



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Aleksi Saukkonen

Power-to-X (P2X) -teknologian rooli sähköverkon tasapainottamisessa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Sähkö- ja energiatekniikan

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

| | |
|--------------------------|---|
| Tekijä: | Aleksi Saukkonen |
| Tutkielman nimi: | Power-to-X (P2X) -teknologian rooli sähköverkon tasapainottamisessa |
| Tutkinto: | Tekniikan kandidaatti |
| Oppiaine: | Sähkö- ja energiatekniikka |
| Työn ohjaaja: | Hannu Laaksonen |
| Valmistumisvuosi: | 2025 |
| Sivumäärä: | 31 |

TIIVISTELMÄ:

Ilmastonmuutoksen ja hiilineutraalisuustavoitteiden seurauksena uusiutuvien energialähteiden käyttö on lisääntynyt. Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoimalaitosten energiantuotanto on sääriippuvaista ja tuotanto vaihtelee hetkellisesti. Sähkövoimajärjestelmässä tuotanto ja kulutus täytyy olla joka hetki tasapainossa, joten epätasainen tuotanto vaatii aiempaa enemmän ohjattavien ja joustavien energiaressurssien hyödyntämistä. Perinteisesti Suomessa joustoresurssitarpeet on täytetty pääosin joko kotimaisella tai pohjoismaisella vesivoimalla. Power-to-X-teknologia tarjoaa mahdollisuuden sähköverkon tasapainottamiseen muuntamalla ylijäämäenergiaa esimerkiksi lämmöksi, vedyksi tai jatkojalostamalla se synteettisiksi polttoaineiksi. Vetyä ja synteettisiä polttoaineita on mahdollista hyödyntää energiavarastoina ja fossiilisten polttoaineiden korvaajina teollisuudessa ja liikenteessä.

Tutkielman tavoitteena oli tutkia Power-to-X-teknologian hyödyntämismahdollisuuksia sähköverkon tasapainottamiseen ja energian varastointiin. Tutkielmassa tarkastellaan Suomen muuttuvaa energiajärjestelmää sekä teknologian keskeisiä prosesseja, kuten elektrolyysiä ja hiilidioksidin talteenottoa. Lisäksi käsitellään Power-to-X-teknologian sovellusmuotoja, kuten Power-to-Heat, Power-to-Gas ja Power-to-Liquids. Lopuksi esitellään toiminnassa olevia ja suunnitteilla olevia laitoksia.

Tutkielman perusteella Power-to-X-teknologia tarjoaa lupaavan uuden joustoresurssin uusiutuvan energiantuotannon vaihtelevuuden hallintaan tulevaisuuden sähkövoimajärjestelmässä. Teknologian avulla sähköä voidaan varastoida kemiallisessa muodossa ja hyödyntää eri sektoreilla, kuten liikenteessä, teollisuudessa ja energiantuotannossa. Toteutuneet ja suunnitteilla olevat hankkeet viittaavat siihen, että teknologia voi muodostua merkittäväksi osaksi tulevaisuuden energiajärjestelmää.

AVAINSANAT: Power-to-X, uusiutuva energia, energiavarastointi, elektrolyysi, hiilidioksidin talteenotto, synteettiset polttoaineet, joustoenergia, säätövoima

Sisällys

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 5 |
| 2 | Suomen energiantuotantojärjestelmä | 7 |
| 2.1 | Uusiutuvan energian kasvu | 7 |
| 2.1.1 | Joustoenergian tarve ja tulevaisuuden sähkövoimajärjestelmä | 10 |
| 2.2 | Suomen sähköverkko | 11 |
| 2.3 | Suomen sähköntuotannon vaihtelu | 11 |
| 3 | Elektrolyysiteknologiat ja hiilidioksidin hyödyntäminen | 13 |
| 3.1 | Alkalielektrolyysi | 13 |
| 3.2 | PEM-elektrolyysi | 14 |
| 3.3 | Kiinteäoksidgelektrolyysi | 15 |
| 3.4 | Vedyn tuotantomenetelmät ja ympäristövaikutukset | 16 |
| 3.5 | Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö | 17 |
| 4 | Power-to-X teknologiat ja toimintaperiaatteet | 19 |
| 4.1 | Power-to-Heat | 19 |
| 4.2 | Power-to-Liquids | 20 |
| 4.3 | Power-to-Gas | 20 |
| 4.3.1 | Power-to-Methane | 20 |
| 4.3.2 | Power-to-Hydrogen | 21 |
| 5 | Power-to-X-tekniologia sähköverkon tasapainottamisessa | 22 |
| 5.1 | Sähköverkon tasapainottamisen periaatteet | 22 |
| 5.2 | P2X-tekniologian hankkeita Suomessa ja Euroopassa | 23 |
| 5.2.1 | Suomen hankkeita | 23 |
| 5.2.2 | Euroopan hankkeita | 24 |
| 6 | Johtopäätökset | 26 |
| 7 | Yhteenveto | 27 |
| | Lähteet | 28 |

Kuvat

| | |
|--|----|
| Kuva 1. Suomen eri energialähteiden sähköntuotanto vuonna 2024 (Energieateollisuus, n.d. -a). | 8 |
| Kuva 2. Maatuulivoimahankkeet maakunnittain (Suomen uusiutuvat, 2025-a, s.5)..... | 9 |
| Kuva 3. Merituulivoimahankkeet Suomen länsirannikolle (Suomen uusiutuvat, 2025-a, s.8). | 9 |
| Kuva 4. Aurinkovoimahankkeet maakunnittain (Suomen uusiutuvat, 2025-c, s.4). | 10 |
| Kuva 5. Suomen sähköntuotannon (turkoosi) ja -kulutuksen (tummansininen) käyrät vuodelta 2024. Y-akseli: MWh/h, X-akseli: aika (Fingrid, n.d. -e)..... | 12 |
| Kuva 6. Pre-combustion-hiilidioksidin talteenotto-prosessi (Mukaiillen Hanson ja muut, 2025, luku 2). | 18 |
| Kuva 7. Vihreän vedyn eri käyttökohteet: energianvarastointi ja -tuotanto, teollisuus, tieliikenne, maatalous sekä kestävä kehitys ja synteettisten polttoaineiden valmistus (Anand ja muut, 2025, luku 8)..... | 21 |
| Kuva 8. Kalifornian tuulivoimaloiden päivittäinen sähköntuotanto. Eri värit edustavat eri päiviä (Moseley ja Jürgen, 2014, s. 6). | 22 |

Taulukot

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Vedyn eri tuotantomenetelmät jaettuna värikoodeihin sekä niiden käyttämät energialähteet ja hiilidioksidipäästöt. | 17 |
|--|----|

Lyhenteet

| | |
|------|---|
| CCS | carbon capture and storage |
| CCUS | carbon capture, utilization and storage |
| GW | gigawatti |
| Hz | hertsi |
| kV | kilovoltti |
| Mt | miljoonaa tonnia |
| MW | megawatti |
| P2X | Power-to-X |
| V | voltti |

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillitseminen edellyttää maailmanlaajuisia toimia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Uusiutuvien energialähteiden, kuten tuuli- ja aurinkoenergian käyttö on kasvanut merkittävästi, ja tuoneet samalla uusia ongelmia. Näiden energialähteiden lisääntyvä osuus sähköntuotannossa aiheuttaa haasteita sähköverkon tasapainottamiselle, sillä niiden tuotanto on sääriippuvaista ja ennustettavuudeltaan vaativaa.

Sähkövoimajärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää, että tuotettu ja kulutettu sähkö ovat määrällisesti ja ajallisesti jatkuvasti tasapainossa. Sähköä on tuotettava joka ajanhetkellä täsmälleen kulutuksen verran. Mikäli tuotanto ylittää kulutuksen tai päinvastoin, sähköverkon taajuus alkaa poiketa sen nimellisarvosta, mikä voi aiheuttaa häiriöitä sähköjärjestelmässä. Sähköverkon tasapainottamiseen vaadittua energiaa kutsutaan säätövoimaksi tai -reserviksi, jota tuotetaan Suomessa nykyisin suurimmalta osin vesivoimaloilla. Uusiutuvan energian kasvava osuus lisää kuitenkin tarvetta uusille säätö- ja joustoratkaisuille, joiden avulla voidaan hyödyntää ylijäämäenergiaa tehokkaasti.

