

# **Power-to-X-tuotteiden kemiallinen ja prosessitekkinen vertailu sekä niiden rooli energiajärjestelmässä**

Petri Lakka

Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu

Energiatekniikan osasto

02/2026

Asiantuntijaselvitys

## Tiivistelmä

Selvityksessä tarkastellaan Power-to-X-teknologioita teknisestä ja energiajärjestelmän näkökulmasta. Työn painopisteenä on e-metaanin, e-metanolin ja e-ammoniakin kemialliset ja prosessitekniset erot sekä prosessien energiatehokkuus, joustavuus sekä reaktiolämmön hyödyntäminen. Pilottilaitosten roolia arvioidaan siirryttäessä kohti kaupallista mittakaavaa.

Tuotteiden väliset erot ovat rakenteellisia ja ne eivät korostu yksittäisissä prosesseissa, vaan liittyvät koko tuotantoketjuun. E-metaanin tuotanto perustuu Sabatier–reaktioon, jossa merkittävä osa vedystä sitoutuu sivutuotteena syntyvään veteen. Tämä heikentää vedyn käyttöastetta, ja sitä kautta järjestelmän energiatehokkuutta. E-metaani soveltuu parhaiten alueellisiin ratkaisuihin, joissa voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa kaasuinfrastruktuuria.

E-metanolin tuotannossa vedyn käyttöaste on korkeampi ja lopputuotteen nestemäinen olomuoto helpottaa tuotteen varastointia ja kuljetusta. E-metanolin käyttö on monipuolinen etenkin meriliikenteen ja kemianteollisuuden näkökulmasta.

E-ammoniakin tuotannossa vety sitoutuu lopputuotteeseen lähes kokonaan. Lämpötila- ja painevaatimukset aiheuttavat prosessin joustamattomuutta, mutta reaktiolämpö on korkealämpöistä prosessihöyryn tuotantoon. Energiajärjestelmän näkökulmasta e-ammoniakki tukee pitkäaikaista varastointia sekä soveltuu myös lannoiteteollisuuden raaka-aineeksi, missä muuntohäviöt eivät ole tärkein rajoite.

Lämpöpumppujen rooli ei ole yhtenäinen PtX-laitoksissa, kun tarkastellaan reaktio- ja hukkalämpöä. E-metanoliprosessissa se on tärkeä energiatehokkuuden näkökulmasta, mutta e-metaanissa täydentävä ja e-ammoniakin tuotannossa tarpeeton, koska e-metaanin tuotannossa syntyvä hukkalämpö on korkeammassa lämpötilassa ja e-ammoniakin osalta vielä korkeammassa lämpötilassa. Kun PtX-tuotantoon integroidaan lämpöä, on huomioitava laitoksen koko, käyttöaste sekä ympäröivä energiajärjestelmä.

Pilottilaitoksilla on merkittävä rooli PtX-teknologioiden kehityksessä. Pilotointivaiheessa voidaan arvioida prosessien toimivuutta vaihtelevissa kuormitustilanteissa sekä katalyyttien kestävyyttä ja lämpöintegraation todellista hyötyä.

EU-sääntely luo kysynnän PtX-tuotteille, mutta niiden rooli määräytyy teknisten ominaisuuksien, markkinakysynnän ja alueellisuuden mukaan. Suomen vahvuutena ovat uusiutuva sähkö, biogeeniset hiilidioksidilähteet sekä tutkimus- ja pilotointiosaaminen.

## Sisällysluettelo

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tiivistelmä</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>1. Johdanto</b>                                   | <b>6</b>  |
| <b>2. Power-to-X energiajärjestelmässä</b>           | <b>7</b>  |
| 2.1 Power-to-X:n määritelmä                          | 7         |
| 2.2 Ilmasto- ja energiapolitiikka                    | 7         |
| 2.3 Sähköjärjestelmän joustoelementti                | 7         |
| <b>3. E-metaani</b>                                  | <b>8</b>  |
| 3.1 Kemiallinen ja prosessitekkinen perusta          | 8         |
| 3.2 E-metaanin pilottihankkeet Suomessa              | 9         |
| 3.3 Pilottivaiheen reaktoriratkaisut                 | 11        |
| 3.4 Energiatehokkuus ja lämmönhallinta               | 12        |
| <b>4. E-metanoli</b>                                 | <b>14</b> |
| 4.1 E-metanolin rooli energiajärjestelmässä          | 14        |
| 4.2 Metanolisynteesi                                 | 15        |
| 4.3 E-metanolin energiatehokkuus                     | 16        |
| 4.4 Reaktiolämmön hyödyntäminen                      | 17        |
| 4.5 E-metanolin pilotti- ja kehityshankkeet Suomessa | 18        |
| <b>5. E-ammoniakki</b>                               | <b>20</b> |
| 5.1 E-ammoniakin kemiallinen luonne                  | 20        |
| 5.2 Prosessitekkiniset vaatimukset                   | 21        |
| 5.3 E-ammoniakki energiajärjestelmässä               | 22        |
| <b>6. Power-to-X-tuotteiden vertailu</b>             | <b>23</b> |
| 6.1 Kemiallinen ja prosessitekkinen vertailu         | 23        |
| 6.2 Reaktiolämpö ja hukkalämpö                       | 26        |
| 6.3 Reaktiolämmön synty ja hyödyntämismahdollisuudet | 27        |
| 6.4 Lämpöpumpun rooli hukkalämmössä                  | 28        |
| 6.5 Turvallisuusriskit Power-to-X-tuotannossa        | 29        |
| <b>7. Power-to-X-tuotteiden markkinat ja kysyntä</b> | <b>30</b> |
| 7.1 PtX-tuotteiden markkinat ja käyttökohteet        | 30        |
| 7.2 Sääntelyn ja päästöohjauksen vaikutus kysyntään  | 31        |

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>8. Euroopan Unionin rooli PtX-arvoketjussa</b>                         | <b>31</b> |
| 8.1 EU-rahoituksen kohdentuminen PtX-hankkeisiin                          | 33        |
| <b>9. Suomen rooli Power-to-X-ketjussa</b>                                | <b>33</b> |
| <b>10. Power-to-X-tekniologioiden tekniset haasteet ja kehitystarpeet</b> | <b>35</b> |
| 10.1 Sähkön hinnan ja käyttöasteen merkitys PtX-tuotannossa               | 35        |
| 10.2 Prosessien energiatehokkuus ja vaihtelevat käyttöolosuhteet          | 36        |
| 10.3 Lämpöintegraation merkitys                                           | 36        |
| 10.4 Raaka-aineiden saatavuus                                             | 37        |
| 10.5 Pilottilaitosten tärkeä rooli                                        | 37        |
| <b>11. Yhteenveto</b>                                                     | <b>40</b> |
| <b>Lähdeluettelo</b>                                                      | <b>42</b> |

## 1. Johdanto

Uusiutuvan sähköntuotannon nopea kasvu muokkaa energiajärjestelmää lähitulevaisuudessa voimakkaasti. Samalla nousee tarve ratkaisuille, joilla voidaan varastoida, siirtää ja hyödyntää sähköä sektoreilla, joita ei voida suoraan sähköistää. Power-to-X-teknologiat tarjoavat keinoja muuntaa uusiutuvaa sähköä kemialliseen energiaan ja raaka-aineiksi, kuten e-metaaniksi, e-metanoliksi ja e-ammoniakiksi.

