka lisäävät kustannuksia. Power-to-Methane-prosessi on kallein, ja vastaavasti sen hyötysuhde on huonoin verrattuna muihin energiatuotteisiin. Prosessin kustannuksia saadaan vähennettyä, jos elektrolyysissä sivutuotteena syntynyt happi myydään. Metaanin ja metanolin tuotantoyksikkö kannattaa sijoittaa lähelle esimerkiksi lämpölaitosta, jolloin synteesiin tarvittava hiilidioksidi saadaan suoraan tehtaasta.

Power-to-X-laitoksia on kehitteillä pitkin Eurooppaa, mutta enimmäismäärin länessä päin. Saksa on yksi johtajamaista Power-to-X-tekniikan suhteen. Suomessa on paljon kiinnostusta teknologiaa kohti, mikä näkyy yliopistoissa sekä yksityisissä yrityksissä. Pilottilaitoksia on kehitetty ja asennettu Suomen lisäksi myös muualle Eurooppaan. Kasvavan kiinnostuksen ja Euroopan komission asettamat tavoitteet edesauttavat vihreää siirtymistä sekä vedyn aseman vakauttamista energiasektorille.

Avainsanat: Power-to-X-tekniologia, elektrolyysi, vety

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VEDYN TUOTANTO JA POWER-TO-X.....	2
2.1 Vety yleisesti.....	2
2.2 Veden elektrolyysi.....	3
2.2.1 Alkalielektrolyysi.....	3
2.2.2 PEM-elektrolyysi	4
2.2.3 Kiinteäoksidi-elektrolyysi	5
2.3 Elektrolyysitekniikoiden yhteenveto.....	6
2.4 Power-to-X tekniikka ja lopputuotteet	7
3. POWER-TO-X KUSTANNUKSET	12
3.1 Energiatuotteiden sovelluskohteita.....	18
4. MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET	19
4.1 Tekniikan näkökulmasta.....	19
4.2 Talouden näkökulmasta	20
4.3 Poliittikan näkökulmasta.....	21
5. NYKYTILANNE JA TULEVAISUUS	23
5.1 Suomen tilanne	23
5.2 Euroopan tilanne	24
5.3 Tulevaisuuden näkymät	24
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	26
LÄHTEET	28

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Alkalielektrolyysikennon rakenne</i>	5
Kuva 2.	<i>PEM-elektrolyysikennon rakenne</i>	6
Kuva 3.	<i>Kiinteäoksidgelektrolyysikennon rakenne</i>	7
Kuva 4.	<i>Synteettisen metaanin tuottaminen Power-to-X-tekniologialla</i>	9
Kuva 5.	<i>Power-to-Hydrogen-tekniologiaa havainnollistava kuva</i>	10
Kuva 6.	<i>Power-to-X-tekniikoiden enimmäissähköhankintakustannukset suhteessa käyttöaikaan</i>	14
Kuva 7.	<i>Power-to-x-tekniikoiden tuotantokustannukset suhteessa käyttöaikaan</i>	15

1. JOHDANTO

Energian tarve kasvaa tulevaisuudessa populaation määrän suurentuessa ja energian kysynnän kasvaessa. 2000-luvulla sähkön ja lämmön saanti on niin arkipäiväistä, että se voi olla monelle itsestään selvä asia. Kuitenkin Ukrainan sodan kiihdyttämä energiakriisi osoittaa, että valtio ei voi olla liikaa riippuvainen yhdestä energiantuotantotavasta. Muiden kriisien aiheuttamat ongelmat vievät resursseja ilmastonmuutoksen hillitsemisestä. Energiantuotantosektori näyttölee merkittävää roolia kasvihuonekaasujen tuottamisessa (Wulf et al., 2020). Jos halutaan päästä ilmastotavoitteisiin, kuten tehdä EU:sta hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, valtioiden täytyy kyetä muuttamaan energiarakennetaan ja kehitellä uusia tapoja tuottaa energiaa (Ilmastonmuutos, 2023).

Yksi mahdollisista fossiilisten polttoaineiden korvaajista voisi olla vety. Vedyn tuotantoketju vaikuttaa siihen, kuinka ilmastoystävällinen se on. Kun vety valmistetaan veden elektrolyysillä käyttäen uusiutuvia energialähteitä, kuten tuulivoimaa, saadaan aikaan vihreää vetyä (Dong et al., 2022). Power-to-X-tekniikassa tuotetaan vety hiilineutraalisti, minkä jälkeen se voidaan yhdistää esimerkiksi hiilidioksidin kanssa muodostaen erilaisia synteettisiä lopputuotteita. "X" viittaa siihen minkälaista lopputuotetta valmistetaan. "X" voidaan korvata esimerkiksi sanalla "Liquid", jos valmistetaan nestemäistä lopputuotetta ja sanalla "Gas", jos valmistetaan kaasumaista lopputuotetta. Kun vetyä käytetään sellaisenaan eikä siitä jatkojalosteta muiksi tuotteiksi, teknologian nimenä käytetään Power-to-Hydrogen.

Tutkielman tarkoituksena on perehtyä Power-to-X teknologialla tuotettuihin energiapolttoaineisiin, kuten sähkö- ja biopolttoaineita. Lisäksi perehdytään tarkemmin Power-to-Hydrogen-tekniikkaan, ja tutkitaan, millaiset mahdollisuudet vedyllä olisi sellaisenaan. Vertailua ja tutkimista toteutetaan investointi- ja tuotantokustannusten näkökulmasta sekä pohditaan myös vedyn kaupallistumisen mahdollisuuksia. Maailmalla on jo kehitteillä projekteja, joista osa on päässyt markkinoille, kun taas osa on vielä kehitysvaiheessa. Power-to-X teknologiasta löytyy paljon tieteellisiä julkaisuja, mikä osoittaa, että kyseisessä tekniikassa on potentiaalia. Kuitenkin useimmiten tutkimukset ovat vasta alkuvaiheessa. Tässä työssä on esitelty muutamia prototyyppi esimerkkejä Suomessa sekä muualla Euroopassa.

Luvussa 2 käsitellään Power-to-X-tekniologian taustaa, ja aloitetaan siitä, miten vetyä tuotetaan veden elektrolyysillä parilla eri tavalla. Sen jälkeen esitellään Power-to-X-tekniologia tarkemmin ja sen tuottamat energialopputuotteet sekä niiden käyttökohteet. Luvussa 3 käydään läpi investointi- ja tuotantokustannusten selvitys kuin myös kaupallinen vertailu vedyn osalta. Power-to-X-tekniologian mahdollisuudet ja haasteet eri näkökulmista käydään läpi luvussa 4. Luvussa 5 pohditaan teknologian tulevaisuudennäkymiä sekä nykytilannetta niin Suomessa kuin Euroopassa. Viimeisessä luvussa 6 esitellään tutkielman johtopäätökset edellisten lukujen perusteella.

2. VEDYN TUOTANTO JA POWER-TO-X

Energiankulutus lisääntyy eksponentiaalisesti väestön sekä teollisuuden kasvun myötä. Fossiilisten polttoaineiden lisääminen ei ole kestävä ratkaisu, minkä vuoksi tarvitaan vaihtoehtoisia raaka-aineita. Vedyn tarve polttoaineena kasvaa jatkuvasti, kun energiakriteerit kiristyvät fossiilisten polttoaineiden suhteen. Vetyä voidaan valmistaa esimerkiksi höyryreformoinnilla, autotermisellä reformilla, kaasutuksella ja veden elektrolyysillä. (Voitic et al., 2018) Höyryreformointi on tällä hetkellä maailman käytetyin ja samalla myös halvin tekniikka tuottaa vetyä (Sankir and Sankir, 2017). Power-to-X-konseptissa tavoitteena on luoda uusia keinoja tuottaa synteettisiä polttoaineita päästöttömällä tavalla. Veden elektrolyysi on yleisin tekniikka tuottaa vihreää vetyä, minkä vuoksi keskitytään vain tähän vedyntuotantomuotoon. Tässä luvussa käsitellään veden elektrolyysiä, vetyä ja Power-to-X-teknologiaa.

2.1 Vety yleisesti

Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, ja se kattaa noin 90 % kaikista atomeista. Vedylle ominaista on sen keveys, suuri energiasisältö suhteessa massaansa ja reaktiivisuus. Se esiintyy ilmakehässä yleensä kaksiatomisena. Vety on tunnettu alkuaineena yli kaksisataa vuotta. Se on ilmaa kevyempi aine, minkä vuoksi se haihtuu nopeasti ilmassa. Kun sattuu tapahtumaan vuoto vetyä käytettäessä, se leviää nopeasti ympäristöön. Jos vuotoa ei havaita, ja vety kerääntyy suljettuun tilaan, jolloin se voi syttyä aiheuttaen räjähdysen. Vedyllä on korkea energiatiheys massayksikköä kohden, mutta matala tilavuusyksikköä kohden verrattuna hiilivetyihin. Tämän vuoksi vedyn varastointiin tarvitaan isompi tankki kuin hiilivetyjen varastointiin.

Vetyä voidaan tuottaa monella tavalla, kuten höyryreformoinnilla, autotermisellä reformoinnilla, elektrolyysillä ja kaasutuksella. Vety voidaan nimetä tietyn väriseksi sen mukaan, miten se on tuotettu. Kolme pääväriä on vihreä, sininen ja harmaa. (Dawood et al., 2020) Sininen vety on tuotettu metaanin höyryreformoinnilla tai hiilen kaasutuksella, mutta siihen sisältyy hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Sinisen vedyn tuottaminen ei kuitenkaan ole päästötöntä, sillä kaikkea hiilidioksidia ei pystytä keräämään ja osa hiilidioksidista vapautuu vedyn tuotannon aikana. (Howarth et al., 2021) Vihreän vedyn tuottaminen tapahtuu hiilineutraalisti eli hiilidioksidia ei pääse lainkaan ilmakehään. Harmaa vety tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, jolloin ilmakehään vapautuu ilmastomuutosta edistäviä päästöjä. Arviolta noin 95 prosenttia tuotetusta vedystä valmistetaan fossiilisten polttoaineiden avulla, mikä tuottaa hiilidioksidipäästöjä (Chi and Yu, 2018).

2.2 Veden elektrolyysi

Veden elektrolyysissä vesi pilkkotaan sähköenergian avulla vedyksi ja hapeksi. Yleisimpiä elektrolyysitekniikoita tuottaa vetyä ovat alkalielektrolyysi, polymeerielektrolyysi ja kiinteäoksidielektrolyysi. Elektrolyysitekniikoiden välillä toimintaperiaate on sama, mutta materiaalit ja toimintaolosuhteet vaihtelevat. (Chi and Yu, 2018) Veden elektrolyysi on vanhaa tekniikkaa. Ensimmäinen oikea veden elektrolyysin tutkinta alkoi englantilaisten tutkijoiden William Nicholsonin ja Anthony Carlislen toimesta vuonna 1780 kuparielektrodilla. Kuukautta myöhemmin Johann Wilhelm Ritter onnistui keräämään vedyn ja hapen erikseen, joten lopputuloksena oli aito veden elektrolyysi.