Yksi lupaavimmista ratkaisuista sähköverkon tasapainottamiseen ja joustotarpeiden täyttämiseen ovat erilaiset Power-to-X (P2X) -teknologiat. X-kirjain termissä viittaa energiamuotoon, johon sähköenergia voidaan muuntaa, kuten lämpöön, synteettisiin kaasuihin tai synteettisiin nesteisiin. Synteettisten kaasu- ja nestepohjaisten P2X-teknologioiden keskeiset raaka-aineet ovat vety ja hiilidioksidi. Vety tuotetaan eri elektrolyysiteknologioiden avulla, kun taas hiilidioksidia otetaan talteen joko ilmasta tai suoraan voimalaitosten päästöistä. Erityisesti vedyn tuotanto elektrolyysin avulla tarjoaa tehokkaan ympäristöystävällisen tavan varastoida sähköenergiaa pitkäaikaisesti sekä hyödyntää sitä joustavasti eri sektoreilla, kuten teollisuudessa, liikenteessä ja energiantuotannossa.

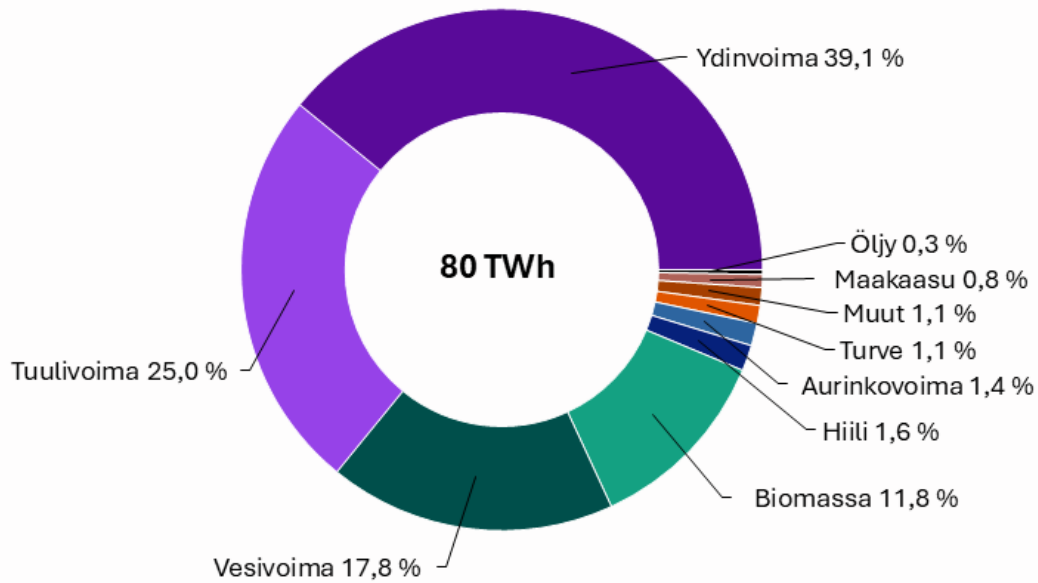
Tämä kandidaatintutkielma perustuu kirjallisuuskatsaukseen sisältäen seitsemän lukua. Tutkielman tavoitteena on selvittää, miten Power-to-X-teknologia voi edistää energian varastointia ja sähköverkon tasapainottamista uusiutuvan energian osuuden kasvaessa. Toisessa luvussa käsitellään Suomen energiantuotantojärjestelmää, erityisesti uusiutuvan energian kasvua sekä vuodenaikojen vaikutusta sähköntuotantoon ja -kulutukseen. Kolmannessa luvussa tarkastellaan P2X-teknologian kannalta keskeisiä raaka-aineita ja niiden tuotantomenetelmiä. Neljännessä luvussa esitellään P2X-teknologian sovelluksia ja niiden käyttökohteita. Viidennes luku tarkastelee sähköverkon tasapainottamisen periaatteita ja P2X-laitoshankkeita. Kuudes ja seitsemäs luku sisältävät johtopäätökset ja yhteenvedon, joissa kootaan yhteen tutkielman keskeiset havainnot.

2 Suomen energiantuotantojärjestelmä

Ilmastonmuutoksen ja sen aiheuttamien haitallisten vaikutuksien, kuten maapallon keskilämpötilan nousun ehkäisemiseksi tarvitaan merkittäviä toimenpiteitä. Energiantuotannolla on keskeinen rooli päästöjen vähentämisessä, sillä se vastaa noin 75 % kaikista haitallisista kasvihuonekaasupäästöistä (International Energy Agency, n.d. -b). Maapallon keskilämpötilan nousun hillitsemiseksi Euroopan unioni (EU) ja Suomi ovat asettaneet tavoitteet hiilineutraalisuudelle. EU:n tavoite on vuoteen 2050 mennessä, ja Suomen vuoteen 2035 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s.12, 15).

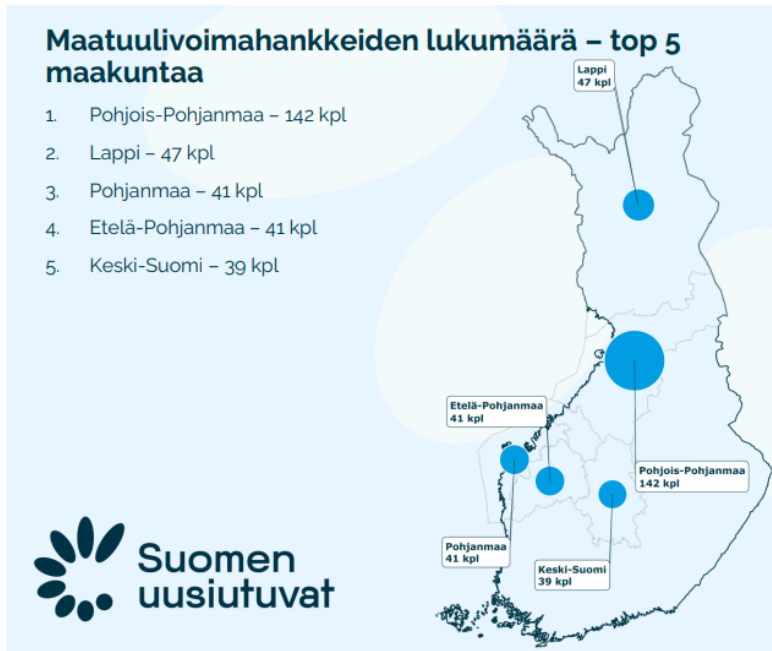
2.1 Uusiutuvan energian kasvu

Vuonna 2024 Suomen sähköntuotanto oli monipuolista ja hajautettua moneen eri energianlähteeseen, josta 95 % oli hiilineutraalia (Energiateollisuus, n.d. -a). Suomessa on yhteensä noin 400 voimalaitosta, joista suurimmat ovat kuvan 1 mukaan ydinvoima (39,1 %), tuulivoima (25,0 %), vesivoima (17,8 %) ja biomassa (11,8 %). Tavoitteena on saada Suomesta täysin hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiiviseksi nopeasti tämän jälkeen (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s.12–13). Tavoitteeseen pääseminen vaatii uusiutuvien energialähteiden lisääntymistä entisestään ja fossiilipolttoaineista luopumisen. Erityisesti tuulivoiman osuus lisääntyy sen kustannustehokkuuden ja paranevan tuotantotehokkuuden ansiosta (Suomen uusiutuvat, n.d. -b).



Kuva 1. Suomen eri energialähteiden sähköntuotanto vuonna 2024 (Energiateollisuus, n.d. -a).

Suomen uusiutuvat (2025-a) mukaan Suomessa on vuonna 2025 käynnissä useita laajamittaisia uusiutuvan energian hankkeita. Suurin osa investoinneista kohdistuu maatuulivoimaan, jonka suunniteltu tuotantokapasiteetti on 61 648 MW. Hankkeet sijoittuvat kuvan 2 mukaan Keski-Suomeen, Pohjanmaalle ja Lappiin. Myös merituulivoimahankkeiden osuus on merkittävä ja niiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 46 180 MW. Nämä sijoittuvat Suomen länsirannikolle kuvan 3 mukaisesti. Aurinkovoimahankkeiden kokonaiskapasiteetti on 23 855 MW, ja hankkeet sijoittuvat kuvan 4 mukaan Pohjanmaalle, Satakuntaan, Varsinais-Suomeen ja Uudellemaalle.



Kuva 2. Maatuuvoimahankkeet maakunnittain (Suomen uusiutuvat, 2025-a, s.5).