Työssä keskitytään erityisesti kolmen tärkeän Power-to-X-tuotteen kemiallisiin ja prosessitekniisiin eroihin sekä prosesseissa muodostuvan reaktiolämmön ja hukkalämmön hyödyntämiseen. Painopisteenä on myös pilottilaitosten sekä kehitysvaiheen hankkeiden rooli teknologian skaalautuvuuden sekä energiaintegraation kannalta.

Työ ei ole yksittäisen laitoksen suunnitteluohje tai investointilaskelma, vaan tavoite on muodostaa kokonaiskuva Power-to-X-teknologioiden teknisistä edellytyksistä, rajoitteista sekä mahdollisuuksista osana laajaa energiajärjestelmää. Erityishuomio on Suomen asemassa Power-to-X-arvoketjussa sekä Euroopan unionin sääntelyn ja energiapolitiikan vaikutuksissa teknologioiden kehitykseen ja markkinaedellytyksiin.

Tarkoituksena on tuottaa myös tietoa, joka tukee Power-to-X-teknologioiden pilotointia, jatkokehitystä ja kaupallista käyttöönottoa sekä tunnistaa olosuhteet, joissa eri e-tuotteet muodostavat teknisesti tarkoituksenmukaisia ratkaisuja.

Työssä tarkastellaan seuraavia tutkimuskysymyksiä:

1. Miten e-metaani, e-metanoli ja e-ammoniakki eroavat toisistaan kemiallisesti ja tuotantoprosessien näkökulmasta, ja miten erot näkyvät niiden käyttökohteissa?
2. Miten Power-to-X-prosessien energiatehokkuus, joustavuus ja reaktiolämmön hyödyntäminen eroavat eri e-tuotteiden välillä?
3. Mikä merkitys pilottilaitoksilla on Power-to-X-teknologioiden kehityksessä ja millaista tietoa pilotointivaiheessa saadaan ennen kaupallista tuotantoa?
4. Millaiset edellytykset Suomella on Power-to-X-tuotteiden tuotannossa ja viennissä suhteessa Euroopan unionin energiapolitiikkaan?

## **2. Power-to-X energiajärjestelmässä**

### **2.1 Power-to-X:n määritelmä**

Power-to-X (PtX) tarkoittaa yleisesti teknologioita, joissa erityisesti tuuli- ja aurinkoenergiaa muunnetaan energiantantajiksi tai erilaisiksi tuotteiksi, kuten polttoaineiksi tai kemikaaleiksi [1], [5], [8].

Power-to-X-prosesseissa uusiutuvaa energiaa käytetään elektrolyysissä, jossa muodostetaan vedestä sähkövirran avulla vihreää vetyä. Vihreää vetyä voidaan käyttää suoraan energianlähteenä tai yhdistää hiilidioksidin tai typen kanssa, jos halutaan tuottaa e-polttoaineita. Hiilidioksidi voidaan ottaa talteen esimerkiksi teollisuuden savukaasuista. Vedyn ja typen yhdiste ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) toimii lannoitteen raaka-aineena sekä polttoaineena [1], [5], [8], [9].

### **2.2 Ilmasto- ja energiapolitiikka**

Euroopan ja Suomen ilmastopolitiikan tavoitteet ovat kunnianhimoisella tasolla. Koko Euroopassa kasvihuonekaasupäästöjen on vähennettävä vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä ja ilmastoneutraalius on tarkoitus saavuttaa vuoteen 2050 mennessä. Suomessa hiilineutraalius on tavoitteena vuoteen 2035 mennessä [2], [3], [6].

Power-to-X-tuotteet, kuten synteettiset polttoaineet, tarjoavat ratkaisuja sektoreille, joita on hankala suoraan sähköistää. Näitä sektoreita ovat raskas teollisuus, lentoliikenne sekä meriliikenne. Päästökaupan laajentuminen kattamaan tieliikenne ja meriliikenne, luo paineita siirtyä vähäpäästöisiin sekä hiilineutraaleihin vaihtoehtoihin, kuten e-polttoaineisiin [2], [5], [6].

### **2.3 Sähköjärjestelmän joustoelementti**

EU:n ja Suomen ilmastopolitiikan mukaan suora sähköistäminen on ensisijainen keino päästöjen vähentämiseen. Synteettiset polttoaineet, kuten e-metanoli, täydentävät alat, joissa sähköistäminen ei ole teknisesti vielä mahdollista [4], [5].

Tällä hetkellä uusiutuvaa sähköntuotantoa (tuuli, aurinko) rakennetaan nopeasti ja usein niin, että sähköjärjestelmä ei kasva samaa vauhtia. Sähköenergiaa ei silloin saada varastoitua tai muunnettua tarpeeksi nopeasti. Tässä kohtaa synteettiset polttoaineet astuvat kuvaan. Ne pystyvät varastoimaan ylijäämäsähköä pitkään, ja niitä voidaan kuljettaa pitkiä matkoja. Vaikka PtX-prosessit lisäävät sähkönkulutusta, niin ne myös tasapainottavat sähköverkkoja jouston kautta [4], [7], [9], [29].

### 3. E-metaani

#### 3.1 Kemiallinen ja prosessitekkinen perusta

E-metaani on yksi Power-to-X-prosessin tuotteista. E-metaani eli synteettinen metaani on hiilineutraali polttoainevaihtoehto fossiiliselle maakaasulle [1], [5], [8].

E-metaanin valmistuksessa tuotetaan uusiutuvalla energialla ensin vihreää vetyä. Vedyn valmistuksessa käytetään elektrolyysiä, jossa vesi hajotetaan sähkövirran avulla vedyksi ja hapeksi [1], [4], [5].

Vihreä vety ja esimerkiksi sellutehtaan savukaasuista talteenotettu hiilidioksidi yhdistetään toisiinsa Sabatier-reaktiossa:



Osa vedystä sitoutuu sivutuotteena muodostuvaan veteen, mikä heikentää vedyn hyötykäyttöä prosessissa. Reaktio on eksotermisen eli vapauttaa lämpöä, ja matalammat lämpötilat siirtävät reaktion tasapainoa metaanin muodostumisen suuntaan [8], [9], [10].

Perinteisesti prosessissa käytetään nikkelpohjaisia katalyyttejä. Jalometallikatalyytit, kuten rhodium, mahdollistavat alhaisemmat lämpötilat, mutta niiden korkea hinta rajoittaa käyttöä. Tämän vuoksi jalometalleja käytetään lähinnä pilottihankkeissa [10], [11].



### 3.2 E-metaanin pilottihankkeet Suomessa

Suomessa on tällä hetkellä käynnissä useita synteettisen metaanin pilotti- ja kehityshankkeita. Hankkeissa on tarkasteltu lähinnä sitä, miten metanointiteknologia toimii sekä miten erilaiset hiilidioksidilähteet soveltuvat prosesseihin. Erityisesti biogeeninen hiilidioksidi, kuten metsäteollisuuden savukaasuista talteenotettu CO<sub>2</sub>, on ollut tutkimuksen kohteena, koska se tukee hiilineutraaliutta luonnollisella hiilen kierrolla [8], [9], [12].

Pilottilaitosten tuotantomäärät ovat suhteellisen pieniä, tavoitteena on erityisesti prosessien toimivuuden testaus vaihtelevissa olosuhteissa. Myös metanointireaktoreiden hyötysuhde, reaktorien lämpötilat ja katalyyttien kestävyys ovat olleet tutkimuksen kohteena [9], [10], [16].

Pilottihankkeissa on kohdattu myös haasteita, kuten korkeat investointikustannukset sekä synteettisten polttoaineiden kilpailukyky suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin [1], [8], [17].