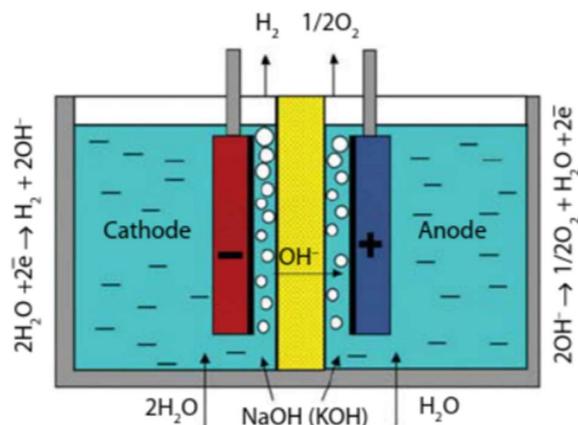
Veden hajottaminen vedyksi ja hapeksi on endoterminen reaktio eli se tarvitsee lämpöä reaktion tapahtumiseen. Yleisesti veden elektrolyysille pätee kaava:



(Marini et al., 2012). Veden hajoamisreaktion entalpiamuutos on 286 kJ/mol (Li et al., 2022). Vaikka elektrolyysiprosessi on ekologinen eikä aiheuta kasvihuonekaasuja, elektrolyysi vaatii paljon energiaa. Tällöin elektrolyysin energiatehokkuus on noin 50–70 prosenttia. Alkalielektrolyysikenoilla on laajin osuus markkinoilla muihin kennoihin verrattuna. PEM-kennot ovat viime vuosina kehittyneet, ja tulevat mahdollisesti nousemaan alkalikenojen edelle. (Sankir and Sankir, 2017)

2.2.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysissä elektrolyyttinä toimii yleensä kaliumhydroksidi tai natriumhydroksidi. Tyypillinen operointilämpötila on 60–80°C. Alkalielektrolyysi käynnistyy hitaasti, mikä vaikeuttaa alkalielektrolyysin käyttöä uusiutuvien energialähteiden vaihteleviin ominaisuuksiin. Tuotetun vedyn puhtaus on noin 99 prosenttia, mutta alkalisuus pitää poistaa desorptiolla. (Chi and Yu, 2018) Räjähdysvaaraa pienentävät elektrodien välissä käytetyt huokoiset kalvot, jotka estävät reaktiotuotteiden sekoittumisen. Elektrodit asetetaan molemmille puolille kalvoa, ja niiden väliin jäävä etäisyys on korkeintaan muutaman millimetrin. Kalvot on aiemmin tehty esimerkiksi asbestista tai sementistä. Nämä materiaalit eivät onnistu täysin estämään kaasujen sekoittumista tai sen aiheuttamaa räjähdystä. Lisäksi asbesti on myrkyllinen materiaali, joten nykyään käytetään polymeerikalvoja. Huokoiset kalvot rajoittavat alkalikennon operointipainetta, mikä vähentää kaasujen puhtautta ja lisää räjähdysvaaraa.



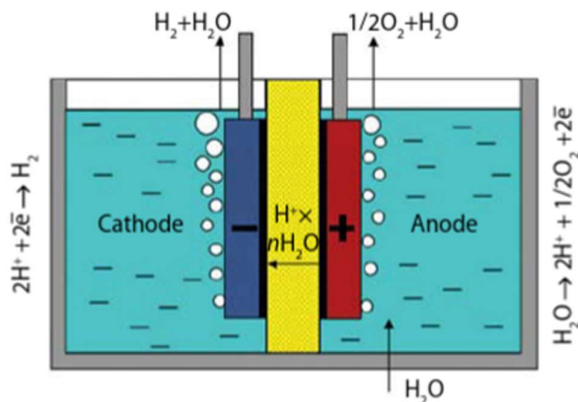
Kuva 1. Alkalielektrolyysikennon rakenne (Sankir and Sankir, 2017)

Anodilla ja katodilla tapahtuvat osareaktiot ovat luettavissa kuvasta 1. Elektroodin ja kalvon väliin muodostuvat happi- ja vetykuplat on havainnollistettu kuvassa 1. Virrantiheyden kasvaessa kuplat korvaavat suuren osan elektrolyytistä, mikä rajoittaa virrantiheyden arvon 200–400 mA/cm². Terästä käytetään päämateriaalina, ja elektrodit ovat usein valmistettu teräksestä, joka on päällystetty Raney-nikkelillä. Raney-metallista on poistettu toinen metalli seoksesta, tässä tapauksessa on poistettu esimerkiksi sinkki, jolloin jäljelle jää huokoinen nikkelimateriaali. (Sankir and Sankir, 2017) Suurin osa alkalielektrolyysikennoista rakennetaan käyttäen bipolaarilevyjä, jotka ovat liittävätkä kennot toisiinsa. Stack-kasatussa rakenteessa kennoja ja levyjä on pinottu useita päällekkäin. Yksi stack-rakenne maksaa 242–388 €/kW (Krishnan et al., 2023). Alkalikennoihin on kehitelty katalyyttejä, jotka ovat halvempia kuin jalometallit, kuten platina. Näitä katalyyttejä ovat esimerkiksi Ni₃Fe-oksidi, NiMo-seokset ja hybridikobolttinanolevy. Alkalielektrolyysin haasteita ovat alhainen käyttöpaine, kestävyys sekä korkeat kustannukset johtuen alkalien syövyttävyydestä. (Dahiru et al., 2022)

2.2.2 PEM-elektrolyysi

PEM-teknologia, tunnetaan myös nimellä protoninvaihtomembraani (Milka, n.d.), kehitettiin alun perin polttokennoja ja niin sanottua kloorielektrolyysiä varten. Kalvo, joka erottaa anodi- ja katodipuolen toisistaan on hyvin ohut, noin 100–200 µm. Sen materiaalina käytetään yleensä erilaisia nafionmateriaaleja. Kalvoa voidaan vahvistaa puristamalla elektrodit kalvoon kiinni molemmilta puolilta. Tällaista kokonaisuutta kutsutaan "zero-gap"-malliksi. PEM-elektrolyysi on matalalämpötilareaktio niin kuin alkalikeno, ja sen operointilämpötila on 60–80°C (Corti, 2022). Yksi stack-rakenne maksaa 384-1071 €/kW (Krishnan et al., 2023). PEM-elektrolyysikennossa MEA:t (membrane electrode assembly) painetaan bipolaarilevyjen väliin. Lyhenne MEA tarkoittaa

taa anodista, katodista ja elektrolyytistä koostuvan yksikkökennon kokonaisuutta. MEA on upotettu puhtaaseen veteen, jossa kalvo turpoaa ja sulfo-ryhmät hajoavat. Bipolaarilevyissä on kanavia, joista vesi ja kaasut pääsevät kulkemaan. Lisäksi levyt toimivat kokonaisuuden tukirakenteena.

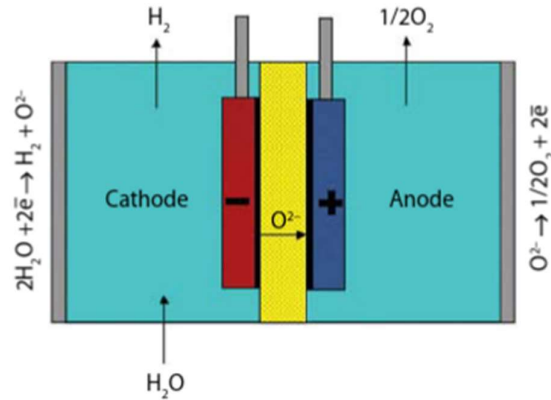


Kuva 2. PEM-elektrolyysikennon rakenne (Sankir and Sankir, 2017)

PEM-elektrolyysikennoa, ja siinä tapahtuvia reaktioita on havainnollistettu kuvassa 2. Siitä voidaan nähdä, kuinka elektrodi ja kalvo ovat tiukasti kiinni toisissaan. Kennossa käytetään kiinteää polymeerikalvoa nestemäisen elektrolyytin sijasta (Dahiru et al., 2022). Kalvon pinnalle lisätään katalyyttikerros, jotta pystytään operoimaan korkeammilla virrantiheyksillä. Katalyyttikerros on sekoitus katalyyttiä ja ioninvaihtomateriaalia, joka on yleensä sama kuin kalvo itse. Koska protonit pysyvät kalvon sisällä, sen happamuus on hyvin korkea, mikä aiheuttaa elektrodien korroosiota. Katalyytteinä voidaan käyttää vain jalometalleja, yleisin on platina, minkä vuoksi PEM-elektrolyysiteknologia on melko kallista. (Sankir and Sankir, 2017) PEM-elektrolyysin etuja ovat muun muassa nopeampi kylmäkäynnistys, ja parempi joustavuus sekä kytkentä järjestelmiin verrattuna alkaliteknologiaan. Jotta prosessista saataisiin kaikilta osalta kannattavampi kuin muut elektrolyysiteknikat, PEM-elektrolyysille tulisi kehittää sopivia katalyyttejä muista materiaaleista kuin jalometalleista. (Dahiru et al., 2022)

2.2.3 Kiinteäoksidielektrolyysi

Kiinteäoksidikennon toiminta perustuu oksidi-ionien johtavuuteen. Kiinteäoksidielektrolyysi on korkeanlämpötilanelektrolyyseistä kehitetyin tekniikka. Se toimii 800–1000 °C lämpötilassa, mikä aiheuttaa paremman hyötysuhteen verrattuna alkali- ja PEM-elektrolyysikennoon. Korkean lämpötilan huonona puolena on materiaalin hajoaminen sekä haasteet käytettäessä vaihtovirtaa. Sähkökuorman muuttuessa lämpöä häviää, mikä aiheuttaa mikrohalkeamia kalvoon lyhenteen elektrolysaattorin käyttöikä. (Dahiru et al., 2022)



Kuva 3. Kiinteäoksidielektrolyysikennon rakenne (Sankir and Sankir, 2017)

Kennon rakennetta kuvataan kuvassa 3, jossa nähdään oksidi-ionien liikkuminen katodilta anodille. Elektrolyytinä toimii oksidi-ioneja johtava keraaminen materiaali, joka on usein yttrium- ja skandiumoksideilla tasapainotettu zirkoniumoksidi. Kyseisen elektrolyytin vastus on paljon suurempi kuin alkalivaihtoehdoissa, joten vähentääkseen ohmisia häviöitä, tarvitaan ohuita keraamisia levyjä (30–150 μm). Korkeanlämpötilakennoja on kaksi eri päämallia: putkimainen, jossa elektrolyytti on putkimaisessa muodossa ja tasomainen, joka muistuttaa PEM-elektrolyysikennoa. Pääkomponentit ovat kiinteä elektrolyytti, elektrodit ja niin sanotut liittimet, jotka yhdistävät yksittäiset kennot toisiinsa. Koska operoidaan korkeissa lämpötiloissa, katalyytin käyttäminen ei ole vaadittua. Kiinteäoksidikenoissa on korkea virrantiheys ja hyötysuhde, joka on lähellä 100 prosenttia. Korkean operointilämpötilan ansiosta sähkökemialliset prosessit ovat täysin reversiibeitä ja kennot voivat toimia poltto- tai elektrolyysikennoina. Kiinteäoksidikenojen yksi isoimmista ongelmista on niiden hajoaminen johtuen materiaalien eri lämpölaajenemiskertoimista. Hajoamisnopeus on jopa kennotehokkuutta tärkeämpi indikaattori kennojen kehittämisessä. (Sankir and Sankir, 2017)

2.3 Elektrolyysitekniikoiden yhteenveto

Edellisessä aluvussa esiteltiin kolme yleisintä elektrolyysitekniikkaa ja niiden tunnuspiirteitä. Taulukossa 1 on listattu oleellisia asioita, jotta voidaan vertailla tekniikan näkökulmasta elektrolyyseyä. Taulukko 1 on tiivistelmä työssä mainituista ominaisuuksista.