Kuva 3. Merituulivoimahankkeet Suomen länsirannikolle (Suomen uusiutuvat, 2025-a, s.8).



Kuva 4. Aurinkovoimahankkeet maakunnittain (Suomen uusiutuvat, 2025-c, s.4).

2.1.1 Joustoenergian tarve ja tulevaisuuden sähkövoimajärjestelmä

Honkapuron ja muiden (2020, s. 3–18) mukaan sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottamisen merkitys kasvaa energiamurroksen ja sähköistymisen seurauksena. Energiamurroksella tarkoitetaan energiajärjestelmän laajamittaista muutosta kohti hiilineutraalisuutta. Sähköistyminen puolestaan tarkoittaa prosessia, jossa fossiilisia energialähteitä korvataan uusiutuvilla tai hiilineutraalisti tuotetulla sähköllä. Tämä johtaa siihen, että sähköntuotantoa on lisättävä merkittävästi, koska sähkön kysyntä kasvaa maailmanlaajuisesti. Suomessa tuulivoima on kustannustehokkain tapa tuottaa hiilineutraalia sähköä, joten sään mukaan vaihtelevan tuotannon osuus tulee kasvamaan huomattavasti tulevaisuudessa. Vaihtelevaa kulutusta ja tuotantoa tasapainotetaan jouston avulla, jota on perinteisesti saatu säätämällä vesi- ja lauhdevoimalaitosten tuotantoa. Uusiutuvien energialähteiden tuotantoa ei voida ohjata samalla tavalla, minkä vuoksi tarvitaan uusia joustoresursseja, kuten energiavarastointia, kulutusjoustoja ja Power-to-X-teknologioita.

Fingridin (2025-a) julkaisemassa skenaarioluonnoksessa esitetään neljä vaihtoehtoista kehityspolkua Suomen sähkövoimajärjestelmälle. Tarkastelen skenaarioiden yhteisiä piirteitä, joiden avulla hahmotetaan sähkövoimajärjestelmän mahdollisia kehityssuuntia. Kaikille skenaarioille yhteistä on sähköntuotannon ja -kulutuksen kasvu. Erityisesti uusiutuvan energiatuotannon ja energian varastoinnin osalta. Lisäksi skenaarioissa tulee ilmi vedyntuotannon potentiaali Suomessa. Kahdessa skenaariossa rakennetaan kansainvälinen vetyverkko, ja molemmissa se yhdistyy Ruotsiin ja toinen ulottuu Keski-Eurooppaan asti.

2.2 Suomen sähköverkko

Fingridin (n.d. -d) mukaan Suomen sähköverkkojärjestelmä voidaan jakaa tuotantolaitoksiin, siirtoverkkoihin ja kuluttajiin. Fingrid vastaa Suomen kantaverkon toiminnasta sekä sähköjärjestelmän tehotasapainosta. Energiategollisuus (n.d. -b) kuvailee sähköverkon rakenteen siirtoetäisyyksien pohjalta. Pisimmät etäisyydet kuljetetaan suurella jännitteellä kantaverkon avulla, jonka jännitteet vaihtelevat 400 kV, 220 kV ja 110 kV välillä. Korkeaa jännitettä käytetään sähkönsiirrossa, koska se pienentää siirtohäviöitä. Kantaverkot ovat liitettynä suurjännitteisiin jakeluverkkoihin ja jakeluverkkoihin. Suurjännite jakeluverkolla on 110 kV jännite ja jakeluverkot toimivat 20 kV, 10 kV, 1 kV ja 0,4 kV jännitteillä. Jakeluverkkojen tehtävä on siirtää sähkö lähemmäksi kuluttajia. Kuluttajat saavat sähköön käyttöönsä jakeluverkoista muuntajien välityksellä, jotka muuntavat sähköön käyttökelpoiselle jännitteelle.

2.3 Suomen sähköntuotannon vaihtelu

Sähköön käyttö vaihtelee Suomessa vuodenaikojen mukaan. Kuvassa 5 on esitetty vuoden 2024 sähköntuotanto- ja -kulutuskäyrät, josta voidaan havaita selkeitä eroja talven ja kesän välillä. Talvikuukausina tuotanto ja kulutus ylittävät 14 000 MWh/h:n, kun taas kesäkuukausina ne jäävät noin 10 000 MWh/h:n tasolle. Lisäksi voidaan havaita, että kylminä kuukausina tuotanto- ja kulutuskäyrissä esiintyy selvästi suurempaa vaihtelua kuin lämpiminä kuukausina.

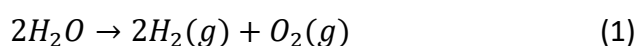


Kuva 5. Suomen sähköntuotannon (turkoosi) ja -kulutuksen (tummansininen) käyrät vuodelta 2024. Y-akseli: MWh/h, X-akseli: aika (Fingrid, n.d. -e).

Erityisesti kireiden pakkasten aikaan Suomi on riippuvainen sähköntuonnista. Fingridin (2024-b) mukaan talvi 2023–2024 oli keskimääräistä kylmempi, mikä kasvatti sähkönkulutusta merkittävästi. Esimerkiksi 3.1.2024 klo 19–20 lämpötila saavutti -24 °C , jolloin sähkönkulutus nousi 14 993 MWh/h. Kotimaisen tuotannon osuus siitä oli 12 112 MWh/h, ja loput 2 881 MWh/h saatiin tuonnilla. Tämä kulutus ylitti Suomen kaikkien aikojen tuotantoennätyksen (14 246 MWh/h), joka mitattiin myöhemmin vuonna 2024 tammikuussa. Tämä korostaa Suomen tuonnin riippuvuutta etenkin korkeiden kulutushuippujen aikana.

3 Elektrolyysiteknologiat ja hiilidioksidin hyödyntäminen

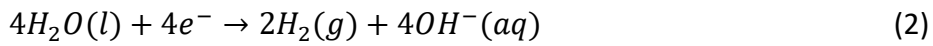
Anand ja muut (2025, luku 4.1) mukaan elektrolyysi on sähkökemiallinen prosessi, jossa vesimolekyyli (H_2O) hajotetaan yhtälön 1 tavoin vedyksi (H_2) ja hapeksi (O_2) ulkoisen sähköenergian avulla. Elektrolyysiprosessit ovat ympäristöystävällisiä, mikäli käytetty sähköenergia on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä tai hiilineutraalisti. Yleisimmät elektrolyysiteknologiat ovat alkali-, PEM- ja kiinteäoksidielektrolyysi. Teknologiat eroavat toisistaan mm. elektrolyyttien, operointilämpötilojen ja hyötysuhteiden välillä. Vetyä on mahdollista tuottaa ympäristöystävällisesti myös muilla menetelmillä, mutta tässä työssä keskitytään elektrolyysiteknologioihin. Anand ja muut toteavat, että vesimolekyyli on termodynaamisesti tasapainossa, jossa vety- ja happiatomit ovat sitoutuneet toisiinsa vahvoilla kovalenttisilla sidoksilla. Tämän vuoksi vesi ei hajoa spontaanisti alkuaineisiin, vaan hajottaminen vaatii merkittävästi ulkoista energiaa. Teoreettinen minimijännite veden hajottamiseen on 1,23 V, mutta käytännössä tarvitaan yleensä noin 1,8 V. Suurempi jännitevaatimus johtuu hapetus- ja pelkistysreaktioiden aktivaatioenergioista sekä veden vahvojen O–H-sidosten katkaisusta. Lisäksi elektrodien pinnalle muodostuvat kaasukuplat voivat estää reagoivan aineen pääsyn elektrodeille ja hidastaa reaktiotuotteiden poistumista, mikä heikentää reaktion tehokkuutta ja lisää sähköistä vastusta.