Pilottihankkeissa hyödynnetään useimmiten Sabatier-reaktiota sekä käytetään tyypillisesti kiinteäkatalyyttireaktoreita, joissa reaktio tapahtuu useissa vaiheissa. Reaktion eksotermisyys edellyttää tehokasta lämmönpoistoa, jolloin katalyytti ei vaurioidu, ja reaktio saadaan pidettyä vakaana. Haasteena on myös vedyn hyötysuhde, mikä heikentää prosessin energiantuottoa ja sitä kautta prosessin kokonaishyötysuhdetta [10], [16], [17].

Myös hiilidioksidin puhtaus on osoittautunut kriittiseksi tekijäksi metanointiprosessissa. Savukaasuista talteenotettu hiilidioksidi sisältää usein epäpuhtauksia. Tämä heikentää katalyyttien toimintaa ja samalla lyhentää niiden käyttöikää. Pilotointivaiheessa tämä on näkynyt lisäpuhdistusvaiheina, mikä kasvattaa kustannuksia [10], [16], [12].

Vihreän vedyn tuotanto perustuu enimmäkseen vaihtelevaan tuuli- ja aurinkosähköön. Metanointiprosessien on toimittava joustavasti sekä käynnistytävä toistuvasti ilman tehokkuuden heikkenemistä. Tällöin reaktoreille ja automaatiolle on asetettava erityisiä vaatimuksia [9], [14], [17].

Taulukoista 1 ja 2 nähdään, että useat pilottihankkeet ovat edenneet vaiheeseen, josta siirrytään kohti kaupallista tuotantoa.

**Taulukko 1. E-metaanin pilotti- ja tutkimuslaitokset**

| Hanke/<br>laitos              | Sijainti          | Toimija           | Laitostyyppi                     | CO <sub>2</sub> -lähde                    | Status    | Tutkimusteemat                             |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------|
| Bioruukki<br>Power-to-Gas     | Espoo             | VTT               | Pilottilaitos                    | Biogeeninen<br>savukaasu<br>(biomassa)    | Käytössä  | Katalyytit ja<br>niiden kestävyys          |
| BioCat/PtG-pilotti            | Espoo             | VTT               | Pilottilaitos                    | Biogeeninen<br>CO <sub>2</sub> (biokaasu) | Päättynyt | Biologinen ja<br>kemiallinen<br>metanointi |
| LUT Power-to-Gas-<br>tutkimus | Lappeen-<br>ranta | LUT<br>University | Tutkimus- ja<br>pilotointilaitos | Biogeeninen<br>CO <sub>2</sub>            | Käynnissä | Mallinnus,<br>optimointi                   |

Lähteet: [8], [9], [12], [38], [39]

**Taulukko 2. E-metaanin mahdolliset kaupalliset hankkeet**

| Hanke/<br>laitos               | Sijainti   | Toimija           | Laitostyyppi | CO <sub>2</sub> -lähde                                             | Status                                     | Käyttökohteet                       |
|--------------------------------|------------|-------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
| E-metaani/<br>e-polttoaineet   | Tampere    | Nordic<br>Ren-Gas | Kaupallinen  | Biogeeninen<br>CO <sub>2</sub>                                     | Suunnittelu                                | Raskas liikenne,<br>teollisuus      |
| E-metaanihanke                 | Lahti      | Nordic<br>Ren-Gas | Kaupallinen  | Biogeeninen<br>CO <sub>2</sub>                                     | Suunnittelu                                | Integrointi                         |
| E-metaani/<br>e-polttoaineet   | Kotka      | Nordic<br>Ren-Gas | Kaupallinen  | Biogeeninen<br>CO <sub>2</sub>                                     | Kehitys                                    | Satama- ja<br>teollisuus            |
| Harjavallan<br>PtX-kokonaisuus | Harjavalta | P2X<br>Solutions  | Kaupallinen  | Teollinen CO <sub>2</sub><br>(biogeeninen<br>osuus<br>mahdollinen) | Rakennus- ja<br>käyttöönotto-<br>vaiheessa | E-polttoaineet<br>jatko tuotannossa |

|                          |       |                            |                |                                |          |               |
|--------------------------|-------|----------------------------|----------------|--------------------------------|----------|---------------|
| Arctic Sisu<br>e-metaani | Kotka | Arctic Sisu<br>Corporation | Tuotantolaitos | Biogeeninen<br>CO <sub>2</sub> | Vireillä | Tuotanto 2028 |
|--------------------------|-------|----------------------------|----------------|--------------------------------|----------|---------------|

Lähteet: [35]–[37], [40]

### 3.3 Pilottivaiheen reaktoriratkaisut

Reaktorityyppejä metanointiprosessiin on käytössä useita erilaisia, joiden tarkoituksena on testata prosessin hallittavuutta sekä skaalautuvuutta [10], [16].

#### Kiinteäkatalyyttireaktorit

Nämä ovat yleisimmin käytetty reaktorityyppi e-metaanin pilottihankkeissa. Katalyytti on pakattu kiinteäksi pediksi ja reaktiokaasut virtaavat sen läpi. Reaktorissa tapahtuva prosessi on yksinkertainen ja hallittava. Haasteena voidaan mainita reaktion voimakas lämmöntuotto, mikä heikentää katalyytin kestävyyttä. Katalyytteinä käytetään yleensä metallikatalyyttejä. Nikkelipohjaiset katalyytit ovat yleisiä, koska ne ovat edullisia ja hyvin saatavilla. Ne vaativat kuitenkin tarkkaa lämpötilan hallintaa, sillä nikkeli on altis sintrautumaan korkeissa lämpötiloissa [10], [16].

#### Leijukerrosreaktorit

Näissä reaktoreissa katalyyttihiukkaset pidetään liikkeessä reaktiokaasun avulla. Tällöin järjestelmään saadaan tehokkaampi lämmönsiirto ja tasaisempi lämpötilajakauma kuin kiinteäkatalyyttireaktoreissa. Haasteena on katalyyttihiukkasten mekaaninen kuluminen, myös järjestelmän ohjaus vaatii kehittyneitä automaatiota. Katalyyttinä ovat nikkelpohjaiset katalyytit [16].

#### Mikrokanavareaktorit

Perustuvat pieniin virtauskanaviin, tämä mahdollistaa tehokkaan lämmön- ja aineensiirron. Tällä saavutetaan merkittävä etu Sabatier-reaktiossa. Pilotointivaiheessa näitä reaktoreita hyödynnetään lämmönhallinnassa sekä nopeiden käynnistys- ja pysäytystilanteiden

tutkimiseen. Teknologian haasteiksi muodostuvat korkeat valmistuskustannukset, kanavien tukkeutuminen sekä rajallinen skaalautuvuus teolliseen mittakaavaan ja kaupalliseen tuotantoon [10].

#### Lietereaktorit

Ovat kolmen faasin reaktoreita. Katalyytti on hienojakoisena nesteenä nestemäisessä väliaineessa. Rakenne mahdollistaa tehokkaan lämmönsiirron ja reaktorin lämpötila pysyy tasaisena. Pilotoinnissa näitä reaktoreita tutkitaan ja käytetään lämmönhallintaan sekä katalyyttien kestävyiden arviointiin erilaisissa olosuhteissa. Haasteiksi muodostuvat katalyyttihiukkasten erottaminen reaktiotuotteista ja prosessin tekninen monimutkaisuus [16].