Taulukko 1. Elektrolyysitekniikoiden tiivistelmä

	Alkalielektrolyysi	PEM-elektrolyysi	Kiinteäoksidielektrolyysi
Lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	60–80	60–80	800–1000

<i>Elektrolyytti</i>	KOH	Kiinteä polymeeri- kalvo	ZrO ₂
<i>Katalyytti</i>	Ni ₃ Fe-oksidi jne.	Platina	-
<i>Haasteet</i>	Pieni virranti- heys, Alkalin syövyttä- vyys Alhainen käyttö- paine	Elektrodien kor- roosio, Katalyytit kalliita jalometalleja	Materiaalin hajoami- nen, Haasteet vaihtovir- ran kanssa aiheuttavat mikrohalkeamia
<i>Hyödyt</i>	Ei jaloja materi- aaleja Alhainen hinta (242–388 €/kW)	Nopea kylmäkäyn- nistys, Parempi kytkentä järjestelmiin kuin alka- likennolla	Korkea hyötysuhde (lähes 100 %), Reaktiot reversiibe- leitä

Taulukon 1 perusteella voidaan vertailla elektrolyysiteknikoita keskenään. Nähdään, että taloudelliselta kannalta alkali-elektrolyysi on kannattavin. Toisaalta kiinteäoksidielektrolyysissä päästään korkeaan hyötysuhteeseen, mutta samalla materiaalit joutuvat kestäämään paljon. PEM-elektrolyysissä katalyytti on kallis, mutta kytkentä onnistuu paremmin verrattuna muihin.

2.4 Power-to-X tekniikka ja lopputuotteet

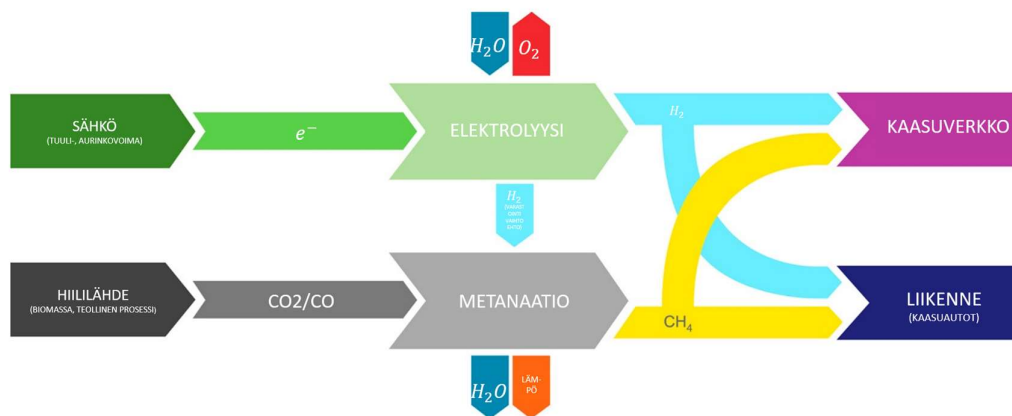
Uusiutuvien energialähteiden tuotanto vaihtelee vuorokausi- ja vuositasolla jonkin verran. Jotta tarjonta ja kysyntä saataisiin tasapainotettua, tarvitaan uusia teknologioita, joilla saadaan joustavuutta rakenteeseen. Power-to-X-teknologiassa on tarkoitus pyrkiä hiilineutraaliin energi-
antuantomuotoon. Sähkön lähteenä käytetään esimerkiksi tuulivoimasta ylijäänyttä sähköä, jota ei tarvitse syöttää valtaverkkoon vaan voidaan käyttää vedyn tuottamiseen (F et al., 2022) Power-to-X-konseptissa "X" viittaa siihen minkälaisia lopputuotteita valmistetaan. Energiatuotteet voivat olla esimerkiksi kaasuja, nesteitä tai lämpöä. Power-to-X-prosessien tavoite on hyödyntää puhtaasti tuotetun sähkön ympäristö- ja taloudellista potentiaalia. Tämä sisältää kaasujen ja nesteiden tuottamisen uusiutuvalla sähköenergialla kuin myös lämmön tuottamisen tarkoituksella korvata fossiilipohjaiset tuotteet. (Burre et al., 2020) Power-to-X-teknologiassa voidaan käyttää vetyä sellaisenaan energiatuotteena tai yhdistää siihen muita aineita, kuten hiilivetyjä, ja muodostaa eri lopputuotteita.

Kun veden elektrolyysissä tuotettu vety yhdistetään hiilimonoksidiin tai hiilidioksidiin metaaniolla, saadaan lopputuloksena metaania (CH_4). Reaktioyhtälö voidaan yksinkertaisuudessaan esittää



Reaktio on eksoterminen ja sen entalpia on -206 kJ/mol . (Methanation - an overview | ScienceDirect Topics, n.d.) Todellisuudessa monta eri reaktiota liittyy metanaatioon. Tuotettua metaania kutsutaan myös maakaasun korvikkeeksi (SNG). Synteettinen metaani voidaan syöttää jo olemassa olevaan kaasuputkistoon tai kaasuvärsästöihin, käyttää moottoripolttoaineena (tällöin CNG eli paineistettuna maakaasuna) tai hyödyntää maakaasulaitoksissa. Matala hyötysuhde ja korkeat kulut ovat suurimmat haasteet tällaisessa Power-to-Gas-teknologiassa. Metanaatio vaatii hiilidioksidia, minkä vuoksi sen rakentaminen jo olemassa olevan laitoksen viereen olisi järkevä ratkaisu.

Ensimmäinen Power-to-Gas-prosessiketju esitettiin Japanissa 1980–1990 luvuilla. Kiinnostus teknologiaa kohtaan on kasvanut viime vuosina varsinkin Euroopassa tuuli- ja aurinkovoiman lisääntyessä.



Kuva 4. Synteettisen metaanin tuottaminen Power-to-X-teknologialla (Götz et al., 2016)

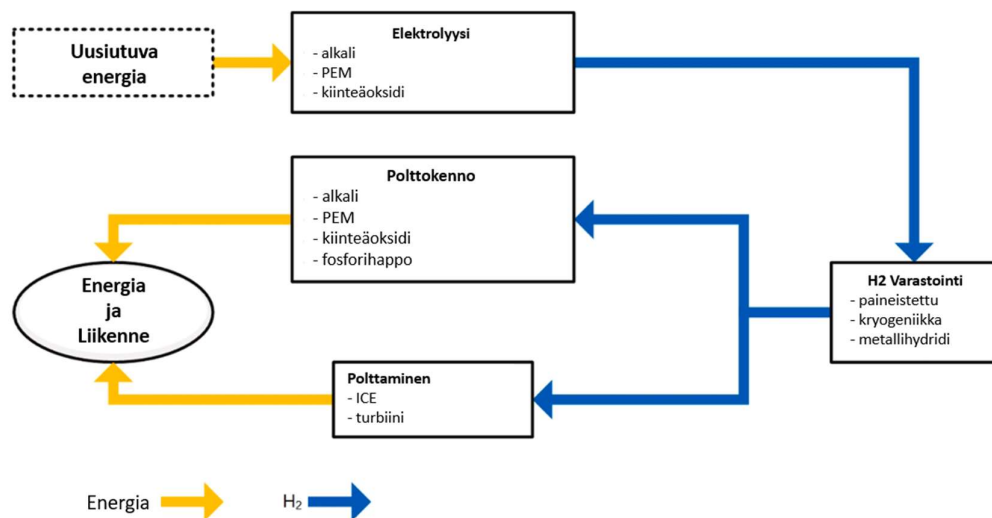
Synteettisen metaanin tuottaminen Power-to-X-teknologialla on havainnollistettu kuvassa 4. Siinä veden elektrolyysissä on irrotettu vety ja happi toisistaan, minkä jälkeen voidaan suorittaa metanaatio. Lopputuloksena saatua metaania tai elektrolyysissä tuotettua vetyä voidaan käyttää kaasuverkostossa tai liikennesektorissa hyödyksi. Paineistettua metaania eli CNG:tä käytetään henkilöautoissa, rekoissa ja busseissa. (Götz et al., 2016)

Power-to-X-tekniikalla voidaan tuottaa ammoniakkia, kun vety yhdistetään hiilidioksidin sijasta typen kanssa. Tämä prosessi tuottaa vettä ja tyypeä sisältäviä molekyylejä, joista osa pitää ottaa talteen. Kuten metanolia, ammoniakkia voidaan helposti varastoida nestemäisenä, ja käyttää tarvittaessa tehon tai lämmön tuottamiseen polttokennojen tai polttamisteknologioiden

avulla. (Palys and Daoutidis, 2022) Ammoniakin tuoton etuna hiilipohjaisiin energiatuotteisiin verrattuna on se, että ilmakehässä on runsaasti typpeä, jota voidaan käyttää hyväksi. Metanaatio puolestaan vaatii hiilidioksidia, jonka erottaminen ilmakehästä ei ole yhtä edullista kuin typen. Ammoniakkia voidaan polttaa mäntämootoreissa tai kaasuturbiineissa. Ammoniakin lämpöarvo on 22.5 MJ/kg, joka on puolet dieselin lämpöarvosta. Käyttäminen suoraan perinteisiin otto-mootoreihin on hankalaa sen kapean syttymisalueen vuoksi, mutta ammoniakkikäyttöisiä moottoreita on rakennettu jo toiseen maailmansotaan. Toisaalta ammoniakin matala oktaaniluku ja liekin matala lämpötila sallivat korkean puristussuhteen käytön ilman suuria NO_x-päästöjä. (Afif et al., 2016) Ammoniakin suurin haaste on sen myrkyllisyys, mutta oikeilla käsittelytavoilla tämä ei osoittaudu ongelmaksi. Ammoniakin varastoinnille ja kuljettamiselle on olemassa valmis infrastruktuuri. (Ikäheimo et al., 2018)

Ammoniakin ja metaanin lisäksi voidaan Power-to-X-tekniologialla tuottaa metanolia. Sitä valmistetaan yhdistämällä vetyä ja hiilidioksidia toisiinsa. Metanolisynteessissä elektrolyysillä tuotettu vety ja kerätty hiilidioksidi muodostavat metanolia ja vettä. Vesi voidaan uudelleen ohjata elektrolyysiin, jossa voidaan tuottaa vetyä prosessin käyttöön. (Bos et al., 2020) Metanoli voidaan jalostaa eteenpäin bensaksi, dieseliksi tai kerosiiniksi erilaisilla synteeseillä. Metanolin varastointi ja kuljetus on helppoa sekä taloudellista. Vaikka metanoli on normaaliolosuhteissa kaasua, sen nesteyttäminen on helppoa.