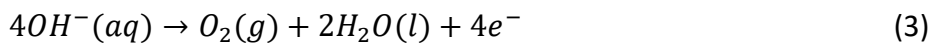
3.1 Alkalielektrolyysi

Glodula-Jopekin ja Stoltenin mukaan (2015, s. 121–125) alkalielektrolyysin toiminta perustuu elektrodeihin, jotka upotetaan voimakkaasti emäksiseen liuokseen. Alkalielektrolyysi on yleisin ja kustannustehokkain elektrolyysiteknologia sen edullisten elektrodimateriaalien, kuten raudan ja nikkelin ansiosta. Tyypillisiä vahvasti emäksisiä elektrolyyttejä ovat kaliumhydroksidi (KOH) ja natriumhydroksidi (NaOH). Alkalielektrolyysikennon rakenteessa anodi ja katodi erotetaan toisistaan elektrolyytissä olevan kalvon avulla. Kalvo mahdollistaa hydroksidi-ionien (OH^-) liikkumisen katodilta

anodille. Samalla se estää elektrodien pinnalla muodostuvien reaktiotuotteiden sekoittumisen, mikä mahdollistaa vedyn ja hapen erillisen talteenoton. Kun kennolle syötetään tasavirtasähköä, katodilla (negatiivinen napa) tapahtuu pelkistysreaktio yhtälön 2 mukaisesti, jossa vesi pelkistyy vedyksi ja hydroksidi-ioneiksi.



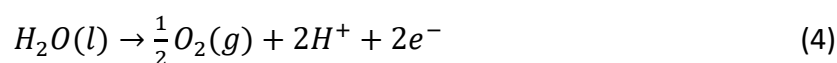
Anodilla (positiivinen napa) tapahtuu hapetusreaktio yhtälön 3 mukaisesti, jossa hydroksidi-ionit hapettuvat hapeksi ja vedeksi.



Anandin ja muiden (2025, luku 4) mukaan energiahyötysuhde on noin 51–55 %. Toimintalämpötila vaihtelee 60–90 °C välillä, ja toimintapaine on 1–30 bar, mikä mahdollistaa prosessin joustavan soveltamisen eri käyttökohteisiin. Kennon jännite on tyypillisesti 1,8–2,4 V. Teknologian tärkeimpiä sovellusalueita ovat teollisuusvedyn ja ammoniakkin tuotanto.

3.2 PEM-elektrolyysi

Godula-Jopekin ja muiden mukaan (2015, s. 65–68) PEM-elektrolyysi (engl. *polymer electrolyte membrane*) eroaa alkali-elektrolyysistä siten, että se ei käytä nestemäistä elektrolyyttiä, vaan elektrolyyttinä toimii kiinteä protoninvaihtokalvo. PEM-elektrolyysissä varauksenkuljettajina toimivat protonit (H^+). Elektrodien välillä oleva protoninvaihtokalvo toimii protonien kantajana ja reaktiossa muodostuvien aineiden erottajana. Anodilla tapahtuu hapetusreaktio (yhtälö 4), jossa vesi hajoaa hapeksi ja protoneiksi.



Katodilla tapahtuu pelkistysreaktio (yhtälö 5), jossa protonit pelkistyvät vastaanottamalla elektroneja ja muodostavat vetykaasua.



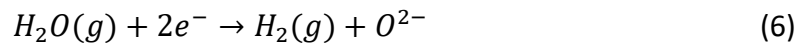
Anandin ja muiden (2025, luku 4) mukaan PEM-elektrolyysin kustannukset ovat korkeammat kuin alkalielektrolyysillä, mutta sen suorituskykyominaisuudet ovat paremmat. PEM-teknologia toimii 50–80 °C lämpötila-alueella ja saavuttaa jopa 80 % hyötysuhteen. Protoninvaihtokalvo estää muiden ionien läpäisyn, minkä ansiosta tuotettu vety on erittäin puhdasta. PEM-elektrolyysi voi toimia myös 30 bar:n paineessa, mikä mahdollistaa korkeapaineisen vedyn tuotannon ilman erillistä kompressoria. Kennon käyttöjännite vaihtelee 1,8–2,2 V välillä. Suurimmat haasteet liittyvät kustannuksiin, jotka johtuvat jalometallikatalyyttien, kuten platinan (Pt) ja iridiumoksidin (IrO₂) käytöstä. PEM-elektrolyysiä käytetään ensisijaisesti uusiutuvan energian varastointiin ja teollisuuden vedyntuotantoprosesseissa.

3.3 Kiinteäoksidielektrolyysi

Elektrolyysiteknologiat voidaan luokitella toimintalämpötilansa perusteella matalan lämpötilan ja korkean lämpötilan menetelmiin. Alkali- ja PEM-elektrolyysi toimivat matalissa lämpötiloissa, tyypillisesti alle 100 °C:n, kun taas kiinteäoksidielektrolyysi toimii huomattavasti korkeammassa lämpötiloissa. Godula-Jopekin ja Stoltenin mukaan (2015, s.191) reaktiokaava pysyy muodollisesti samana kuin alhaisissa lämpötiloissa (yhtälö 1), mutta korkealämpöisissä elektrolyyseissä vesi syötetään kennoihin vesihöyryinä eikä nestemäisessä muodossa. Veden ollessa vesihöyryinä sen hajottamiseen tarvittava kokonaisenergia on pienempi. Tämän vuoksi hajottamiseen vaaditun sähköenergian tarve pienenee, ja osa energiasta voidaan korvata lämpöenergialla.

Anand ja muut (2025, luku 4.5) mukaan kiinteäoksidielektrolyysin operointilämpötila on 700–900 °C. Teknologian hyötysuhde on noin 90 %, kennon jännite 0,9–1,2 V ja

toimintapaine 1–10 bar. Korkea lämpötila kuitenkin lisää kustannuksia, sillä se nopeuttaa materiaalien kulumista, kasvattaa rakenteellisia rasituksia ja edellyttää kalliimpia huoltotoimenpiteitä. Anodi ja muut kuvaavat kiinteäoksidi-elektrolyysijärjestelmän perustuvan elektrolyytinä toimivaan kiinteäoksidikalvoon. Kalvon läpi kulkevat oksidi-ionit (O^{2-}), ja estää muiden aineiden sekoittumisen. Katodilla vesihöyry pelkistyy yhtälön 6 mukaisesti vedyksi ja negatiivisesti varautuneiksi oksidi-ioneiksi (O^{2-}).



Oksidi-ionit kulkeutuvat kalvon läpi anodille, missä ne hapettuvat luovuttamalla elektroneja ja muodostavat happea (yhtälö 7).



3.4 Vedyn tuotantomenetelmät ja ympäristövaikutukset

EIA (2023) kertoo vedyn olevan maailmankaikkeuden yleisin ja yksinkertaisin alkuaine. Sitä esiintyy maapallolla vain yhdisteissä muiden aineiden kanssa joko nesteinä, kaasuna tai kiinteässä muodossa. Vetyä ei löydy luonnosta käyttökelpoisessa muodossa, vaan se on erotettava yhdisteistä, jotta siitä saadaan käyttökelpoista. Vetyä erotetaan yleisimmin vedestä, biomassoista ja fossiilisista polttoaineista. IEA:n (n.d -a) mukaan vuonna 2023 tuotettiin 97 Mt (miljoona tonnia) vetyä, josta vain 1 % oli vähäpäästöistä. Korkeat tuotantokustannukset rajoittavat vähäpäästöisen vedyn tuotantoa, sillä sen hinta voi olla 1,5–6-kertainen verrattuna fossiilisista polttoaineista tuotettuun vetyyn.

Nationalgridin mukaan (2023) eri tuotantomenetelmillä valmistettu vety voidaan luokitella värikoodien avulla (taulukko 1). **Vihreä vety** tuotetaan elektrolyysillä, jossa käytetään uusiutuvalla energialähteillä tuotettua sähköä, kuten aurinko- ja tuulivoimaa. Tällä menetelmällä ei synny hiilidioksidipäästöjä. Vihreän vedyn osuus koko vedyn tuotannosta on kuitenkin pieni, sillä sen valmistuskustannukset ovat edelleen korkeat.

Sininen ja harmaa vety tuotetaan maakaasusta höyryreformoinnilla, jossa maakaasu ja kuuma vesihöyry reagoivat muodostaen vetyä ja hiilidioksidia. Sininen vety hyödyntää hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS, Carbon Capture and Storage), mikä vähentää tuotantoprosessin päästöjä ja tekee siitä vähäpäästöisen vaihtoehdon. Harmaa vety on yleisin vedyn tuotantotapa, ja se ei sisällä hiilidioksidin talteenottoa, joten kaikki prosessissa syntyvä hiilidioksidi vapautuu ilmakehään. **Musta vety** tuotetaan kivihiilestä. **Ruskea vety** tuotetaan ruskohiilestä. Ne tuottavat vetyä hiilen kaasutuksen avulla ja ovat ympäristölle haitallisimpia tuotantomuotoja. **Pinkki vety** valmistetaan elektrolyysillä käyttäen ydinvoimalla tuotettua sähköä. **Turkoosi vety** tuotetaan metaanin pyrolyysillä, jolloin syntyy sekä vetyä, että kiinteää hiiltä. **Keltainen vety** on elektrolyysillä tuotettua vetyä, jossa käytetään aurinkoenergiaa. **Valkoinen vety** on luonnossa esiintyvä vedyn muoto, jota voidaan mahdollisesti hyödyntää tulevaisuudessa.