#### Kalvoreaktorit

Metanoinnissa kalvoreaktoreiden tavoite on poistaa valikoivasti reaktiotuotteita, kuten vetyä tai vettä reaktion edetessä. Tällöin mahdollistetaan se, että reaktion tasapaino siirtyy metaanin muodostumisen suuntaan ja prosessin kokonaishyötysuhde paranee. Pilotoinnin yhteydessä kalvoreaktoreita tutkitaan ja käytetään vedyn hyötysuhteen lisäämiseen, jolloin prosessi tulee energiatehokkaammaksi. Haasteet liittyvät kalvomateriaalien kestävyteen korkeissa lämpötiloissa, epäpuhtauksiin ja korkeisiin investointikustannuksiin [10], [16].

Biologiset metanointireaktorit perustuvat mikro-organismien kykyyn muuntaa vety ja hiilidioksidi metaaniksi. Toisin kuin kemiallinen Sabatier-reaktio, biologinen metanointi toteutuu alhaisemmissa lämpötiloissa, joka yksinkertaistaa lämmönhallintaa. Biologisia reaktoreita tutkitaan ja käytetään niiden kyvyn vuoksi sietää hiilidioksidin epäpuhtauksia. Haasteena ovat biologisten reaktioiden hidas kinetiikka, mikro-organismien herkkyyks sekä rajallinen tuotantotiheys [17].

### 3.4 Energiatehokkuus ja lämmönhallinta

Prosessin energiatehokkuus koostuu useista ja peräkkäisistä vaiheista. Merkittävin energiankulutus liittyy vihreän vedyn tuotantoon elektrolyysillä. Elektrolyysin hyötysuhde on tyypillisesti 65–75 % riippuen käytetystä teknologiasta. Yleisimmät elektrolyysiteknologiat ovat alkalinen elektrolyysi ja PEM-elektrolyysi. PEM-elektrolyysi

soveltuu paremmin uusiutuvan sähkön vaihtelevaan tuotantoon. Tosin PEM on investointikustannukseltaan korkeampi [5], [13], [29].

Viime vuosien teknologinen kehitys on kaventanut kustannuseroa, ja joissakin projekteissa PEM-elektrolyysi voi olla kokonaiskustannuksiltaan (CAPEX + OPEX) kilpailukykyinen vaihtoehto alkalielektrolyysille. Katalyyttimateriaalien kehittyminen ja jalometallien käytön vähentyminen ovat edistäneet PEM-elektrolyysin kustannuskehitystä [5], [13], [49].

Tekninen haaste e-metaanin tuotannossa on usein lämmönhallinta. Reaktion eksotermisyys edellyttää toimivaa ja tehokasta jäähdytystä. Reaktion lämpötilan on pysyttävä katalyytille turvallisella alueella. Korkeassa lämpötilassa katalyytti ei mahdollisesti enää toimi tai se voi sintrautua. Pilottilaitoksissa jäähdytys on usein jaettu peräkkäisiin osiin, jotta lämpötilapiikkejä ei tule [10], [11], [16].

E-metaanin tuotannon energiatehokkuutta on tarkasteltava koko järjestelmän tasolla, ei vain yksittäisen prosessin perusteella. Sähkön muuntaminen kemialliseen energiamuotoon sisältää energiahäviöitä, jotka kertyvät prosessin edetessä. Kokonaisenergiankulutusta lisää merkittävästi elektrolyysivaiheen jälkeen tapahtuvat kaasujen puristusvaihe metanointiin soveltuviin paineisiin sekä lämmitys ja kierrätys [14], [17].

Järjestelmän hyötysuhde heikkenee lisää, jos tuotettu metaani käytetään myöhemmin polttoprosessissa energiantuotantoon. Tällöin kokonaishyötysuhde voi jäädä alle 30 %. Tästä syystä e-metaani ei ole kovin energiatehokas ratkaisu sähkön varastointiin lyhyellä aikavälillä. e-metaanin arvo on ensisijaisesti energiajärjestelmän joustavuudessa, varastointikyvyssä sekä sektorikytkennässä [14], [30].

Sabatier–reaktiossa vapautuva lämpö on tärkeä tekijä energiatasapainon hallinnassa. Suurissa tuotantomäärissä muodostuu lämpötehoa paljon, koska reaktion entalpia on noin - 165 kJ/mol hiilidioksidia. Lämmön hyödyntäminen pilottilaitoksissa on rajallista prosessin mittakaavan ja käyttöasteen vaihtelun vuoksi. Teoreettisessa mielessä lämpöä voidaan hyödyntää elektrolyysin syöttöveden esilämmityksessä sekä hyödyntämällä lämpöä kaukolämpöverkossa. Käytännössä lämmön talteenottoa rajoittavat usein prosessin dynaaminen käyttö sekä vaihtelevat lämpötilat. Käytettävä katalyytti ei välttämättä vastaa lämmön hyödyntämiselle ihanteellista lämpötilaa, mikä on teknisesti haastavaa pilottilaitoksissa [10], [16], [17].

Reaktion eksotermisyys vaikuttaa suoraan sopivan kiinteäkatalyyttireaktorin valintaan. Kiinteäkatalyyttireaktoreissa lämpötilagradientit voivat muodostua nopeasti katalyyttipedissä, joka voi johtaa ylikuumenemiseen. Reaktiolämpö poistetaan usein peräkkäisten reaktorivaiheiden välillä. Leijukerros- ja lietereaktorit tarjoavat paremmat edellytykset lämmön jakautumiselle. Mikrokanavareaktorit tarjoavat tehokkaan lämmönsiirron suuren pinta-alan johdosta. Soveltuvuus rajoittuu kuitenkin pieniin tuotantomääriin ja kokeellisuuteen [10], [16].

Prosessin joustava käyttö on välttämätöntä metanointiprosessille, joka perustuu uusiutuvaan energiantuotantoon. Toistuvat muutokset käynnistyksissä ja pysäytyksissä aiheuttavat lämpösyklejä, jotka voivat rasittaa katalyyttiä sekä reaktorin rakenteita. Katalyytti voi myös vaurioitua mekaanisesti lämpötilan vaihteluiden seurauksena. Tämä tarkoittaa sitä, että ennakoivan lämmönhallinnan merkitys korostuu voimakkaasti. Maltilliset lämpötilan muutokset ovat usein tärkeämpiä tavoitella kuin maksimihyötysuhde [9], [10].

## **4. E-metanoli**

### **4.1 E-metanolin rooli energiajärjestelmässä**

Kiinnostus e-metanoliin liittyy lähinnä fyysisiin ominaisuuksiin, käyttökelpoisuuteen sekä siihen, miten e-metanoli eroaa energiajärjestelmässä huomattavasti e-metaanin roolista.

Huoneenlämpötilassa e-metanoli on nestemäinen, e-metaani kaasumainen. Tämä tarkoittaa, että e-metanolia on helpompi varastoida ja kuljettaa kuin e-metaania. Käsittely ei tällöin vaadi korkeita paineita eikä kryogeenisiä olosuhteita. Infrastruktuurivaatimukset ovat myös pienempiä, mikä taas parantaa käyttöturvallisuutta. E-metaanin kohdalla kaasumainen olomuoto edellyttää joko paineistusta tai nesteytystä, mikä heikentää kokonaisenergiatehokkuutta [20], [32].