Metanolilla on korkea energiatiheys, mikä tekee siitä loistavan energiankuljettajan ja täten tärkeän raaka-aineen energiateollisuudelle. Sitä voidaan käyttää suoraan polttamiseen tai sähköntuottamiseen turbiineilla. Metanoli sisältää 60 % vähemmän energiaa massaan suhteutettuna verrattuna metaaniin, minkä vuoksi polttoainetta pitää syöttää enemmän. Koska metanolin syttymislämpötila on korkeampi kuin metaaniin, tarvitaan palamista parantavia aineita. (Palys and Daoutidis, 2022)



Kuva 5. Power-to-Hydrogen-tekniologiaa havainnollistava kuva (Palys and Daoutidis, 2022)

Kun vetyä ei jatkojalosteta elektrolyysin jälkeen, kutsutaan tekniologiaa Power-to-Hydrogen. Kuva 5 havainnollistaa vedyn jatkokäyttömahdollisuuksia Power-to-Hydrogen-tekniologiassa. Vetyä voidaan syöttää kaasuverkostoon, mutta sen määrää putkistossa on rajoitettu valtioiden standardien ja määräysten mukaan. Tilavuusprosentti vaihtelee 0–12 valtion säädösten mukaan. Vetyä voidaan käyttää polttoaineena polttokennoissa, esimerkiksi polttokennoautoissa. Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuntaa kemiallisen energian suoraan sähköksi. Se voidaan kytkeä suoraan verkkoon tai kennot voivat toimia itsenäisinä yksikköinä. Polttokennon toiminta vastaa paljon tavallista akkua, mutta sen toiminta kestää niin kauan kuin polttoainetta eli vetyä ja happea riittää, eikä sitä voi ladata uudelleen.

Power-to-Gas-järjestelmille yksi haaste on vedyn väliaikainen varastointi, koska toiminta ei ole jatkuva. Vedyn varastointitapoja on muun muassa metallihydridivarasto, painekaasusäiliöt ja maanalainen varastointi suolaluoliin. Vetyä voidaan varastoida lisäksi kryogeenisena nesteenä, mutta se ei ole yhtä energiatehokas vaihtoehto kuin muut edellä mainitut. (Götz et al., 2016) Painekaasusäiliöt ovat kehittynein varastointimuoto. Ympäristön lämpötilassa oleva vety puristetaan 200–1000 baariin. Suolaluolavarastointi tehdään noin 200 baarin paineessa, ja se on edullisempaa kuin vedyn varastointi alukseen. Haittapuolena on, että suolaluolia ei välttämättä ole Power-to-Hydrogen-tekniologialle toivotuilla alueilla. Kustannusten perusteella metallihydridin käyttö tulisi kaikista edullisimmaksi. Vetyä voidaan polttaa myös energiansyöttö- ja kuljetussovelluksissa. Perinteisiä polttojärjestelmiä muunnetaan vedyn kanssa sopivaksi sen suuremman liekinopeuden ja korkeamman palamislämpötilan vuoksi. Korkeat lämpötilat lisäävät NO_x-päästöjä, minkä vuoksi tarvitaan niiden keräämisen tehostamista. NO_x eli typenoksidit ovat hiilidioksidia vahvempia kasvihuonekaasuja, jotka edistävät nopeasti ilmastonmuutosta. (Palys and Daoutidis, 2022)

Taulukko 2. Energiantajat

	Metaani (CH ₄)	Ammoniakki (NH ₃)	Metanoli (CH ₃ OH)	Vety (H ₂)
Edut	Voidaan syöttää olemassa olevaan kaasuputkistoon, käyttää moottoripolttoaineena ja maakaasulaitoksissa	Voidaan varastoida nestemäisenä, Typeä on paljon saatavilla ilmakehässä, Olemassa oleva infra kuljetamiseen ja varastointiin	Voidaan jatkojalostaa eri polttoaineiksi, Varastointi ja kuljetus helppoa, Suuri energiatiheys	Voidaan käyttää polttokennoissa tai syöttää kaasuverkostoon sääntöjen mukaan

<i>Haasteet</i>	Matala hyötysuhde, Korkeat kulut, Vedyn väliaikainen varastointi	Myrkyllisyys NO _x -päästöt polttosovelluksissa	Korkea syttämislämpötila, Alhaisempi energiatiheys massaan suhteutettuna kuin metaanilla	Tarvitaan varastointi, Matala energiatiheys tilavuutta kohden
-----------------	--	---	---	--

Taulukkoon 2 on listattu esiteltyt Power-to-X-lopputuotteet ja niiden edut sekä huonot puolet. Taulukon 2 yhteenvedon avulla voidaan vertailla energiatuotteita toisiinsa nähden.

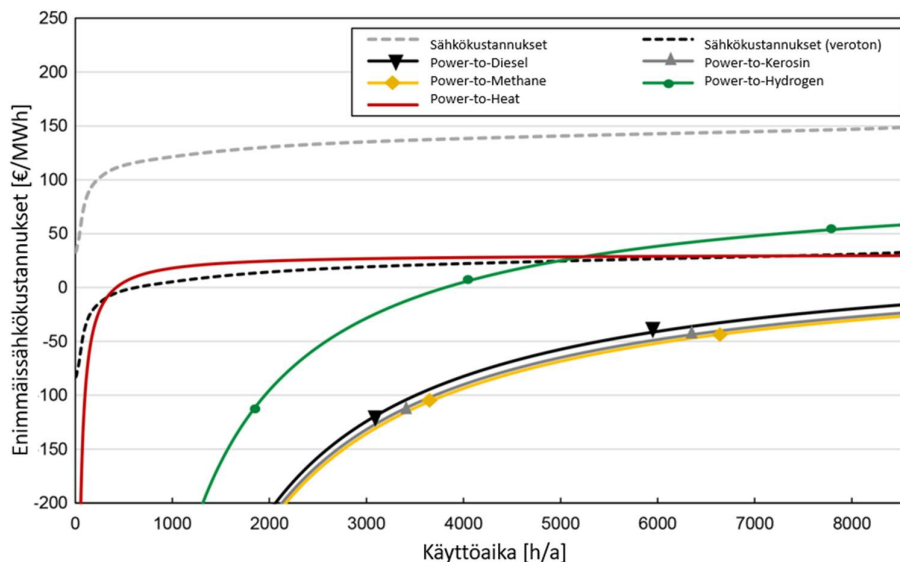
3. POWER-TO-X KUSTANNUKSET

Vedyn käyttäminen polttoaineena aiheuttaa tällä hetkellä enemmän kustannuksia kuin fossiilisten polttoaineiden käyttö. Yksi suuri kustannuksia aiheuttava tekijä on infrastruktuurin puute. Power-to-X-tekniikka vaatii uuden laitteiston prosessien toteuttamiseen ja tuotteiden hyödyntämiseen, sillä tuotteet ovat ominaisuuksiltaan erilaisia kuin esimerkiksi fossiiliset polttoaineet. Tässä luvussa käsitellään ja pohditaan, millaisia kustannuksia power-to-x-tekniikka tuottaa.

Power-to-X-prosessin kustannukset riippuvat useasta eri kokonaisuudesta. Elektrolyysi on energiantensiivinen prosessi eli se vaatii paljon energiaa, mikä vuoksi se on merkittävä osa power-to-x-prosessia. Elektrolyyttikemien hinnat vaihtelevat pääasiassa materiaalin ja tuotanto-olosuhteiden perusteella. Elektrolyysissä käytettävän sähkön markkinahinta ja verotus vaikuttaa elektrolyysin hintaan. Vähentämällä kalliiden katalyyttien käyttöä, elektrolyysin hintaa on saatu laskettua alaspäin.

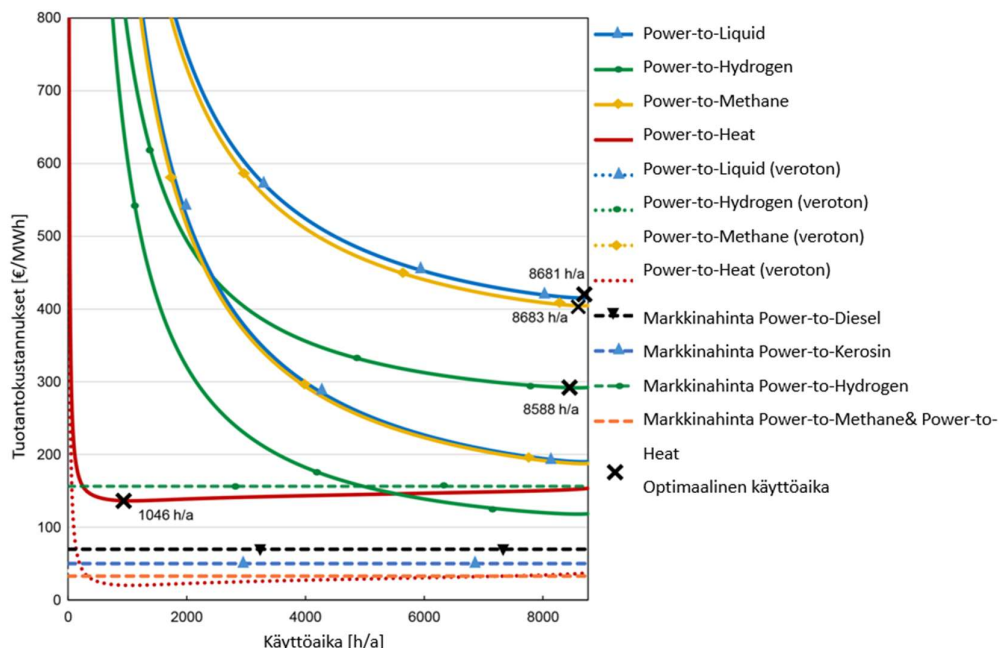
Alkalikennon investointikustannukset ovat muihin verrattuna pienemmät. Syynä tälle on esimerkiksi, että alkalikennotekniikka on varhaisinta ja täten pisimmälle kehittyneintä kuin taas PEM-kennot ovat uusinta elektrolyysitekniikkaa. Kiinteäoksidikennossa toimintalämpötila on hyvin korkea, mikä aiheuttaa materiaaleille korkeita kriteereitä lisäten samalla kustannuksia. Jos elektrolysaattorilla on korkea käyttöaste, sen osuus vedyn tuotantokustannuksista vähenee. Toisaalta korkea käyttöaste kuluttaa sähköä, mikä aiheuttaa kustannuksia, varsinkin markkinahinnan ollessa korkea. Täten käyttöaste tulee tasapainottaa sähkön hinnan kanssa niin, että saadaan mahdollisimman edullinen tilanne. Alhaisimpiin vedyn tuotantokustannuksiin johtavan elektrolysaattorin optimaalinen käyttöaika on noin 3000–6000 h. Kun käyttöaika on alle 2000 tuntia, pääomakustannukset alkavat dominoida tuotantokustannuksia. (Hydrogen Production Cost - an overview | ScienceDirect Topics, n.d.)

Power-to-X-tekniikassa käytetään uusiutuvaa sähköenergiälähdettä elektrolyysiin, mikä aiheuttaa kokonaiskustannuksia energiatuotteille. Aurinko- ja tuulivoiman tuotantokapasiteetit ovat lisääntyneet viimeisen vuosikymmenen ajan paljon. Tuotannon lisääntyminen on aiheuttanut hintojen laskua, mikä vuoksi tuulivoiman hinta on kilpailukykyinen fossiilisten polttoaineiden kanssa. Power-to-X-tekniikat tulevat todennäköisesti markkinoille vain hintaohjatun toiminnan avulla. Jos järjestelmä vapautetaan tietyistä maksuista, sähköä voidaan ostaa parhaillaan negatiivisilla hinnoilla. Tällöin on kuitenkin olemassa riski, että sähköntuotanto lisääntyy entisestään negatiivisten tai alhaisten hintojen vuoksi.