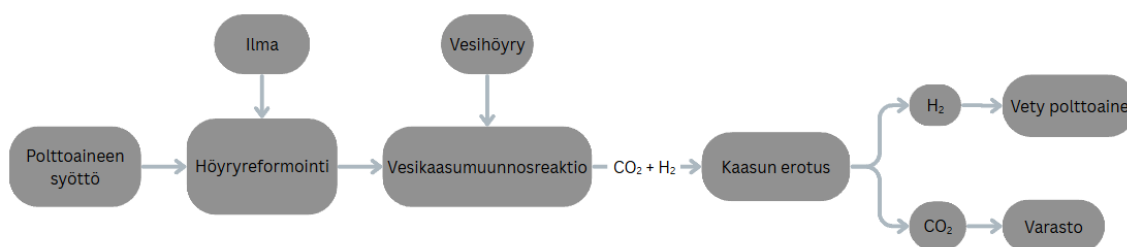
Taulukko 1. Vedyn eri tuotantomenetelmät jaettuna värikoodeihin sekä niiden käyttämät energialähteet ja hiilidioksidipäästöt.

| Värikoodi | Tuotantomenetelmä | Energianlähde | Päästöt (hiilidioksidi) |
|-----------|------------------------|--|---------------------------------------|
| Vihreä | Elektrolyysi | Uusiutuva sähkö (esim. tuuli ja aurinko) | Ei |
| Sininen | Höyryreformointi + CSS | Maakaasu | Vähäiset |
| Harmaa | Höyryreformointi | Maakaasu | Korkeat |
| Musta | Kaasutus | Kivihili | Erittäin korkeat |
| Ruskea | Kaasutus | Ruskohiili | Erittäin korkeat |
| Pinkki | Elektrolyysi | Ydinvoima | Ei |
| Turkoosi | Metaanin pyrolyysi | Maakaasu + lämpö | Vähäiset |
| Keltainen | Elektrolyysi | Aurinkoenergia | Ei |
| Valkoinen | Luonnossa esiintyminen | Maaperä | Ei tuotantopäästöjä, vaikea hyödyntää |

3.5 Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö

Power-to-X-teknologissa toinen keskeinen ainesosa vedyn lisäksi on hiilidioksidi. Hanson ja muut (2025, luku 1–2) mukaan ilmastotavoitteiden saavuttaminen on haastavaa samalla, kun fossiiliset polttoaineet ovat jatkuvassa käytössä. Yhtenä ratkaisuna toimii hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi (engl. *Carbon Capture, Utilization*

and Storage, CCUS). Hiilidioksidin talteenotto voidaan toteuttaa kahdella tavalla: ennen fossiilipolttoaineen polttamista (engl. *pre-combustion carbon capture*) tai sen jälkeen (engl. *post-combustion carbon capture*). Pre-combustion-menetelmässä fossiilipolttoaine reagoi ilman ja vesihöyryn kanssa muodostaen synteetikaasua, joka koostuu pääasiassa vedystä (H_2) ja hiilimonoksidista (CO). Tuotetut aineet voidaan erottaa vesikaasumuunnosreaktiolla (engl. *water-gas shift reaction*), jossa hiilimonoksidi reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen hiilidioksidia (CO_2) ja lisää vetyä. Lopuksi kaasut erotellaan kaasun erotustekniikoilla, jolloin hiilidioksidi voidaan varastoida ja vety hyödyntää puhtaana polttoaineena. Kuvassa 6 nähdään visualisoituna pre-combustion-prosessi. Hanson ja muut kuvailevat myös post-combustion-menetelmän. Siinä hiilidioksidi otetaan talteen polttoprosessin jälkeen syntyvästä kaasusta. Tämä tehdään kemiallisella tai fyysisellä absorptiolla. Menetelmän etuna on sen helppo käyttöönotto, sillä se voidaan integroida olemassa oleviin voimalaitoksiin ilman merkittäviä rakenteellisia muutoksia.



Kuva 6. Pre-combustion-hiilidioksidin talteenotto-prosessi (Mukaihen Hanson ja muut, 2025, luku 2).

Hansonin ja muiden (2025, luku 1–2) mukaan hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (engl. *Carbon Capture and Storage, CCS*) on yksi realistisimmista menetelmistä päästöjen vähentämiseen. CCS-menetelmässä talteen otettu hiilidioksidi voidaan varastoida geologisiin muodostumiin, kuten syviin suolavesikerrostumiin tai öljy- ja kaasukenttiin. Hiilidioksidia voidaan vaihtoehtoisesti hyödyntää Power-to-X-teknologiassa synteettisten polttoaineiden raaka-aineena, mikä vähentää päästöjä ja edistää kestävien energiamuotojen kehittämistä.

4 Power-to-X teknologiat ja toimintaperiaatteet

Kojin ja muiden (2019, luku 4) mukaan Power-to-X-teknologia perustuu prosessiketjuun, jossa sähköenergia muunnetaan eri lopputuotteiksi. X-kirjain viittaa muunnettua lopputuotetta. Esimerkiksi, jos P2X-menetelmällä tuotetaan vetyä, prosessia kutsutaan Power-to-Hydrogen (P2H). Vastaavasti jos tuotetaan nestemäisiä polttoaineita, kuten metanolia tai synteettistä dieseliä, prosessi tunnetaan nimellä Power-to-Liquid (P2L). P2X-prosessien tavoitteena on hyödyntää vain uusiutuvilla energialähteillä tuotettua sähköä. Tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista, jolloin voidaan hyödyntää hiilidioksidin talteenottoa. Koj ja muut (2019, luku 4) kertovat hiilidioksidin talteenoton mahdollistavan hiilineutraalin kiertotalousmallin (engl. *circular economy*). Tämä tarkoittaa, että synteettisten polttoaineiden polttamisessa vapautuva CO₂ vastaa tarkalleen talteen otettua määrää, jolloin kokonaispäästöt pysyvät nollassa.

4.1 Power-to-Heat

Power-to-Heat (P2H) -teknologialla tarkoitetaan sähköenergian muuntamista lämpöenergiaksi. Zhangin ja muiden (2018, luku 1–2) mukaan keskeisimmät sähköllä toimivat lämmöntuotantotavat ovat lämpöpumput ja sähkökattilat. Lämpöpumpun toiminta edellyttää lämmönlähteen, sähköenergian sekä lämmön käyttökohteen, kuten lämpövaraston tai kaukolämpöverkon. Laitteisto koostuu kompressorista, kuristusventtiilistä ja kahdesta lämmönvaihtimesta, joiden välillä kiertää kylmäaine. Lämpöpumpun käynnistysaika suunnitellun toimintatehon saavuttamiseksi on noin 5–15 minuuttia. Hyötysuhde on parempi mitä pienempi lämpötilaero on lämmönlähteen ja lämmön käyttökohteen välillä. Tämän vuoksi lämpöpumput soveltuvat hyvin yksittäisille kuluttajille, esimerkiksi asuinrakennuksissa. Lämpöpumppuja voidaan kuitenkin hyödyntää myös suurissa järjestelmissä, vaikka tällöin lämpöhäviöt ovat suurempia. Sähkökattila tuottaa lämpöä johtamalla korkeajännitteen suoraan veteen, mikä mahdollistaa alle viiden minuutin käynnistysajan täysin kylmästä täyteen tuotantotehoon. Käytännössä kattiloita pidetään kuitenkin valmiustilassa, jolloin täysi tuotantoteho saavutetaan jopa alle 30 sekunnissa. Tämä tekee sähkökattiloista nopean

ja joustavan ratkaisun erityisesti tilanteissa, joissa sähköntuotanto ylittää hetkellisesti kulutuksen. P2H-teknologialla tuotettua lämpöä voidaan hyödyntää teollisuudessa, kaukolämpöverkoissa tai varastoida myöhempää käyttöä varten.