Polttoaineena e-metanolia voidaan käyttää erityisesti meriliikenteessä, ja sitä käytetään jo laivojen ja alusten polttoaineena. Esimerkiksi suuri konttialus Laura Maersk on metanolikäyttöinen. E-metanoli ei vielä korvaa perinteisiä polttoaineita laajamittaisesti. Tämän vuoksi monet alukset käyttävät dual-fuel-moottoreita, jotka käyttävät metanolin lisäksi perinteisiä polttoaineita. Tästä huolimatta metanolia tai e-metanolia käyttävien laivojen tilaukset ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosina [22], [23].

Metanoli toimii myös kemianteollisuuden raaka-aineena, kuten muovien ja kemikaalien valmistuksessa. E-metanolin laaja käyttö lisää e-metanolin kysyntää sekä varmuutta markkinoilla [20], [32].

Kun tarkastellaan e-metanolin tuotantoa prosessiteknisestä näkökulmasta, niin e-metanolin tuotanto hyödyntää vedyn tehokkaammin kuin Sabatier-prosessiin perustuvassa metanoinnissa. Metanolisynteesin etu on se, että suurempi osa vedystä sitoutuu suoraan lopputuotteeseen. Tämä on merkittävä etu, koska vedyn tuotantokustannukset ovat korkeat [14], [24], [25].

E-metanoli soveltuu energiasektorin ja teollisuuden hyödyntämiseen myös alueilla, joissa tarvitaan energian kausivarastointia. Tämä tekee e-metanolista kiinnostavan teollisuusalueiden sekä vientimarkkinoiden näkökulmasta [30], [32].

Viime vuosina meriliikenteen päästörajoitukset sekä uusiutuvien polttoaineiden käyttövelvoitteet ovat uudistuneet merkittävästi sekä EU:ssa että maailmalla. Euroopan Unionin FuelEU Maritime-asetus, joka tuli voimaan 1.1.2025, edellyttää laivoilta vähä- ja nollapäästöisten polttoaineiden käyttöä. Samalla sääntely asettaa myös päästökriteerejä, jotka kannustavat e-metanolin käyttöön. Tällöin e-metanolilla on selkeämpi kaupallistamispolku verrattuna e-metaaniin, jonka laajamittainen käyttö edellyttää laajempia muutoksia satamainfraan [18], [20], [22].

## 4.2 Metanolisynteesi

E-metanolin tuotannossa hiilidioksidi ja vety reagoivat muodostaen metanolia sekä vettä. Kemiallinen prosessi toteutetaan joko suoraan hiilidioksidista tai synteesikaasusta (CO ja CO<sub>2</sub>). Reaktion eksotermisyys asettaa vaatimuksia prosessin lämpötilan hallinnalle, mutta vapautuva lämpö mahdollistaa myös energian talteenoton. Optimaalinen lämpötila metanolisynteesille teollisessa valmistuksessa on 200–300 °C ja paine 50–100 bar [20], [24], [25].

Metanolisynteesissä käytetään pääasiassa kuparipohjaisia katalyytteja. Näihin katalyytteihin voidaan yhdistää sinkkioksidia ja alumiinioksidia. Reaktiossa kupari toimii katalyytin aktiivisena komponenttina, sinkkioksidi lisää katalyyttien aktiivisuutta ja alumiinioksidi toimii rakenteen tukimateriaalina. Samoja katalyyttejä käytetään myös fossiilisen metanolin tuotannossa [24], [25].

Synteesin reaktiokinetiikka on kuitenkin hitaampi kuin Sabatier-reaktiossa tapahtuva metanointi. Tämän vuoksi metanoliprosessissa käytetään korkeampia paineita, jotta reaktion eteneminen varmistuu. Prosessi mahdollistaa kuitenkin tasaisemman reaktiolämmön vapautumisen kuin metanointireaktiossa vapautuva lämpö. Tämä helpottaa lämmönhallintaa verrattuna metanointiin ja soveltuu siksi paremmin jatkuvaan käyttöön teollisuudessa [16], [20].

Metanolisynteesiin liittyy myös kaasujen kierrätys, sillä raaka-aineiden hyödyntäminen paranee kierrättämisellä. Samalla prosessin monimutkaisuus ja energiankulutus lisääntyvät. Synteesin kokonaisenergiatehokkuus on kuitenkin kilpailukykyinen, kun otetaan huomioon e-metanolin nestemäinen olomuoto sekä laaja käyttöpotentiaali polttoaineena ja kemianteollisuuden raaka-aineena [20], [30], [32].

E-metanoli on teknisesti ja markkinaedellytysten perusteella yksi realistisimmista Power-to-X-tuotteista siirryttäessä pilotointivaiheesta kaupalliseen tuotantoon. Reaktion hyvin hallittavissa oleva eksotermisyys, tuotteen kasvava kysyntä meriliikenteessä ja kemianteollisuudessa tukevat tätä arviota [20], [22], [30].

#### **4.3 E-metanolin energiatehokkuus**

Metanolisynteesi käyttää elektrolyysillä tuotettua vetyä vähemmän yhtä hiilimolekyyliä kohden kuin Sabatier-reaktioilla tuotettu metaani. Tällöin suuri osa vedystä sitoutuu lopputuotteeseen eli e-metanoliin ja vedyn käyttöaste suhteessa tuotettuun energiamäärään on suurempi [5], [20], [29], [30].

Vedyn tehokkaampi hyödyntäminen heijastuu suoraan tuotannon kokonaishyötysuhteeseen sekä yksikkökustannuksiin. Vedyn valmistus elektrolyysillä kuluttaa valtavasti sähköenergiaa. Mitä suurempi osa tuotetusta vedystä sidotaan myytävään lopputuotteeseen, sitä pienempi elektrolyysikapasiteetti tarvitaan tuotettua energiamäärää kohti. Tällöin e-metanoli on erityisen merkityksellinen tilanteissa, joissa uusiutuvan sähkön saatavuus on rajallinen tai sähköntuotannon investointikustannukset muodostavat merkittävän osan koko järjestelmän kustannusrakenteesta [30], [32], [34].



#### 4.4 Reaktiolämmön hyödyntäminen

Metanolisynteessissä vapautuva reaktiolämpö syntyy kemiallisten sidosten muodostumisen yhteydessä. Tämä energia on poistettava ensin reaktorista prosessin vakauden vuoksi. Teollisissa synteessireaktoreissa lämmön vapautuminen on hallittavissa lämpötilasäätimien ja lämmönvaihtimien avulla. Lämpö vapautuu tasaisesti, mikä helpottaa sen talteenottamista ja hyödyntämistä sekä prosessin sisällä että ulkoisissa kohteissa [20], [24], [25], [30].

Metanolisynteessissä vapautuva reaktiolämpö on tasoltaan keskilämpötilan prosessilämpöä (noin 200–300 °C), joka soveltuu esilämmityksiin, höyryn tuotantoon tai muihin teollisiin prosesseihin. Kaukolämpöön reaktiolämpöä voidaan hyödyntää silloin, kun tuotantolaitos sijaitsee teollisuusalueilla tai kaukolämpöverkon läheisyydessä. Tällöin energiajärjestelmän energiatehokkuus paranee, ja samalla erillisen lämmöntuotannon tarve vähenee. Reaktiolämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa edellyttää lämmön sovittamista kaukolämpöverkkoon sopivaan lämpötilatasoon. Usein tämä toteutetaan lämmönvaihtimien avulla, tarvittaessa käytetään lämpöpumppuja [4], [20], [30].