Kuva 6. Power-to-X-tekniikoiden enimmäissähköhankintakustannukset suhteessa käyttöaikaan (Drünert et al., 2019)

Kuvassa 6 on esitetty viiden eri Power-to-X-järjestelmän enimmäissähköhankintakustannukset käyttötuntien mukaan ilman veroja ja verotuksen kanssa. Kuvan 6 kuvaajassa lähtöarvoina on käytetty käyttötuntiriippuvaisia sähkön ostokustannuksia, jotka muodostuvat EPEX spot -markkinoiden 2017 vuoden keskimääräisestä sähkön hinnasta ja valtion maksuista. Jos ei huomioida huolto- ja vuosiseisakkeja laitoksella ja oletetaan käyttötuntien olevan 8760 h/a, Power-to-Hydrogen-järjestelmälle saadaan keskimääräiseksi sähköhankintakustannukseksi 59 €/MWh. Power-to-Liquid tuotannolle eli tässä tapauksessa kerosiinille ja dieselille sähköhankintakustannuksiksi tulee täysajolla -22 €/MWh ja -14 €/MWh. Ainoastaan Power-to-Heat- ja Power-to-Hydrogen-järjestelmät voisivat kuvan 6 perusteella tuottaa, jos ylijäämäsähköä ostettaessa ei peritä veroja tai verkkomaksua.



Kuva 7. Power-to-X-tekniikoiden tuotantokustannukset suhteessa käyttöaikaan (Drünert et al., 2019)

Kuvassa 7 on tuotteen markkinahinta ja tarvittava myyntiarvo kustannusten kattamiseen käyttötuntien aikana, kun ostetaan sähköä spot-markkinoilta (2019 vuodelta). Tuotantokustannukset ovat esitetty verojen kanssa ja ilman. Järjestelmän toiminta on kustannustehokasta, jos markkinahinta on vähintään yhtä paljon kuin tuotantokustannukset. Kuvan 7 perusteella voidaan tulkita, että yksikään järjestelmä ei pysty kattamaan kustannuksia, kun sähkö ostetaan EPEX-spot-markkinoilta. Tuotantokustannukset pystytään kattamaan vain Power-to-Hydrogen- ja Power-to-Heat-järjestelmillä, kun valtion veroja ei huomioida laskuissa. Tämä on luettavissa niin kuvasta 6 kuin 7.

Kuvat 6 ja 7 on määritetty Saksalle käyttäen EPEX spot -markkinoiden eli Euroopan sähköpörssin sähköhintoja. Saksassa on paljon uusiutuvaa energiaa, varsinkin tuulivoimaa, mikä tekee siitä otollisen valtion rakentaa Power-to-X-järjestelmiä. Näiden kuvien tietoja voidaan siis verrata muuhun Eurooppaan tietyissä määrin, kun yhtälöihin sovelletaan valtiokohtaista verotukset ja muut maksut.

Taulukko 3. Yhteenveto energiatuotteiden tunnusluvuista kuvien 6 ja 7 perusteella

Power-to-Hydrogen	Power-to-Methane	Power-to-Heat	Power-to-Liquid

<i>Optimaalinen käyttöaika [h/a]</i>	8590	8680	1046	8680
<i>Alhaisimmat tuotantokustannukset [€/MWh] (verollinen/veroton)</i>	292 / 118	404 / 187	136 / 20	415 / 190

Taulukon 3 perusteella huomataan optimaalisen käyttöajan vuodessa olevan liki ympärivuotista. Järjestelmien välillä ei ole paljoa eroa, paitsi Power-to-Heat-järjestelmän kohdalla. Tuotantokustannukset ovat samoissa lukemissa hiilivetytuotteilla, mutta selkeästi alhaisemmat pelkän vedyn kohdalla. Ostetun sähkön verotus vaikuttaa hyvin paljon tuotantokustannuksiin, sillä laitokset käyttävät paljon sähköä. Tuloksien määrittämisessä on käytetty PEM-elektrolysaattoria.

Vedyn myyntihinnan vertailuarvo määräytyy muiden nestemäisten polttoaineiden, kuten bensiinin tai dieselin mukaan ja on täten yhteydessä myös öljyn hintaan. Tämä tekee liikenne-sektorista taloudellisesti kaikista houkuttelevimman vedylle. Lämmityspuolella vedyn myyntihinnan vertailuarvo asetetaan esimerkiksi maakaasun hinnan mukaan. Kun vety sekoitetaan maakaasuverkkoon tai sitä käytetään raaka-aineena teollisuudessa, se ei ole yhtä kustannuskilpailukykyinen nykyisten energia- ja CO₂ -hintajärjestelmien tai nykyisen sääntelyn mukaan. (Hydrogen Production Cost - an overview | ScienceDirect Topics, n.d.) Vaikka vihreä vety ei ole kilpailukykyinen vielä harmaan vedyn kanssa, uusiutuvia energialähteitä asennetaan koko ajan lisää. Tämä lisää vihreän vedyn potentiaalia korvata harmaa vety tulevaisuudessa, varsinkin jos asetetaan poliittisia tavoitteita ja asetuksia.

Taulukko 4. Power-to-X-järjestelmien hyötysuhteet

	<i>Power-to-Hydrogen</i>	<i>Power-to-Methanol</i>	<i>Power-to-Methane</i>	<i>Power-to-Ammonia</i>
<i>Hyötysuhde [%]</i>	61.5	52.7	45	51.4

Taulukkoon 4 on listattu eri Power-to-X-tekniikoiden hyötysuhteet. Tässä tutkimuksessa kaikki elektrolysaattorit on asennettu samankokoiseksi tuottamaan 10 MW tehoa. Tutkimuksessa on käytetty PEM-elektrolysaattoria 30 bar paineessa. Elektrolysaattorit aiheuttavat suurimman osan energiahäviöistä. Taulukon 4 perusteella Power-to-Hydrogen saavuttaa parhaimman hyötysuhteen, kun taas Power-to-Methanol alhaisimman hyötysuhteen.

Power-to-Hydrogen-prosessissa on korkeampi hyötysuhde kuin muiden energiatuotteiden prosesseissa, koska reaktioketju on lyhyempi. Metanolin ja ammoniakkin hyötysuhteet ovat keskenään melko samansuuruiset. Metaanin hyötysuhde on huonoin johtuen suuremmasta energi-ankulutuksesta ja tuotetun polttoaineen alhaisemmasta energiasisällöstä. Power-to-Methane-prosessi vaatii hiilidioksidia, joka voidaan ostaa esimerkiksi viereiseltä lämpölaitokselta. Prosessin layoutiin kuuluu myös metanaatioreaktori ja varasto tuotetun kaasun puristukseen sekä säilytykseen. Hiilidioksidin ostaminen metanolin ja metaanin tuotannossa maksaa enemmän kuin typen ostaminen ammoniakkin tuottamisessa. (Bellotti et al., 2022)

Power-to-Hydrogen-prosessin kokonaiskustannuksista noin 90 % koostuu tuotantokustannuksista, ja loput 10 % koostuu vedyn varastoinnista ja puristamisesta. Muiden energiatuotteiden kohdalla kustannukset koostuvat myös synteesiyksiköstä, jossa vety jatkojalostetaan halutuksi lopputuotteeksi.

Taulukko 5. Polttoaineen tuotantokustannukset eri Power-to-X ratkaisuille (Bellotti et al., 2022)

	<i>Power-to-Hydrogen</i>	<i>Power-to-Ammonia</i>	<i>Power-to-Methanol</i>	<i>Power-to-Gas (Methane)</i>
<i>Tuotantokustannukset (O₂-myynnin kanssa) [€/MWh]</i>	140	170	160	190
<i>Tuotantokustannukset (ilman O₂-myyntiä) [€/MWh]</i>	160	200	190	220
<i>Tuotantokustannukset herkkyysanalyysin ja hapen myynnin kanssa [€/MWh]</i>	175	205	210	250
<i>Sähköntuotantotapa</i>	Biomassa	Biomassa	Biomassa	Biomassa

Taulukkoon 5 on listattu eri Power-to-X-järjestelmien tuotantokustannuksia. Elektrolyysissä syntyy sivutuotteena happea vedyn lisäksi, mikä on otettu huomioon tässä taulukossa. Jos happi myydään eteenpäin, eikä päästetä vain ilmakehään, saadaan kustannuksia noin 15 % vähennettyä jokaisessa tapauksessa. Nykyisten oletusten mukaan tuloksena olevat polttoaineiden kustannukset ovat kuitenkin huomattavasti korkeammat kuin markkinoiden viitearvot. Korkeim-

mat tuotantokustannukset ovat Power-to-Gas-prosessilla, koska energiatehokkuus on alhaisempi verrattuna toisiin prosesseihin. Power-to-Hydrogen-järjestelmä osoittautuu halvimmaksi vaihtoehdoksi, kun tuotantokustannukset hapen myynnin kanssa ovat 140 €/MWh.

Taulukon 5 ensimmäiset kaksi riviä ovat kuitenkin vain yleisellä tasolla tutkittu, ja todellisuudessa toimintaskenaario vaikuttaa voimakkaasti. Jokaiselle versiolle tulee suorittaa herkkyysanalyysi, jotta saadaan todellisempia tuloksia laitosten toteutettavuudesta. Herkkyysanalyysissä otetaan huomioon muun muassa laitoksen käyttöaika, sähkökustannukset, painotettu keskimääräinen pääomakustannus sekä hapen myyntihinta. Tällöin huomataan taulukon 7 tuotantokustannuksissa suuria eroja, ja ilman herkkyysanalyysia saadut tulokset voidaan todeta hyvin harhaanjohtaviksi. Taulukkoon 5 on listattu herkkyysanalyysin huomioivalle riville sellaiset tuotantokustannukset, jotka saadaan parametreilla 8000 h käyttöaika ja 100 €/MWh sähkönhankintakustannukset. Tulokset ovat kuvaajasta luettuja ja siten silmämääräisiä arvoja.

Huomataan, että annettujen parametrien muuttaminen vaikuttaa tuotantokustannusten suuruuteen. Kuitenkin suhteessa toisiinsa Power-to-X-prosessit pysyvät suhteellisen samoissa lukemissa. Kun verrataan taulukon 3 ja 5 arvoja keskenään, päästään jokseenkin lähelle samoja lukemia keskenään samojen prosessien kanssa. Yhteenvetoa voidaan todeta, että prosessin tuotantokustannukset muuttuvat monesta eri parametrista.

Taulukko 6. *Fossiililla polttoaineilla tuotettujen energiakantajien tuotantokustannukset (Hydrogen Production Cost - an overview | ScienceDirect Topics, n.d.), (Innovation Outlook: Renewable Methanol, n.d.), (Ammonia production costs?, n.d.)*

	Vety (höyryreformointi ilman hiilen keräystä)	Metanoli	Ammoniakki	Metaani
Tuotantokustannukset [€/MWh]	59	17–440	37–180	42–76

Taulukosta 6 voidaan lukea energiatuotteiden tuotantokustannuksia, kun tuotteet on valmistettu fossiilisten polttoaineiden avulla. Tuotantokustannukset ovat selkeästi pienemmät kuin Power-to-X-tekniikalla valmistettujen energiatuotteiden. Taulukoidut arvot ovat suuntaa antavia, eikä niihin ole huomioitu kaikkia muuttuvia tekijöitä, kuten laitosten ylös- ja alasajotilanteita. Näissä tilanteissa aiheutuu vaihtelua myös sähkönkäyttöön, mikä tulisi huomioida tarkemmissa laskelmissa.