4.2 Power-to-Liquids

Kojin ja muiden (2019, luku 4) mukaan Power-to-Liquids (P2L) tarkoittaa sähköenergian muuntamista nestemäisiksi kemikaaleiksi ja polttoaineiksi. Yksi keskeisimmistä prosesseista on metanolisynteesi, jossa vety ja hiilidioksidi reagoivat muodostaen metanolia. Metanolia voidaan hyödyntää sellaisenaan kemianteollisuudessa tai sitä voidaan jatkojalostaa muihin käyttötarkoituksiin. Lisäksi P2L-teknologian avulla voidaan tuottaa synteettistä dieseliä ja lentopolttoainetta, jotka tarjoavat vaihtoehdon fossiilisille polttoaineille ja auttavat vähentämään liikenteen hiilidioksidipäästöjä.

4.3 Power-to-Gas

Power-to-Gas (P2G) tarkoittaa sähköenergian muuntamista kaasuksi, tyypillisesti vedyksi tai metaaniksi.

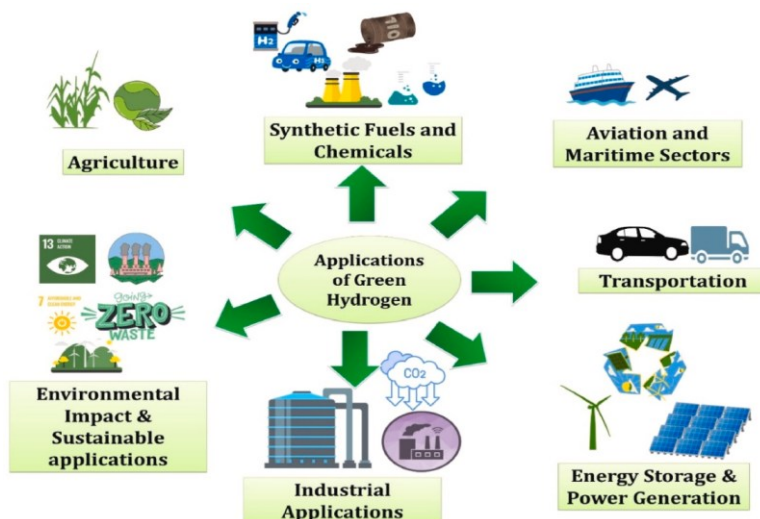
4.3.1 Power-to-Methane

Power-to-Methane (P2M) tarkoittaa sähköenergian muuntamista synteettiseksi metaaniksi. Zhang ja muut (2023, luvut 2–3) kuvaavat prosessin koostuvan kahdesta päävaiheesta: ensin elektrolyysin avulla tuotetaan vetyä, minkä jälkeen vety reagoi katalyyttisessä reaktiossa CCUS-teknologialla talteen otetun hiilidioksidin kanssa, muodostaen synteettistä metaania. Valmistettua metaania voidaan hyödyntää esimerkiksi kotitalouksien ja teollisuuden energianlähteenä, liikenteen polttoaineena sekä raaka-aineena kemianteollisuudessa. Prosessissa käytettävä hiilidioksidi on peräisin talteenotosta, minkä ansiosta synteettisen metaanin käyttö on hiilineutraalia (Koj ja muut, 2019, luku 4).

4.3.2 Power-to-Hydrogen

Power-to-Hydrogen on keskeinen osa P2G ja P2L toimintaketjuissa. Kojin ja muiden (2019, luku 4) mukaan keskeisimmät tuotanto menetelmät vedylle P2X-teknologiassa ovat alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja korkean lämpötilan kiinteäoksidielektrolyysi. Alkalielektrolyysi on näistä menetelmistä perinteisin, kustannustehokkain ja laajasti käytetty teollisissa sovelluksissa. PEM-teknologian vahvuutena on sen hyötysuhde ja nopea käynnistysaika. Kiinteäoksidielektrolyysi on uusi teknologia, ja sitä pidetään potentiaalisesti tehokkaimpana elektrolyysimenetelmänä sen korkeimman hyötysuhteen ansiosta. Kuitenkin sen pitkäaikainen kestävyys ja kyky skaalautua suuriin tuotantomääriin edellyttävät vielä lisätutkimuksia.

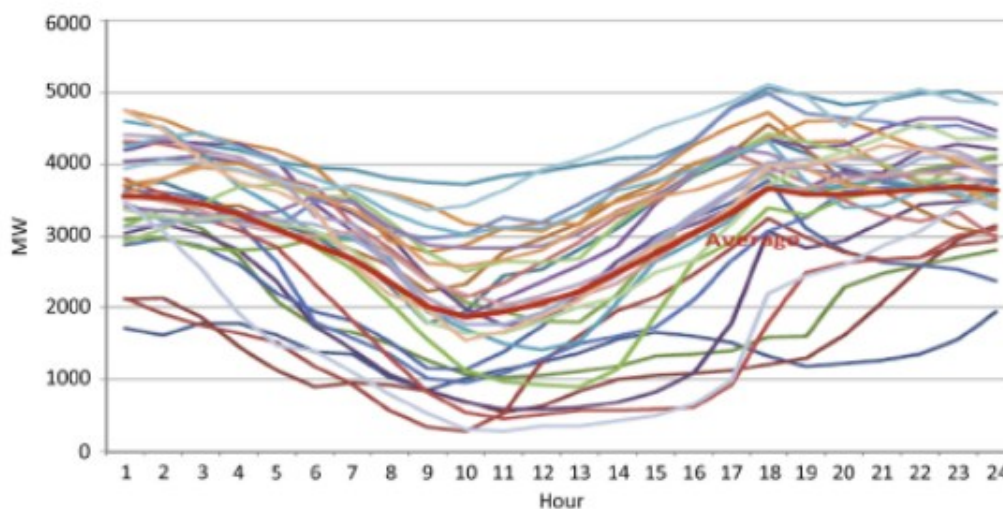
Anand ja muut (2025, luku 8) jakaa vedyn mahdolliset käyttökohteet kuvan 7 mukaisesti seitsemään eri osa-alueeseen, joihin kuuluvat: energian varastointi ja sähköntuotanto, teollisuus, tieliikenne, ilma- ja meriliikenne, maatalous, synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien tuotanto sekä ympäristöön ja kestäväan kehitykseen liittyvät sovellukset. Euroopan parlamentti (2024) arvioi, että vihreällä vedyllä voidaan vähentää energiantarvetta liikenteessä 20–50 % sekä teollisuudessa 5–20 %.



Kuva 7. Vihreän vedyn eri käyttökohteet: energianvarastointi ja -tuotanto, teollisuus, tieliikenne, maatalous sekä kestäväan kehityksen ja synteettisten polttoaineiden valmistus (Anand ja muut, 2025, luku 8).

5 Power-to-X-tekniologia sähköverkon tasapainottamisessa

Uusiutuvan energiatuotannon osuuden kasvaessa sähköverkon tasapainottaminen muuttuu yhä haastavammaksi. Tuuli- ja aurinkovoimalat, ovat sääriippuvaisia ja tuotanto voi vaihdella merkittävästi lyhyelläkin aikavälillä, jolloin säätövoiman tarve kasvaa. Kuvassa 8 havainnollistetaan, kuinka tuulivoiman tuotanto vaihtelee tunneittain. Energiategiellisuuden verkkosivuilla (n.d. -c) kerrotaan säätövoiman tarkoittavan sähköntuotannon joustavuutta, jolla varmistetaan, että tuotettu sähkömäärä vastaa jatkuvasti kulutusta. Yhteiskunnan sähköistyminen ja uusiutuvien energialähteiden lisääntyessä sähkönkysyntä ja -tarjonta vaihtelevat jatkuvasti. Säätövoimalla saadaan tasapainotettua nämä vaihtelut. Suomen säätövoimasta suuri osa tuotetaan vesivoimalla, joka joko tuotetaan itse Suomessa tai ostetaan muista Pohjoismaista. Vesivoima soveltuu hyvin säätövoiman tuottajaksi, koska sen tuotantoa on mahdollista säädellä nopeasti ja joustavasti tarpeen mukaan.



Kuva 8. Kalifornian tuulivoimaloiden päivittäinen sähköntuotanto. Eri värit edustavat eri päiviä (Moseley ja Jürgen, 2014, s. 6).