Metanolisynteessissä vapautuvaa reaktiolämpöä voidaan myös hyödyntää elektrolyysin syöttöveden lämmityksessä, hiilidioksidin käsittelyvaiheissa tai muissa lämpöä vaativissa prosessin osissa. Ulkopuolisen energian tarve pienenee ja samalla tuotantoketjun energiatase paranee. Vaikka reaktiolämpöä hyödynnetään, kemiallisen reaktion termodynaaminen hyötysuhde ei kuitenkaan muutu. Vaikutus kohdistuu koko tuotantoketjun kasvavaan energiatehokkuuteen [4], [30].

Taloudellisesta näkökulmasta reaktiolämmön hyödyntäminen ei kuitenkaan ole automaattisesti kannattavaa. Lämmön talteenotto edellyttää usein investointeja lämmönsiirtojärjestelmiin, mahdolliseen varastointiin sekä lämpöpumppuratkaisuihin. Kannattavuuteen vaikuttavat myös tuotantolaitoksen sijainti, prosessin käyttöaste sekä ympäröivän energiajärjestelmän rakenne. Lämmön hyödyntäminen on usein helpointa teollisissa ympäristöissä, joissa lämmölle on jatkuva ja tasainen kysyntä [4], [30], [32].

#### 4.5 E-metanolin pilotti- ja kehityshankkeet Suomessa

E-metanolin kehitystä Suomessa voidaan tarkastella osana energiajärjestelmän siirtymää kohti vähähiilisiä tuotantoratkaisuja [1], [4], [28].

Metanolisynteesi ei ole teknologiana uusi, mutta sen yhdistäminen vihreän vedyn tuotantoon sekä biogeeniseen hiilidioksidiin muuttaa prosessin roolin energiajärjestelmässä [20], [24], [29].

Suomen e-metanolihankkeet ovat pääosin pilotointi- ja esisuunnitteluvaiheessa. Osa hankkeista on edennyt kohti laajempaa teollista kokonaisuutta. Esimerkiksi Naantalin alueelle suunniteltu ruotsalaisen toimijan Liquid Windin ja Turun Energian hanke yhdistää biogeenisen hiilidioksidin talteenotton sekä vihreän vedyn tuotannon synteettisen metanolin valmistukseen. Hankkeen sijainti satamaympäristössä mahdollistaa tuotteen hyödyntämisen meriliikenteessä sekä kasvattaa mahdollisuuksia kansainväliselle viennille [20], [22], [23], [41].

Hankkeiden sijoittuminen teollisuusalueiden ja satamien lähelle kuvastaa e-metanolin luonnetta nestemäisenä ja logistisesti joustavana tuotteena. Satama- ja teollisuusympäristössä tuotanto voidaan yhdistää hiilidioksidin talteenottoon sekä meriliikenteen polttoainejakeluun. Samalla nämä hankkeet toimivat käytännön pilotointiympäristöinä vedyn tuotannon, hiilidioksidin talteenoton ja metanolisynteesin yhteensovittamiselle [4], [20], [30].

Seuraavassa taulukossa on koottu keskeiset Suomessa suunnitteilla olevat tai kehitteillä olevat e-metanolihankkeet sekä niiden kehitysvaihe. Useat toimijat ovat siirtymässä kohti teollista tuotantoa. Hankkeet ovat sijoittuneet satamien tai teollisuusalueiden läheisyyteen, missä on usein saatavilla biogeenisen hiilidioksidin lähteitä.

**Taulukko 3. E-metanolin pilotti- ja kehityshankkeet Suomessa**

| Hanke/laitos                       | Sijainti           | Toimija                      | Tyyppi  | CO <sub>2</sub> -lähde                | Status         | Keskeistä tietoa                             |
|------------------------------------|--------------------|------------------------------|---------|---------------------------------------|----------------|----------------------------------------------|
| Power-to-metanoli                  | Lappeenranta       | St1 Nordic Oy ja LUT         | Pilotti | Biogeeninen savukaasu (bioenergia)    | Suunnittelu    | Ensimmäinen pilotti, kapasiteetti 25 000 t/a |
| e-metanoli-laitos                  | Kristiinankaupunki | Koppö Energia                | Kehitys | Biogeeninen savukaasu (Jätteenpoltto) | Suunnittelu    | Osa laajempaa kokonaisuutta                  |
| e-metanoli ja vihreä vety          | Joensuu            | P2X Solutions                | Kehitys | Ei määritetty                         | Suunnittelu    | Osa laajempaa Power-to-X-kokonaisuutta       |
| E-polttoaine, sisältää e-metanolin | Naantali           | Liquid Wind ja Turun Energia | Kehitys | Biogeeninen savukaasu (biomassa)      | Esisuunnittelu | Teollinen käyttökohde                        |

Lähteet: [41] – [45]

Taulukosta voidaan nähdä, että e-metanoli-hankkeet ovat Suomessa varhaisemmassa vaiheessa verrattuna e-metaanin hankkeisiin. E-metanolin tuottaminen perustuen uusiutuvaan energiaan sekä talteenotettuun hiilidioksidiin on vasta viime vuosina siirtynyt kohti teollista mittakaavaa. Lopulliset investoinnit edellyttävät lisävarmuutta.

Syy e-metanolin hitaaseen etenemiseen liittyy tuotantoketjun kokoon ja rakenteeseen. Vaikka metanolisynteesi on tunnettu menetelmä, uusiutuvan vedyn saatavuus ja hiilidioksidin talteenoton kustannukset asettavat edelleen haasteita [5], [29], [30].

Pilottilaitoksissa tutkitaan vedyn ja hiilidioksidin syötön säätöä, lämmönhallintaa sekä prosessien joustavaa käyttöä sähköntuotannon vaihtelevissa tilanteissa [20], [29], [30].

Useat suomalaiset e-metanoli-hankkeet ovat menossa kohti kaupallista mittakaavaa. E-metanolille on muodostumassa kysyntää erityisesti meriliikenteessä sekä kemianteollisuudessa. Tämä voi alentaa e-metanolin käyttöönoton kynnystä ja vähentää tarvetta laajoille inframuutoksille. Lisäksi EU-tason sääntely, kuten FuelEU

Maritime-asetus, luo ennakoitavaa kysyntää vähäpäästöisille polttoaineille. Tämä taas kasvattaa investointien houkuttelevuutta [18], [20], [32].

E-metanoli-hankkeiden kehitystä Suomessa tukevat suotuisat paikalliset olosuhteet, kuten biogeenisten hiilidioksidilähteiden saatavuus ja kasvava uusiutuvan energian tuotanto. Lisäksi monet hankkeet sijoittuvat satamien ja teollisuusalueiden yhteyteen. Näissä ympäristöissä pilottilaitokset voivat toimia tärkeänä siirtymävaiheena kohti kaupallista tuotantoa. Samalla saadaan tietoa prosessien teknisestä luotettavuudesta, energiatehokkuudesta sekä taloudellisesta kannattavuudesta [12], [20], [41].

E-metanolin pilottihankkeet muodostavat tärkeän välivaiheen teknologian kehityksessä. Kaupallinen tuotanto on toistaiseksi rajallista, mutta käynnissä olevat hankkeet osoittavat kehitystä kohti teollista mittakaavaa [20], [21].

## **5. E-ammoniakki**

### **5.1 E-ammoniakin kemiallinen luonne**

Kemiallisesti e-ammoniakki eroaa hiilipohjaisista e-metaanista sekä e-metanolista, koska ammoniakin tuotantoketju ei sisällä lainkaan hiiltä. E-ammoniakin valmistus perustuu Haber-Bosch-prosessiin, jossa vety reagoi typen kanssa ja reaktiossa ei muodostu vettä. Kemiallisesti e-ammoniakki toimii tehokkaana vedyn kantajana, koska vetyatomit ovat sitoutuneet ammoniakkimolekyylisiin [26], [27].