Uusiutuvat energialähteet ovat epävakaa sähkön lähde niiden luontaisen katkonaisuuden takia, minkä vuoksi Power-to-X on suunniteltu toimivan myös energian varastointiteknologiana uusiutuville energialähteille. Uusiutuvan energian varastointi takaa Power-to-X prosessin kannattavuuden teknisellä tasolla myös maissa, joissa energian saanti on epävarmaa. Energian varastoinnin lisäksi Power-to-X-tekniikalla valmistettuja lopputuotteita voidaan varastoida tai ne

voivat toimia toistensa varastona. Esimerkiksi ammoniakki on hyvä vedyn varastointikeino sen korkean vetypitoisuuden vuoksi, ja ammoniakkin tuottaminen on hiilineutraali prosessi. (Dahiru et al., 2022)

3.1 Energiatuotteiden sovelluskohteita

Polttomoottorigeneraattoreita (ICE) voidaan käyttää energian tuottamiseen sekä kuljettamiseen. Yleensä niitä käytetään huippukuorman tuottamiseen eli hetkinä, jolloin energian tarve on hetkellisesti niin suuri, ettei sitä pystytä tuottamaan peruskuormalaitoksilla. Niitä käytetään lisäksi hätävarana tai kaukotehosovelluksissa. Polttomoottorigeneraattorien käynnistymisaika on paljon pienempi kuin turbiinien. Bensiinikäyttöinen ICE on yleisesti käytetty henkilöauton moottorikonsepti, joten hypoteettisesti se voitaisiin asentaa jälkikäteen tai korvata vetykäyttöisellä moottorilla. Vetykäyttöiset ICE-moottorit tai -generaattorit ovat noin 80–85 prosenttia yhtä tehokkaita kuin bensiinikäyttöinen ICE. Tehohäviöitä voidaan pienentää käyttämällä korkeampia moottorin puristussuhteita. Vety-ICE:n hyötysuhde on alhaisempi kuin polttokennoissa.

Turbiinit tuottavat tehoa muuntamalla kineettistä energiaa liikkuvasta, joko kattilassa polttoaineen palamislämmöllä nostetusta höyrystä tai itse palamistuotekaasuista. Puhdasta vetyä polttoaineena käyttävien sähköisten turbiinien hyötysuhde on 35 prosenttia. Yhdistetyillä kaasuturbiineilla (CCGT = combined cycle gas turbine) voidaan saavuttaa 60 prosentin sähköisen hyötysuhde, jos suorapolttoturbiinin hukkalämpöä käytetään höyrykäyttöisen turbiinin pyörittämiseen. Isot valmistajat ovat ottaneet tavoitteeksi toimittaa 100 % vetykäyttöisiä kaasuturbiineja vuodelle 2030. (Palys and Daoutidis, 2022)

4. MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET

Vety ja muut Power-to-X-energiatuotteet ovat ominaisuuksiltaan monipuolisia, mutta erilaisia kuin fossiiliset polttoaineet. Sen vuoksi niiden käyttöön ottaminen vaatii vuosien tutkimusta ja kokeilua, jotta niitä pystyttäisiin käyttämään suuremmissa mittakaavassa. Tekniikan näkökulmasta tutkittaessa, Power-to-X-teknologia antaa monia uusia mahdollisuuksia ja edistää vihreää tulevaisuutta. Vaikka tekniikka saadaan tarpeeksi toimivaksi kehitettyä, poliittiset ja taloudelliset haasteet tulevat vastaan. Raha ohjaa vahvasti kehityksen suuntaa, ja vielä tällä hetkellä fossiilisten polttoaineiden käyttäminen on halvempaa kuin Power-to-X-energiatuotteiden. Vedyn käyttäminen vaatii uutta infrastruktuuria, käyttökohteiden soveltamista vedylle sopivaksi ja ostajia tuotteelle. Koronaviruksen ja Ukrainan sodan sekä sen vauhdittaman energiakriisin tuomat haasteet siirtävät valtion päättäjien huomiota toisaalle ilmastomuutoksesta. Esimerkiksi maat, jotka omistavat paljon öljyä, eivät ole kovin innokkaita vaihtamaan uusiutuviin energialähteisiin, kun fossiilista polttoaineista saa vielä tänä päivänä tuottoa. Ihmiset ovat yleensä ennakkoluuloisia uusia asioita kohtaan, mikä aiheuttaa haasteita ja epäilyksiä vedyn suhteen.

4.1 Tekniikan näkökulmasta

Power-to-X-järjestelmille yhteistä on uusiutuvan energian saannin vaihtelu. Tämä johtuu siitä, että aurinkoenergia ja tuulivoima ovat herkkiä sääolosuhteiden sekä vuorokauden vaihtelulle. Power-to-X:n potentiaalia voidaan parantaa tutkimalla mahdollisuutta integroida Power-to-X-prosesseja jo olemassa oleviin järjestelmiin. Tällaisen integraation synergiaetuja voidaan hyödyntää taloudellisuuden ja käyttöönoton todennäköisyyden parantamiseksi. Power-to-X-järjestelmät tarjoavat myös ratkaisun energianvarastoinnille sekä mahdollisesti poistavat hiilidioksidipäästöjä tuottaen samalla hiilineutraaleja polttoaineita (Vázquez et al., 2018). (Palys and Daoutidis, 2022)

Power-to-X-teknologialla voidaan valmistaa polttoaineita ja kemikaaleja, kuten synteettistä maakaasua, metanolia, polymeerejä ja erikoiskemikaaleja. Kerosiinin tai muun raskaan polttoaineen tuottaminen hiilidioksidipäästöistä ja uusiutuvasta energiasta on alkanut herättää kiinnostusta, jotta saataisiin sähköistettyä lento- ja raskasliikennesektorit. On arvioitu, että sähkönkulutus Euroopan Unionin sisällä nousisi 10 PWh vuonna 2050 liikennesektorin epäsuoran sähköistämisen myötä. Suurin osa tästä sähköstä käytettäisiin veden elektrolyysiin vedyn tuottamiseksi. (Vázquez et al., 2018) Sähkön kulutuksen kasvu tarkoittaa samaan aikaan sen tuottamisen lisäämistä. Viime vuosina uusiutuvien energialähteiden tuotannon määrä on kasvanut paljon. Suomessa tuulivoiman määrä kasvoi 2430 MW:a ja 437 uutta tuulivoimalaa rakennettiin vuoden 2022 aikana (Tuulivoima Suomessa, n.d.). Toisaalta koko energiarakenne ei voi nojautua pelkän

tuulivoiman varaan ottaen huomioon, että tuulivoiman tuotannosta ei synny verkkoon inertiaa. Inertian puute voi häiriötilanteissa johtaa vakaviin ongelmiin, jos sähköverkko kaatuu kokonaan samalla sekunnilla, kun ongelma muodostuu.

Systeemit, jotka käyttävät vetyä ja ammoniakkia suoriutuvat paremmin kuin systeemit, jotka käyttävät vain yhtä varastointi vaihtoehtoa. Tällaiset systeemit käyttävät vedyn tehokkuutta lyhytaikaiseen tasapainotukseen ja ammoniakkin alhaisempia kustannuksia kausivarastointiin. Energian kuljetuksessa vedyn ja ammoniakkin tai metanolin yhteiskäyttö vähentää 10 prosenttia kustannuksia verrattuna pelkkään vedyn käyttöön. Vetyä ja ammoniakkia voitaisiin käyttää yhdessä uusiutuvassa CHP-laitoksessa. (Palys and Daoutidis, 2022) Vedyn tai muiden Power-to-X-tuotteiden varastona käyttäminen auttaisi tasapainottamaan uusiutuvien energialähteiden stokastista luonnetta sekä takaamaan energiansaamisen silloin, kun sitä tarvitaan. Ylimääräinen tuulienergia voitaisiin varastoida, eikä se menisi hukkaan tuulisina hetkinä. (Burre et al., 2020)

Infrastruktuurin puuttuessa vedyn laajamittaisempaa käyttöönottoa voidaan nopeuttaa hyödyntämällä olemassa olevia maakaasuverkkoja, jotka tarjoavat mahdollisuuden vedyn jakeluun ja varastointiin. Haittapuolena on, että puhtaan eli päästöttömän vedyn hyödyt mitätöityvät, kun vety sekoitetaan metaaniin. Tällä on vaikutuksia polttoainetta käyttäviin ajoneuvoihin, sillä polttimia ja moottoreita joudutaan säätämään, jos vetypitoisuus maakaasussa nousee yli 5 tilavuusprosenttiin. (VTT 2013.) Korkean lämpötilan lämpöpumpun (HTHP) lisääminen Power-to-X-prosesseihin voi nostaa merkittävästi niiden energiatehokkuutta vähentämällä hukkalämpövirtoja. Elektrolyysissä syntynyt lämpövirta voidaan kerätä talteen lämpöpumpulla, ja käyttää esimerkiksi hiilidioksidin talteenottoon.

4.2 Talouden näkökulmasta

Taloudelliset tekijät ovat yksi päähaaste Power-to-X-tekniikan yleistymiselle, koska teknologiaan liittyy suuria pääomainvestointeja. Vedyn tuotantokustannukset ovat noin 150–200 €/MWh, ja täten se on myös halvin esitellyistä Power-to-X-energiatuotteista. Muiden tuotteiden kustannukset nousevat synteisyksiköiden ja muiden laitteiden myötä enimmillään noin 100 €/MWh verrattuna vetyyn. Power-to-X-tekniikassa käytetään uusiutuvaa sähköenergiaa, kuten tuuli- ja aurinkovoimaa, joiden tuotanto vaihtelee vuositason tasolla. Tuotannon vaihtelevuus lisää kustannuksia Power-to-X-laitoksille. Jotta pystytään toimimaan ja saavuttamaan tuotantotavoitteet ajoittain saatavalla energialla, tarvitaan ylimitoitettuja prosessiyksiköitä, varastointiyksiköitä tai molempien yhdistelmää. Esimerkiksi aurinkoenergiaa käyttävä Power-to-X-järjestelmä voisi käyttää vain kemiallista tuotantoa, kun energiaa on saatavilla ja ylimitoittaa prosessiin liittyvät kemialliset prosessit tuotantotavoitteiden saavuttamiseksi. Koska suunnittelussa pitää ottaa huomioon eri näkökulmia verrattuna niin sanotusti perinteisiin energiatuotteiden valmistukseen,

lisäkustannuksia aiheutuu väkisin lisää. Power-to-X-järjestelmän kannattavuuteen vaikuttaa prosessin energiatehokkuus, mutta tehokkuuden parantaminen lisää yleensä kustannuksia. Teknisellä tasolla Power-to-X synteisien tehokkuus riippuu tekijöistä, kuten lämpötila, katalyytit, paine, CO₂ lähde ja reaktoritekniikka (Dahiru et al., 2022). Koko järjestelmän suunnittelu riippuu monesta muuttujasta, kuten hankkeen sijainnista ja laajuudesta, käytettävästä energiasta ja kaikkien prosessien kustannuksista. (Palys and Daoutidis, 2022)