5.1 Sähköverkon tasapainottamisen periaatteet

Moseleyn ja Jürgenin (2014, s.5) mukaan sähköntuotannon ja -kulutuksen täytyy olla joka hetki tasapainossa. Jos sähköverkon tasapainoa ei pystytä ylläpitämään, järjestelmä

muuttuu epävakaa, mikä voi johtaa vakaviin taloudellisiin ja teknisiin ongelmiin. Sähköntuotannon ja -kulutuksen epätasapaino johtaa sähköverkon taajuuden muutokseen, ja mikäli taajuutta ei vakauteta, seurauksena voi olla osittainen sähkökatko tai laajamittainen vikatilanne, jossa tuotantolaitos irtautuu verkosta. Suomen sähköverkon nimellistaajuus on 50 Hz ja sen sallittu vaihteluväli on 49,9–50,1 Hz, jossa alle 50 Hz taajuus merkitsee tuotannon alijäämää ja yli 50 Hz taajuus ylijäämää (Fingrid, n.d. -c). Sähköntuotannon ylittäessä kulutuksen, ylimääräinen sähköenergia tulee varastoida tai sen syöttö pitää katkaista, jotta taajuuden ja jännitteen nousulta vältytään (Moseley ja Jürgen, 2014, s.5).

Honkapuron ja muiden (2020, s.13) mukaan arvaamattomia ongelmatilanteita varten Pohjoismaat varaavat reserviin sähköenergiaa, jonka avulla voidaan ylläpitää taajuutta ja tehotasapainoa. Normaalitilanteita varten varattu reservi on 600 MW ja häiriötilanteita kuten suuren tuotantolaitoksen vioittumisia varten varattu teho on 1200 MW. Uusiutuvien energialähteiden sähköntuotanto on vaihtelevaa, mikä aiheuttaa taajuuden vaihtelua. Tämän vuoksi Honkapuro ja muut arvioivat, että reservien tarve saattaa kasvaa tulevaisuudessa. Honkapuro ja muut (2020, s. 27) esittävät yhtenä ratkaisuna Power-to-Hydrogen-tekniikan, jonka avulla ylijäämäenergiaa voitaisiin varastoida vetyyn ja hyödyntää myöhemmin sähköntuotannon alijäämätilanteissa joustona.

5.2 P2X-tekniikan hankkeita Suomessa ja Euroopassa

Suomessa ja Euroopassa on monia hankkeita P2X-tekniikkaan. Tässä luvussa tarkastellaan näitä hankkeita.

5.2.1 Suomen hankkeita

Grzybowski (2025) mukaan Wärtsilä, Vaasan Sähkö ja EPV Energy suunnittelevat Vaasaan Power-to-X-to-Power-järjestelmää, jonka keskeinen komponentti on vihreä vety. Varastoidun vedyn avulla voidaan tuottaa sähköä takaisin verkkoon tilanteissa, joissa tuulivoiman tuotanto ei riitä kattamaan kulutusta. Hankkeessa hyödynnetään niin

sanottua *hydrogen–argon power cycle* -prosessia, jossa vetyä poltetaan argoni- ja happiatmosfäärissä. Prosessi parantaa vedyn palamisen hyötysuhdetta ja hyödyntää elektrolyysiprosessissa tuotettua happea. Palamisessa ei synny lainkaan päästöjä, ja ainoana reaktiotuotteena syntyy vettä, joka voidaan hyödyntää uudelleen elektrolyysiprosessissa. Lisäksi prosesseissa sivutuotteena syntyvä lämpö varastoidaan, joka hyödynnetään Vaasan kaukolämpöverkossa asukkaiden tarpeisiin.

Suomen ensimmäinen teollisen mittakaavan vetytuotantolaitos otettiin käyttöön vuonna 2025 Harjavallassa. P2X Solutionsin (n.d.) mukaan laitoksen elektrolyysikapasiteetti on 20 MW, ja se tuottaa vihreää vetyä. Tuotettua vetyä hyödynnetään synteettisen metaanin valmistuksessa. P2X Solutions suunnittelee lisäksi vetylaitoksia Joensuuhun ja Ouluun. Joensuuhun laitoksen elektrolyysikapasiteetti olisi noin 30–40 MW, ja Oulun laitoksen kapasiteetti jopa 100 MW. Molemmissa hankkeissa syntyvä lämpö aiotaan hyödyntää kaukolämmössä: Joensuussa laitos voisi kattaa noin 15–20 % kaupungin kaukolämmön tarpeesta ja Oulussa vastaavasti 10–30 %.

5.2.2 Euroopan hankkeita

European Energy (2025a) mukaan Tanskan Kassøn alueella sijaitsee maailman ensimmäinen teollisen mittakaavan synteettisen metanolin tuotantolaitos. Laitos hyödyntää pää energialähteenä aurinkovoimaa, ja sen elektrolyysikapasiteetti on 52,5 MW. Metanolin valmistukseen tarvittava hiilidioksidi saadaan läheiseltä biokaasulaitokselta. Voimalaitoksella on mahdollista valmistaa 42 000 tonnia eli noin 53 miljoonaa litraa metanolia vuodessa, ja yksi sen päätarkoituksista on tuottaa polttoainetta uusiin metanolikäyttöisiin rahtialuksiin (European Energy, 2025b).

HØSTin (n.d.) mukaan Tanskan Esbjergiin on suunnitteilla yksi Euroopan suurimmista Power-to-X-laitoksista. Laitos käyttäisi energianlähteenään ainoastaan uusiutuvaa sähköä, ja sen suunniteltu elektrolyysikapasiteetti on 1 GW. Tavoitteena on tuottaa vuosittain noin 100 000 tonnia vihreää vetyä, joka myydään sellaisenaan suunnitteilla olevaan vetyverkostoon tai jatkojalostetaan vihreäksi ammoniakiksi, jota voidaan

valmistaa jopa 600 000 tonnia vuodessa. Lisäksi laitoksessa syntyvän lämmön on suunniteltu kattavan noin 15 000 asuinrakennuksen lämmitystarpeet.

6 Johtopäätökset

Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, käyttö tulee lisääntymään tulevaisuudessa energiamurroksen myötä. Näiden tuotanto on kuitenkin sääriippuvaista, mikä johtaa ajoittain energiaylijäämään tai -alijäämään. Sähköntuotannon ja -kulutuksen täytyy olla joka hetki tasapainossa, jotta sähkövoimajärjestelmä säilyy vakaana ja toimintavarmana. Perinteisesti sähköverkon tasapainotusta on tuotettu vesivoiman avulla, mutta vaihtelevan tuotannon osuuden kasvu lisää tarvetta uusille joustoresursseille, kuten Power-to-X-tekniikalle, täydentämään nykyisiä ratkaisuja.

Tutkielman perusteella Power-to-X (P2X) -tekniikka tehostaa uusiutuvien energialähteiden hyödyntämistä, sillä tuotantoa ei tarvitsisi rajoittaa, vaan ylijäämäenergia voitaisiin varastoida myöhempää käyttöä varten. Lisäksi tekniikalla on mahdollista vähentää päästöjä ja korvata fossiilisia polttoaineita useilla sektoreilla sen tuottamien synteettisten polttoaineiden avulla. Tutkielmassa tuodaan esiin vedyn merkitys Power-to-X-tekniikan osana ja sen potentiaali kestävässä energiaratkaisuissa. Suomi on riippuvainen sähköenergian tuonnista erityisesti talvikuukausina kulutushuippujen aikana, jolloin varastoidulla energialla voitaisiin parantaa energiaomavaraisuutta. Mahdollisia sähköverkon häiriötilanteita varten varataan reservienergiaa, ja myös tähän käyttötarkoitukseen P2X-tekniikkaa voitaisiin hyödyntää.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että P2X-tekniikalla on potentiaalia tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Suomessa ja Euroopassa on jo toiminnassa P2X-laitoksia, ja uusia hankkeita on suunnitteilla erityisesti alueille, jossa on merkittävästi uusiutuvaa energiantuotantoa. Tutkielman perusteella voidaan todeta, että P2X-tekniikalla voidaan edistää tulevaisuuden hiilineutraalisuus- ja myös hiilinegatiivisuustavoitteiden saavuttamista.

7 Yhteenveto

Tutkielman tavoitteena oli selvittää Power-to-X (P2X) -teknologian roolia sähköverkon tasapainottajana uusiutuvien energialähteiden lisääntyessä. Lisäksi tarkasteltiin teknologian keskeisiä sovelluksia ja mahdollisia käyttötarkoituksia.

Tutkielma perustui kirjallisuuskatsaukseen, jossa tarkasteltiin uusiutuvan energiantuotannon lisääntymistä sekä P2X-teknologian sovelluksia eri käyttökonteksteissa. Lisäksi tarkasteltiin elektrolyysiä ja hiilidioksidin talteenottoa, sillä suurin osa P2X-sovelluksista perustuvat näihin prosesseihin.