Kemiallinen rakenne tekee ammoniakista erinomaisen vedyn varastointimuodon. Ammoniakkimolekyylissä vetyatomit ovat sitoutuneet kovalenttisesti typpien, mikä mahdollistaa korkean vedyn massatiheyden. Ammoniakki nesteytyy noin -33 °C lämpötilassa normaalipaineessa [26], [27].

E-ammoniakin haaste liittyy typen inerttiin kemialliseen luonteeseen. Typpi on kemiallisesti stabiili eikä normaalisti reagoi vedyn tai muidenkaan aineiden kanssa. Typpimolekyylissä atomien välillä on vahva kolmoissidos, jonka rikkominen vaatii energiaa. Tämän vuoksi ammoniakin synteesi vaatii korkean lämpötilan ja paineen sekä tehokkaan katalyytin, jotta synteesin reaktionopeus olisi taloudellisesti kannattavaa [26], [27].

## 5.2 Prosessitekniset vaatimukset

E-ammoniakin tuotannossa käytettävä Haber-Bosch-prosessi on suunniteltu jatkuvatoimiseen käyttöön, jolloin myös reaktio-olosuhteet on pidettävä vakaina ja hallittavia [26].

Teollinen ammoniakin synteesi tapahtuu korkeissa lämpötila- ja paineolosuhteissa ja toteutetaan 400–500 °C lämpötilassa sekä 150–300 barin paineessa. Korkea lämpötila on tärkeää reaktiokinetiikan kannalta, mutta samalla se siirtää reaktion kemiallista tasapainoa lähtöaineiden suuntaan. Tämän vuoksi korkea paine on prosessille välttämätön, jotta ammoniakin konversio olisi taloudellisesti kannattava [26], [27].

Prosessi on teknisesti vaativa. Synteesissä tapahtuva seoksen puristus vaatii energiaa, ja reaktorien, putkistojen sekä lämmönvaihtimien on kestävä mekaanista ja termistä kuormitusta. Synteesilaitteistoa ei yleensä ole optimoitu nopeisiin kuormituksen muutoksiin [21], [26].

Haber-Bosch-prosessin joustavuus on rajallista käytettävien rauta- ja ruteniumkatalyyttien osalta. Lämpötila- ja painevaihtelut aiheuttavat erityisesti pidemmällä aikavälillä katalyyttien muutoksia sekä aktiivisuuden heikkenemistä. Toistuvat käynnistykset ja alasajot ovat hitaita ja vaativat energiaa. Siksi ammoniakin synteesiä ei voi säädellä sähköntuotannon vaihteluiden mukaan ilman että tulee teknisiä sekä taloudellisia haittoja [26], [27], [29].

E-metaanin tuotannossa reaktoriratkaisut ovat olennaisessa roolissa eksotermisen reaktion ja lämmönhallinnan vuoksi toisin kuin e-ammoniakin tuotannossa, joka perustuu vakiintuneeseen prosessiin. Tämän takia reaktoriyyppin valinta ei ole tuotannon epävarmuustekijä. Haber-Bosch-prosessin edellyttämä tasainen energiavirta tarkoittaa, että e-ammoniakin tuotanto vaatii joko vedyn välivarastointia tai jatkuvaa peruskuormasähköä. Tällöin synteesiprosessi on hallittavissa [26], [27].

E-ammoniakki soveltuu prosessiteknisestä näkökulmasta suuriin, keskitettyihin tuotantolaitoksiin, joissa käyttöaste on korkea ja olosuhteet vakaat. Joustavuus on rajoitettua verrattuna muihin Power-to-X-prosesseihin, mutta samalla ammoniakki mahdollistaa vedyn tehokkaan kemiallisen sitoutumisen lopputuotteeseen sekä jatkuvan, vakaan teollisen tuotannon [26], [27], [29].

### 5.3 E-ammoniakki energijärjestelmässä

E-ammoniakin merkitys energijärjestelmässä ei perustu ensisijaisesti energiantuotantoon, vaan vedyn varastointiin, kuljetukseen ja sektorikytkentään. Ammoniakki toimii kemiallisena vedyn kantajana, jolloin uusiutuvalla sähköllä tuotettu energia voidaan siirtää sekä varastoida joustavasti energijärjestelmän eri osiin [26], [27], [29].

E-ammoniakin etuna on sen korkea massatiheys. Ammoniakki voidaan myös varastoida nestemäisenä joko  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa normaalipaineessa tai 10 barin paineessa huoneenlämpötilassa. Tämä tarkoittaa, että e-ammoniakilla on tekninen ja taloudellinen kilpailukyky erityisesti pitkäaikaiseen energian varastointiin. Tämä on etu verrattuna vetyyn, jonka varastointi vaatii usein korkean paineen tai kryogeenisiä lämpötiloja [26], [27], [29].

E-ammoniakki soveltuu tilanteisiin, joissa uusiutuvan energian tuotanto ylittää paikallisen sähkönkulutuksen ja energia halutaan varastoida. E-ammoniakki toimii niin sanottuna tasapainottavana kemiallisena varastona, vaikka Haber-Bosch-tuotantoprosessi itsessään ei ole joustava [26], [29].

Ammoniakkia käytetään polttoaineena, vedyn kantajana ja teollisuuden raaka-aineena. Lannoiteteollisuus on ammoniakin merkittävin käyttökohde maailmalla, jossa se toimii typpilannoitteiden raaka-aineena. Lannoitteessa ammoniakki toimii lopputuotteena, jolloin muuntohäviöt eivät ole tärkein rajoite [26], [27].

Polttoaineena ammoniakkia voidaan hyödyntää meriliikenteessä sekä teollisissa prosesseissa, joissa suora sähköistäminen ei ole mahdollista. Ammoniakki voidaan hajottaa krakkausprosessilla takaisin vedyksi ja typeksi, mikä mahdollistaa vedyn kuljettamisen pitkiä matkoja [26], [27], [29].

E-ammoniakin käyttöön energiatehokkuuden näkökulmasta liittyy merkittäviä muuntohäviöitä. Muuntohäviöitä syntyy, kun sähkö muunnetaan vedyksi, vety ammoniakiksi ja ammoniakki krakataan takaisin vedyksi. Koko järjestelmän hyötysuhde heikkenee. E-ammoniakki ei siten ole ratkaisu lyhytaikaiseen energianvarastointiin [26], [29], [30].

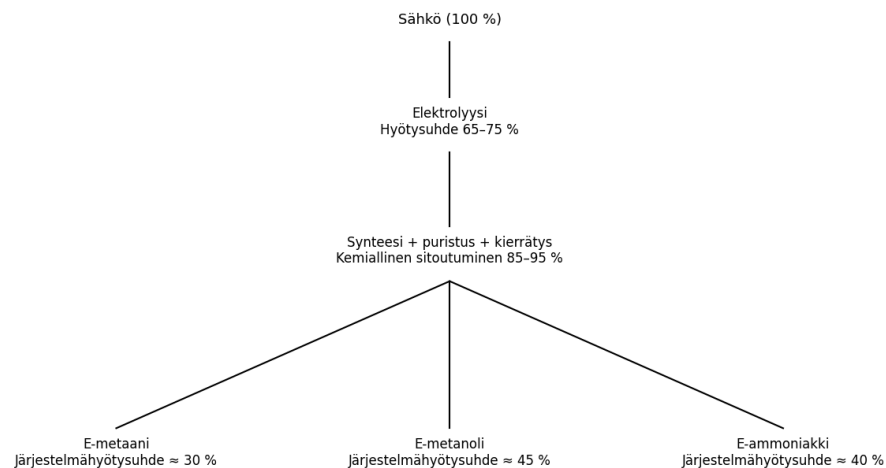
E-ammoniakki tukee energijärjestelmää erityisesti alueilla, joilla uusiutuvan energian tuotanto on kasvussa, mutta paikallinen kysyntä rajallista. Tämä mahdollistaa energian

kuljettamisen pitkiä matkoja sekä sen hyödyntämisen eri käyttökohteissa alueilla, joilla tuotanto ja kulutus sijaitsevat eri paikoissa [26], [29].