Veden elektrolyysissä erotettu vety käytetään Power-to-X-prosesseissa hyödyksi, mutta sivutuotteena syntynyt happi yleensä päästetään ilmakehään. Jos happi myytäisiin markkinoilla, Power-to-X-prosessin kannattavuus paranisi. Power-to-X-teknologia tarvitsee sähköenergiaa, minkä vuoksi sähkömarkkinoilla on suora vaikutus prosessin kokonaiskustannuksiin. Euroopan Spot-markkinat ovat luonteeltaan dynaamisia ja sähkön tuntihinnat vaihtelevat merkittävästi sesongin mukaan, mikä on yksi haastavimmista tekijöistä Power-to-X-laitosten kaupallisen kannattavuuden kannalta. Etukäteen suunnitellut toimet parantavat Power-to-X-laitosten kannattavuutta taloudellisesti sekä kaupallisesti. (Bokde et al., 2020)

Power-to-X-prosessit ovat hyvin energiantensiivisiä. Tämä tarkoittaa, että ne kuluttavat paljon energiaa, mikä tekee niistä kalliita prosesseja. Täten energiatehokkuudella on ensisijainen merkitys taloudellisista, mutta lisäksi ympäristösyistä. Jos Power-to-X prosesseja käytetään energiavarastona, niiden on säilytettävä korkea hyötysuhde toimiakseen useilla käyttöolosuhteilla sähkön hinnan tai muun signaalin mukaisesti. (Burre et al., 2020)

4.3 Poliitiikan näkökulmasta

Euroopan komission ilmastotavoitteet vaativat, että nykyinen energialähteiden uudistetaan uusiutuvien energialähteiden stokastisen luonteen sekä kestävien hiililähteiden vuoksi. Komission REPowerEU aloitteen tavoitteina on 10 miljoonaa tonnia kotimaista vuosituotantoa ja 10 miljoonaa tonnia uusiutuvan vedyn tuontia vuoteen 2030 mennessä. Tämä tarkoittaa elektrolysaattorikapasiteettiä, joka kattaa vähintään 64 GW. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi valtioilla ja energiakeskuksilla on tärkeä rooli näyttää elinkelpoisia liiketoimintamalleja ja perustaa toimintaa markkinaehtojen mukaisesti.

Markkinatoimijat odottavat yhä tarkennusta siitä, mitkä kaikki lasketaan uusiutuvaksi polttoaineeksi. Euroopan komissio ehdotti delegoitua säädöstä uusiutuvien polttoaineiden tuotanto-vaatimuksille, jotka koskevat täydentävyyttä sekä käytettyjen energialähteiden ajallista ja maantieteellistä korrelaatiota. Nämä säännöt koskevat todennäköisesti myös uusiutuvaa vetyä, jota käytetään teollisuudessa ja tuonnissa. (Kountouris et al., 2023)

Suurin hidaste vedyn laajalle käyttöönotolle on puuttuva jakelu- ja varastointi-infrastruktuuri. Uuden infrastruktuurin rakentaminen on kallista ja vety jakelujärjestelmän integrointi osaksi nykyistä energialähteiden tuotantoa tuo haasteita mukanaan. Tilanne voidaan ratkaista kansainvälisillä ja

kansallisilla sopimuksilla sekä strategioilla, jotka kannustavat jakelu- ja varastointi-infrastruktuurin rakentamiseen. Muun muassa Euroopan komission direktiiviehdotus laajentaisi velvoitteita vety-infran rakentamiselle kaikkiin Euroopan Unionin jäsenvaltioihin. Vedyn demonstraatiohankkeet sekä infran rakentaminen tarjoaa markkinaraon viennille sekä kehitysmahdollisuuden teknologialle. Vetymarkkinoiden arvoksi Euroopassa 2050 mennessä on arvioitu olevan 100 miljardia euroa. (VTT 2013.)

5. NYKYTILANNE JA TULEVAISUUS

Uusiutuvien energialähteiden määrä on viime vuosina kasvanut merkittävästi etenkin Euroopassa. Ilmastonmuutoksesta aiheutuneet säädökset pakottavat keksimään vaihtoehtoisia keinoja fossiilisille polttoaineille. Euroopassa johtavia maita Power-to-X-tekniikan kehityksessä ovat etenkin Saksa, Ranska ja Tanska. Maat, jotka ovat kiinnostuneita Power-to-X-tekniikasta ovat myös uusiutuvan energian edelläkävijöitä ja ovat asentaneet muun muassa paljon tuulipuistoja maalle ja merelle. Myös Suomessa tutkitaan Power-to-X-tekniikkaa, ja Lappeenrannan yliopisto on kehityksessä vahvasti mukana. Tulevaisuuden näkymät ovat potentiaaliset, jos rahoitus saadaan kuntoon.

5.1 Suomen tilanne

Suomalainen yritys EPV Energia on toiminut energiantuotannon parissa jo vuodesta 1952. Yhtiö on muuttanut energiantuotantokuvaansa ahkerasti ja pyrkii hiilineutraaliin sähköntuotantoon vuoteen 2030 mennessä. Heillä on kehitteillä Power-to-X-to-Power vetyjärjestelmä Vaasaan. Tarkoituksena on tuottaa tuulivoimalla puhdasta vetyä ja vedystä siten sähköä. Hankkeelle on myönnetty 14 miljoonaa euroa investointitukea Työ- ja elinkeinoministeriön toimesta. Kun tuulivoimaa tuotetaan yli, tarkoituksena on käyttää vetyä sen varastointikeinona. (Suomen ensimmäinen Power-to-X-to-Power-vetyjärjestelmä Vaasaan, n.d.) Yhtiöllä on tavoitteena demonstroida 100 % uusiutuvalla vedyllä toimivaa moottorivoimalaitosta vuoden 2026 loppuun mennessä (majasuutarinen, 2021).

LUT-yliopiston tutkijat selvittävät, voiko Joutsenoon rakentaa teollisen mittakaavan pilotti Power-to-X-prosessista. Tehdas tuottaisi kemianteollisuuden yli jääneestä vedystä ja Finnsementin tuotantoprosessissa tulleesta hiilidioksidista metanolia, bensiiniä tai kerosiinia. Swecon lisäksi hankkeessa on mukana Kemira. (Power-to-x-tekniikalla ilmastonmuutoksen hallintaa - Sweco, n.d.)

Lappeenrannan Yliopistoon asennettiin SOLETAIR pilottilaitos kesällä vuonna 2017. Laitos sisälsi aurinkosähkövoimalan, DAC-yksikön, joka keräsi hiilidioksidin ilmasta, vedyntuottoyksikön ja kaksivaiheisen synteesiyksikön. Vedyn ja hiilidioksidin kapasiteetit olivat pienemmät kuin mitä synteesiyksikkö tarvitsi. Tämän vuoksi käytettiin myös kaasusäiliötä. Lopputuloksena noin 30.8 % vedystä saatiin käytettyä lopputuotteisiin. Suurin osa vedystä muodosti vettä hapen kanssa. Merkittävä osa vedystä kulki synteesisprosessin ohi reagoimatta, mikä vaikutti energiatehokkuuteen, koska vety oli pää energiankantaja. Täten reagoimattomien kaasujen kierrättäminen uudelleen prosessin läpi on kriittistä, kun halutaan lisätä hiilen hyödyntämistä. (Vázquez et al., 2018)

5.2 Euroopan tilanne

Tarkasteltaessa Euroopan karttaa, voidaan todeta Saksan olevan edelläkävijä maa Power-to-X-tekniikan suhteen. Saksan jälkeen tulevat Ranska, Tanska, Alankomaat, Sveitsi ja UK. Italia ja Espanja ovat myös kiinnostuneita Power-to-X-konseptista, mutta kokonaisuudessa Luoteis-Eurooppa ja Skandinavian valtiot dominoivat tekniikan kehitystä. (Decourt, 2019) Yhteensä 220 Power-to-X-projektia oli tutkimus- tai kehitysvaiheessa Euroopassa kesäkuussa 2020. Osa projekteista on viivästynyt teknisten vaikeuksien ja pitkittyneiden lupien vuoksi. Vuonna 2024 Saksassa oletetaan Power-to-X kehityksen lähtevän kasvuun, koska Saksan ministeriö on myöntänyt rahoitusta projekteille. Seuraavien viiden vuoden aikana Saksaan suunnitellaan 494 MW kapasiteettia elektrolysaattoreita ja Ranskaan vastaavasti 514 MW. Vuoteen 2022 mennessä Saksaan on asennettu on-shore tuulivoimaloita noin 58 MW kapasiteetin edestä. Tähän verrattuna kaavailtu elektrolysaattorikapasiteetti on moninertainen (e.V, n.d.).

Saksassa on myös projekteja, jotka ovat käynnistyneet jo vuosi sitten. Audilla on e-gas-projekti, jossa käytetään Power-to-Methane-järjestelmää tuottamaan maakaasua (SNG). Projekti on aloitettu vuonna 2014. Tuotettu kaasu säilytetään julkiseen kaasuverkostoon, ja tätä sitä voidaan käyttää lämmittämään kotitalouksia. E-gas-polttoaine sitoo tuotannossa niin paljon hiilidioksidia kuin autosta vapautuu käytössä. (New Audi e-gas offer as standard, n.d.).

Yhdistyneet kuningaskunnat ovat kiinnostuneita tuottamaan vetyä metaanin höyryreformoinnilla, mikä on liitetty hiilen keräämiseen ja pitkäaikaiseen varastointiin. Itä-Euroopan maista Puola, Viro ja Latvia ovat ainoita valtioita, jotka ovat mukana Power-to-X-projektien kehittämisessä. EU on perustanut uuden rahoitusjärjestelmän (IPCEI), jonka tavoitteena on antaa tukea maille, jotka eivät vielä mukana Power-to-X-tekniikassa. Kokonaisuutena vuoteen 2026 mennessä Eurooppaan on suunnitteilla asentaa 1410 MW tehon edestä kapasiteettia. (Wulf et al., 2020)

5.3 Tulevaisuuden näkymät

Useimmat projektit ovat vielä konseptivaiheessa, eikä kaikkien kohdalla ole päätetty, mitä tekniikkaa käytetään tai mitä polttoainetta tuotetaan. Monet eri maat ovat suunnittelemassa pilttiprojekteja, joista osa on GW-mittakaavaisia. Jotta päästäisiin tavoitteisiin, mitä esimerkiksi Euroopan Komissio on asettanut, kehitystä täytyy tapahtua nopeasti. Silti vain 10 MW kapasiteetin edestä oli käynnissä vuonna 2022. Vaikka poliittiset tavoitteet on asetettu, selkeän toimintatavan puute näyttää viivyttävän teollista muutosta. (Kountouris et al., 2023)

Power-to-X-tekniikan kehitys ja prosessien määrä etenee vauhdilla eteenpäin. PEM- ja alkalielektrolysaattorien kehitys on parantunut, minkä vuoksi nämä menetelmät hallitsevat prosesseja. Kiinteäoksidielektrolysaattoreita käytetään vähemmissä määrin verrattuna edellä mainittuihin. Kehitteillä olevista projekteista selkeästi pienempi osa keskittyy nestemäisten polttoainetuotantoihin, vaikka nämä polttoaineet ovat tärkeässä roolissa kohti vihreää siirtymää. Pienikokoisissa hankkeissa pääpaino on enemmän tekniikan kehittämisessä kuin suuremman mittakaavan mitoituksessa. Tämä voi aiheuttaa elektrolyysissä sivutuotteena syntyvään happeen keskittymisen. Happea voidaan myydä eteenpäin ja käyttää hyväksi esimerkiksi jätevedenpuhdistamoissa. (Wulf et al., 2020)

Rahoitus tulee moniin hankkeisiin julkiselta sektorilta, mikä tarkoittaa, että rahaa ei ole ylimäärin kehitykseen. (Wulf et al., 2020) Jos kuitenkin yhä useampi valtio osallistuu Power-to-X-prosessien kehitykseen, on tekniikan kaupallistaminen mahdollista suhteellisen lyhyellä aikavälillä.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Power-to-X-laitoksen energianlähteenä käytetään uusiutuvaa energiaa. Stokastisen luonteensa vuoksi uusiutuvaa energiaa on kannattavaa varastoida, jotta prosessi pysyy toiminnassa haluttuina aikoina. Power-to-X-prosesseissa tuotettu vety saadaan valmistettua erottamalla vety ja happi vesimolekyylistä elektrolysaattorin avulla. Elektrolysaattoreita on monia, mutta tutkielmassa esitellyistä menetelmistä PEM-elektrolysaattori on tällä hetkellä johtavassa asemassa. Elektrolyysi muodostaa suuren osan energiatuotteen tuotantokustannuksista, mutta niitä saadaan vähennettyä esimerkiksi käyttämällä prosesseissa katalyyttejä. Elektrolyysissä syntynyt happi päästetään ilmaan tai myydään eteenpäin, jolloin kustannuksia saadaan tasapainotettua. Alkalielektrolyysi on halvin vaihtoehdoista, mutta kaikkien elektrolysaattorien hintojen arvioidaan laskevan seuraavan kymmenen vuoden aikana.