Tarkastelun näkökulmana oli P2X-teknologian ja sen tuotteiden potentiaali osana kehittyvää hiilineutraalia energiajärjestelmää. Tutkielmassa käsitellään Suomen energiajärjestelmän nykytilaa, P2X-teknologian keskeisiä sovellusmuotoja sekä näissä hyödynnettäviä raaka-aineita, kuten vetyä ja hiilidioksidia.

Tutkielman havaintojen perusteella P2X-teknologialla on potentiaalia toimia osana tulevaisuuden energiajärjestelmää. P2X-teknologian sovellusten avulla voidaan vähentää päästöjä eri sektoreilla sekä tehostaa uusiutuvan energian hyödyntämistä. Erityisesti vedyllä on keskeinen rooli sekä raaka-aineena muiden P2X-tuotteiden valmistuksessa että itsenäisenä polttoaineena teollisuudessa, liikenteessä ja energiantuotannossa. Lisäksi teknologia voi edistää energiaomavaraisuutta esimerkiksi talvikuukausien huippukulutuksien aikana sekä osallistua tarvittaessa reservimarkkinoille. P2X-teknologiaan kohdistuva kiinnostus näkyy Suomessa ja Euroopassa sekä käynnissä olevissa että suunnitteilla olevissa hankkeissa. Havainnot viittaavat siihen, että teknologialla on kasvava rooli tulevaisuuden hiilineutraalissa ja mahdollisesti myös hiilinegatiivisessa energiajärjestelmässä.

Lähteet

- Anand, C., Chandrara, B., Nithiya, P., Akshaya, M., Tamizhdurai, P., Shoba, G., Subramani, A., Kumaran, R., Yadav, K. K., Gacem, A., Bhutto, J. K., Alreshidi, M. A. & Alam, M. W. (2025). Green hydrogen for a sustainable future: A review of production methods, innovations, and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 111, Pages 319-341.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.257>
- Energiäteollisuus (n.d. -a). *Sähköntuotanto*. Noudettu 28.2.2025 osoitteesta
<https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/#miten-suomen-sahkontuotannosta-saadaan-100-prosenttisesti-hiilineutraali>
- Energiäteollisuus (n.d. -b). *Sähköverkot*. Noudettu 23.3.2025 osoitteesta
<https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/sahkoverkot/>
- Energiäteollisuus (n.d. -c). *Säätövoima*. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta
<https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima/#mitka-ovat-saatovoiman-hyodyt-ja-haitat>
- Euroopan parlamentti (12.6.2024). *Miten EU edistää uusiutuvaa energiaa*. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta
<https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20221128STO58001/miten-eu-edistaa-uusiutuvaa-energiaa>
- European Energy (12.3.2025-a) *European Energy produces first e-methanol at Kassø*. Noudettu 5.4.2025 osoitteesta
<https://europeanenergy.com/2025/03/12/european-energy-produces-first-raw-e-methanol-at-kasso/>
- European Energy (14.3.2025-b) *European Energy & Mitsui & Co. to inaugurate Kassø e-methanol facility in May 2025*. Noudettu 5.4.2025 osoitteesta
<https://europeanenergy.com/2025/03/14/european-energy-mitsui-co-to-inaugurate-kasso-e-methanol-facility-in-may-2025/>
- Fingrid (1.3.2025-a) *Fingridin sähköjärjestelmävisio vuodelle 2040*. Noudettu 3.4.2025 osoitteesta

<https://www.fingrid.fi/contentassets/c0abbd8691bc41ad9bcb999fcfc7dffe/sahkojarjestelmavisio---skenaarioluonnosraportti-maaliskuu-2025.pdf>

Fingrid (20.3.2024-b) *Yhteenveto sähköjärjestelmän toiminnasta talvella 2023–2024.*

Noudettu 24.3.2025 osoitteesta

<https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/yhteenveto-sahkojarjestelman-toiminnasta-talvella-20232024/>

Fingrid (n.d. -c) *Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito.* Noudettu 2.3.2025

osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/#taajuusmittausdata>

Fingrid (n.d. -d) *Suomen sähköjärjestelmä.* Noudettu 23.3.2025 osoitteesta

<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid (n.d. -e) *Sähkön tuotanto ja kulutus.* Noudettu 24.3.2025 osoitteesta

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>

Godula-Jopek, A. & Stolten, D. (2015) *Hydrogen Production : By Electrolysis* (ISBN 978-3-527-33342-4). John Wiley & Sons, Incorporated. Rajattu pääsy osoitteesta

<https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=1956440>

Grzybowski, M. (3.2.2025). *Hydrogen in port and on land from Finnish wind and sun.*

European Cluster Collaboration Platform. Noudettu 5.4.2025 osoitteesta

<https://www.clustercollaboration.eu/content/hydrogen-port-and-land-finnish-wind-and-sun>

Hanson, E., Nwakile, C. & Hamed V. O. (2025). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO2 emissions. *Results in Surfaces and Interfaces*, volume 18.

<https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100381>

Honkapuro S., Sihvonen V., Partanen J., Harsia P., Kallioharju K., Kortetmäki A., Järventausta P., Repo S., Remes L. ja Ketomäki J. (2020) *Jousto 2035 visio – Energiajärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiaali 2035* (ISBN 978-952-335-582-8). Osoitteesta

<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161812/Jousto%202035%20visio>

[%20-%20Energiaj%C3%A4rjestelm%C3%A4n%20jouston%20tarpeet%20ja%20toteutuspotentiaali%202035.pdf](#)

HØST PtX Esbjerg (n.d.) About the plant. Noudettu 5.4.2025 osoitteesta <https://hoestptxesbjerg.dk/about-ptx/>

International Energy Agency (2.10.2024-a) Hydrogen production. Noudettu 1.4.2025 osoitteesta <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>

International Energy Agency (n.d. -b) Climate Change. Noudettu 25.3.2025 osoitteesta <https://www.iea.org/topics/climate-change>

Koj, J. C., Wulf, C. & Zapp, P. (2019). Environmental impacts of power-to-X systems - A review of technological and methodological choices in Life Cycle Assessments. *Renewable and Sustainable Energy Review*, volume 112, pages 865-879. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.029>

Moseley T. P. & Garche J. (2014). *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01253-7>

Nationalgrid (23.02.2023) *The hydrogen color spectrum*. Noudettu 23.2.2025 osoitteesta <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>

P2X Solutions (n.d.) *Hankkeemme*. Noudettu 5.4.2025 osoitteesta <https://p2x.fi/hanke/>

Suomen uusiutuvat (30.1.2025-a) *Tuulivoimahankkeet Suomessa*. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta https://suomenuusiutuvat.fi/media/2025.01_surf-tuulivoimahankkeet-suomessa-1.pdf

Suomen uusiutuvat (n.d. -b) *Miksi tuulivoimaa*. Noudettu 9.4.2025 osoitteesta <https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/miksi-tuulivoimaa/>

Suomen uusiutuvat (30.1.2025-c) *Aurinkovoima hankekehitys Suomessa*. Noudettu 9.4.2025 osoitteesta https://suomenuusiutuvat.fi/media/2025.01_surf-aurinkovoimahankkeet-suomessa.pdf

Tieto.Traficom (13.08.2024) *Kotimaan liikenteen CO₂-päästöt liikennemuodoittain*. Noudettu 17.3.2025 osoitteesta <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/kotimaan-liikenteen-co2-paastot-liikennemuodoittain>

- Työ- ja elinkeinoministeriö (2022). *Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiasstrategia* (ISBN pdf: 978-952-327-811-0). Osoitteesta https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM_2022_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- U.S. Energy Information Administration (23.06.2023) *Hydrogen explained*. Noudettu 24.2.2025 osoitteesta <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/>
- Zhang, J., Liu, Z., Gao X., Wang K., Liang, J., Jiang, Y., Ma, Q., Zhao, T.-S. (2023). A short overview of Power-to-Methane: Coupling preparation of feed gas with CO₂ methanation. *Chemical Engineering Science*, volume 274. Osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118692>
- Zhang, Y., Zhou, Y., Song, P., Liu, W., Wang, X., Chen, H. & Lei, X. (2013). *The Research on Application of Power-to-Heat (P2H) Technologies Combined into Integrated Energy System*. Noudettu osoitteesta <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2018.8601826>