Vety voidaan sellaisenaan käyttää polttoaineena tai se voidaan jatkojalostaa erilaisiksi yhdisteiksi. Energialopputuotteita ovat esimerkiksi metanoli, metaani ja ammoniakki. Jos vetyä ei jatkojalosteta eikä käytetä saman tien, se voidaan varastoida muiden lopputuotteiden avulla, kuten ammoniakkin. Jatkojalostusprosessit vaativat erilaiset synteesisireaktorit, joissa prosessit toteutetaan. Kun valmistetaan metanolia tai metaania, prosessiin tarvitaan hiilidioksidia. Tällöin laitos kannattaa sijoittaa esimerkiksi lämpölaitoksen viereen, josta hiilidioksidi saadaan helposti ostettua. Verrattuna näihin tuotteisiin, ammoniakkin valmistaminen on halvempaa, koska typen kerääminen ei maksa yhtä paljon kuin hiilidioksidin.

Vedyn tuottaminen lopputuotteeksi on halvempaa kuin muiden energiatuotteiden, jos hinta suhteutetaan energiasisältöön. Metaanin tuottaminen on prosesseista kallein. Jos Power-to-X-järjestelmien hinnat suhteutetaan fossiilisilla polttoaineilla valmistettuihin tuotteisiin, voidaan Power-to-X-tekniikan todeta olevan selkeästi kalliimpaa. Prosessin tuotantokustannuksia laskettaessa pitää huomioida elektrolysaattori, sähkön hinta ja verotus, laitoksen käyttöaika sekä sen ylös- ja alasajot. Täten prosessin kokonaiskustannusten määrittäminen vaatii herkkyyksianalyysiä, joka huomioi nämä ja monta muuta seikkaa.

Power-to-X-projekteja on paljon kehitteillä ja varsinkin Luoteis-Euroopassa ollaan hyvin kiinnostuneita kyseisestä teknologiasta. Näissä maissa on myös paljon tuulipuistoja, mikä edesauttaa Power-to-X-laitosten toteuttamista. Suomessa on omia hankkeita meneillään sekä Lappeenrannan yliopisto on kiinnostunut kehittämään Power-to-X-tekniikkaa. Koska kiinnostus lisääntyy kokonaisuutena koko ajan, tekniikan kaupallistuminen lähestyy. Teknologialle annetut rahoitukset ja säädökset edesauttavat teknologian kehittymistä, mikä korreloi suoraan kaupallistumisen edistymiseen.

Uuden teknologian edessä on aina ongelma rahoituksen kanssa. Tähän apuna toimivat vo-
lyymin lisääntyminen ja valtion tai muun tahon asettamat säädökset tai avustukset. Kun teknolo-
giaa kehittää yhä useampi ja saadaan rakennettua toimivia prototyypilaitoksia, yhä useampi
julkinen sekä yksityinen osapuoli uskaltaa sijoittaa kohteeseen.

LÄHTEET

- Afif, A., Radenahmad, N., Cheok, Q., Shams, S., Kim, J.H., Azad, A.K., 2016. Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 822–835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.120>
- Ammonia production costs? [WWW Document], n.d. Thunder Said Energy. URL <https://thundersaidenergy.com/downloads/ammonia-synthesis-the-economics/> (accessed 10.19.23).
- Bellotti, D., Rivarolo, M., Magistri, L., 2022. A comparative techno-economic and sensitivity analysis of Power-to-X processes from different energy sources. *Energy Conversion and Management* 260, 115565. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115565>
- Bokde, N., Tranberg, B., Andresen, G.B., 2020. A graphical approach to carbon-efficient spot market scheduling for Power-to-X applications. *Energy Conversion and Management* 224, 113461. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113461>
- Bos, M.J., Kersten, S.R.A., Brilman, D.W.F., 2020. Wind power to methanol: Renewable methanol production using electricity, electrolysis of water and CO₂ air capture. *Applied Energy* 264, 114672. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114672>
- 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 (CIT)* 92, 74–84. <https://doi.org/10.1002/cite.201900102>
- Chi, J., Yu, H., 2018. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis* 39, 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Corti, H.R., 2022. Polymer electrolytes for low and high temperature PEM electrolyzers. *Current Opinion in Electrochemistry* 36, 101109. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.101109>
- Dahiru, A.R., Vuokila, A., Huuhtanen, M., 2022. Recent development in Power-to-X: Part I - A review on techno-economic analysis. *Journal of Energy Storage* 56, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105861>
- Dawood, F., Anda, M., Shafiullah, G.M., 2020. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Decourt, B., 2019. Weaknesses and drivers for power-to-X diffusion in Europe. Insights from technological innovation system analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 17411–17430. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.149>
- Dong, Z.Y., Yang, J., Yu, L., Daiyan, R., Amal, R., 2022. A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. *International Journal of Hydrogen Energy* 47, 728–734. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.084>
- Drünert, S., Neuling, U., Timmerberg, S., Kaltschmitt, M., 2019. Power-to-X (PtX) aus „Überschussstrom“ in Deutschland – Ökonomische Analyse. *Z Energiewirtschaft* 43, 173–191. <https://doi.org/10.1007/s12398-019-00256-7>
- e.V., B.W., n.d. Statistics Germany BWE e.V. [WWW Document]. BWE e.V. URL <https://www.wind-energie.de/english/statistics/statistics-germany/> (accessed 10.19.23).
- F, F., A, P., L, H., D, G., N, D., 2022. A long-term capacity investment and operational energy planning model with power-to-X and flexibility technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 112781. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112781>

- Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., Kolb, T., 2016. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy* 85, 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
- Howarth, R.W., Link to external site, this link will open in a new window, Jacobson, M.Z., 2021. How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering* 9, 1676–1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
- Hydrogen Production Cost - an overview | ScienceDirect Topics [WWW Document], n.d. URL <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-production-cost> (accessed 3.30.23).
- Ikäheimo, J., Kiviluoma, J., Weiss, R., Holttinen, H., 2018. Power-to-ammonia in future North European 100 % renewable power and heat system. *International Journal of Hydrogen Energy* 43, 17295–17308. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.121>
- Ilmastomuutos: mitä EU tekee? [WWW Document], 2023. URL <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/> (accessed 2.11.23).
- Innovation Outlook: Renewable Methanol, n.d.
- Kountouris, I., Langer, L., Bramstoft, R., Münster, M., Keles, D., 2023. Power-to-X in energy hubs: A Danish case study of renewable fuel production. *Energy Policy* 175, 113439. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113439>
- Krishnan, S., Koning, V., Theodorus de Groot, M., de Groot, A., Mendoza, P.G., Junginger, M., Kramer, G.J., 2023. Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks. *International Journal of Hydrogen Energy* 48, 32313–32330. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.031>
- Li, W., Tian, H., Ma, L., Wang, Y., Liu, X., Gao, X., 2022. Low-temperature water electrolysis: fundamentals, progress, and new strategies. *Materials Advances* 3, 5598–5644. <https://doi.org/10.1039/D2MA00185C>
- maijasuutarinen, 2021. Vaasaan suunnitteilla olevalle sähkön tuotannon ja varastoinnin vetyratkaisulle 14 miljoonan euron tuki [WWW Document]. EPV. URL <https://www.epv.fi/2021/12/23/vaasaan-suunnitteilla-olevalle-sahkon-tuotannon-ja-varastoinnin-vetyratkaisulle-14-miljoonan-euron-tuki/> (accessed 3.30.23).
- Marini, S., Salvi, P., Nelli, P., Pesenti, R., Villa, M., Berrettoni, M., Zangari, G., Kirov, Y., 2012. Advanced alkaline water electrolysis. *Electrochimica Acta, ELECTRO-CHEMICAL FRONTIERS IN GLOBAL ENVIRONMENT AND ENERGY* 82, 384–391. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.011>
- Methanation - an overview | ScienceDirect Topics [WWW Document], n.d. URL <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methanation> (accessed 10.7.23).
- Milka, K., n.d. Alkali- ja PEM-teknologioiden vertailu elektrolyysiprosessissa.
- New Audi e-gas offer as standard: 80 percent lower CO2 emissions [WWW Document], n.d. Audi MediaCenter. URL <https://www.audi-mediacycenter.com:443/en/press-releases/new-audi-e-gas-offer-as-standard-80-percent-lower-co2-emissions-7353> (accessed 10.19.23).
- Palys, M.J., Daoutidis, P., 2022. Power-to-X: A review and perspective. *Computers & Chemical Engineering* 165, 107948. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107948>
- Power-to-x-teknologialla ilmastomuutoksen hallintaa - Sweco [WWW Document], n.d. <https://www.sweco.fi/>. URL <https://www.sweco.fi/ajankohtaista/uutiset/power-to-x-teknologialla-on-keskeinen-rooli-ilmastonmuutoksen-hallinnassa-ja-energiaturroksessa/> (accessed 3.30.23).
- Sankir, M., Sankir, N.D., 2017. *Hydrogen Production Technologies*. John Wiley & Sons, Incorporated, Somerset, UNITED STATES.
- Suomen ensimmäinen Power-to-X-to-Power-vetyjärjestelmä Vaasaan [WWW Document], n.d. EPV. URL <https://www.epv.fi/project/power-to-x-to-power/> (accessed 3.30.23).

- Tuulivoima Suomessa [WWW Document], n.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. URL <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa> (accessed 5.19.23).
- Vázquez, F.V., Koponen, J., Ruuskanen, V., Bajamundi, C., Kosonen, A., Simell, P., Ahola, J., Frilund, C., Elfving, J., Reinikainen, M., Heikkinen, N., Kauppinen, J., Piermartini, P., 2018. Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. *Journal of CO2 Utilization* 28, 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.09.026>
- Voitic, G., Pichler, B., Basile, A., Iulianelli, A., Malli, K., Bock, S., Hacker, V., 2018. Chapter 10 - Hydrogen Production, in: Hacker, V., Mitsushima, S. (Eds.), *Fuel Cells and Hydrogen*. Elsevier, pp. 215–241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811459-9.00010-4>
- Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., 2020. Review of Power-to-X Demonstration Projects in Europe. *Frontiers in Energy Research* 8.