## 6. Power-to-X-tuotteiden vertailu

### 6.1 Kemiallinen ja prosessitekhninen vertailu

Power-to-X-tuotteiden erot liittyvät koko tuotantoketjuun sähköstä lopputuotteeseen. Elektrolyysin ja synteesiprosessin jälkeen ratkaisevaa on, kuinka suuri osa vedystä sitoutuu lopputuotteeseen. Vedyn sitoutumisen määrä vaikuttaa koko järjestelmän hyötysuhteeseen. Kuvassa 1 esitetään energiavirta ja suuntaa-antavat hyötysuhteet e-metaanille, e-metanolille ja e-ammoniakille.



Kuva 1. Power-to-X-prosessin energiavirrat ja suuntaa-antavat järjestelmähyötysuhteet.

Lähde: tekijän laatima lähteiden [5], [14], [20], [26], [29], [30] pohjalta.

Kuvasta nähdään, että suurin energiahäviö syntyy elektrolyysivaiheessa. Tuotteiden väliset erot muodostuvat vedyn sitoutumisesta lopputuotteeseen. E-metaanissa osa vedystä sitoutuu veteen, mikä heikentää järjestelmähyötysuhdetta. E-metanolissa ja e-ammoniakissa suurempi osuus vedystä sitoutuu lopputuotteeseen, mikä parantaa kokonaisenergian hyödyntämistä.

Taulukossa 4 vertaillaan e-metaania, e-metanolia ja e-ammoniakkia kemiallisten ominaisuuksien, prosessitekhnisten vaatimusten sekä energiajärjestelmän roolin näkökulmasta. Vertailussa on koko tuotantoketju elektrolyysistä lopputuotteeseen.

Taulukko havainnollistaa ja vertailee tuotteiden välisiä teknisiä eroja ilman paremmuusjärjestystä.

**Taulukko 4. Power-to-X-tuotteiden vertailu**

| Ominaisuus                | E-metaani                 | E-metanoli                | E-ammoniakki                             |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
| Vedyn käyttöaste          | Matala, noin 50–60 %      | Korkea, noin 75–90 %      | Erittäin korkea kemiallisesti noin >90 % |
| Prosessin lämpötila       | 250–400 °C                | 200–280 °C                | 400–500 °C                               |
| Prosessin paine           | 5–30 bar                  | 50–80 bar                 | 150–300 bar                              |
| Prosessin joustavuus      | Kohtalainen–hyvä          | Kohtalainen               | Rajallinen                               |
| Tekninen kypsyys          | Pilotti–kaupallinen vaihe | Pilotti–kaupallinen vaihe | Teollinen                                |
| Varastoitavuus            | Paineistus                | Nestemäinen               | Paineistettuna /jäähdytettynä            |
| Kuljetettavuus            | Alueellinen               | Hyvä, kansainvälinen      | Hyvä, suuret volyymit                    |
| Muuntohäviöt              | Korkeat                   | Kohtalaiset               | Korkeat                                  |
| Rooli sähköjärjestelmässä | Sektorikytkentä           | Energian siirto           | Pitkäaikainen varastointi                |
| Käyttökohteet             | Kaasuverkko, liikenne     | Meriliikenne              | Lannoitteet, vety                        |
| Markkinapotentiaali       | Alueellinen               | Kasvava                   | Kasvava                                  |

Lähteet: [21], [26], [27], [29], [30]

Taulukosta 4 nähdään Power-to-X-tuotteiden keskeiset kemialliset ja prosessitekniset erot ja niiden vaikutukset energiajärjestelmään. Erot liittyvät koko tuotantoketjuun elektrolyysistä lopputuotteen käyttöön.



Vedyn käyttöaste on merkittävä erottava tekijä. E-ammoniakissa vety sitoutuu lähes kokonaisuudessaan lopputuotteeseen, kun taas e-metanolissa suurin osa vedystä sitoutuu lopputuotteeseen ja osa muodostaa sivutuotteena vettä. E-metaanin Sabatier-reaktiossa merkittävä osa vedystä sitoutuu sivutuotteena muodostuvaan veteen. Erot heijastuvat suoraan energiankulutukseen sekä tarvittavaan elektrolyysikapasiteettiin [10], [26].

Prosessien joustavuuserot selittyvät lämpötila- ja paine-eroilla. E-metanolin ja e-metaanin synteesien matalat lämpötilat ja paineet mahdollistavat joustavan käytön sekä erilaisten reaktorikonseptien hyödyntämisen [10], [26].

Prosessin tekninen kypsyys ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen sen soveltuvuuteen vaihtelevaan energiajärjestelmään. E-ammoniakin integrointi vaihtelevaan uusiutuvaan sähköntuotantoon edellyttää usein vedyn varastointia prosessin teknisestä kypsyudesta huolimatta [26], [29].

Tuotteiden varastointi ja kuljetus ovat olennaisia tekijöitä tuotteiden vertailussa. Nestemäiset e-metanoli ja e-ammoniakki soveltuvat suurten energiamäärien varastointiin sekä kansainvälisiin kuljetuksiin, kun taas e-metaani on alueellinen ratkaisu [20].

Muuntohäviöt pienenevät, kun lopputuote voidaan hyödyntää suoraan ilman takaisinmuuntoa sähköksi. Tästä syystä e-metanoli ja e-ammoniakki soveltuvat meriliikenteeseen, teollisuuteen sekä lannoiteteollisuuteen, joissa energia voidaan hyödyntää suoraan [30].

E-metaanin rooli korostuu paikallisissa ratkaisuissa ja kaasuverkkoon integroiduissa sovelluksissa. E-metanoli tarjoaa monipuolisia käyttökohteita, kun taas e-ammoniakkia käytetään vedyn varastoinnissa sekä lannoiteteollisuudessa. Tuotteiden optimaalinen hyödyntäminen määräytyy energiajärjestelmän rakenteen sekä markkinakysynnän mukaan [26].

Power-to-X-prosessit toimivat teollisessa mittakaavassa yleensä vakaammin kuin pilottilaitoksissa. Suuremmissa laitoksissa lämpötilan muutokset tapahtuvat hitaammin, koska reaktorit ja putkistot ovat paljon massiivisempia ja niiden lämpökapasiteetti on suurempi. Tämä rauhoittaa prosessin hallintaa ja vähentää lämpötilavaihteluita. Lisäksi teollisissa laitoksissa lämmönsiirto- ja jäähdytysjärjestelmät ovat myös paljon tehokkaampia, jolloin reaktiolämpö voidaan poistaa hallitummin [16].

Pilottilaitoksissa kuormituksen muutokset näkyvät herkästi pienemmän lämpökapasiteetin ja prosessin pienemmän mittakaavan vuoksi. Toistuvat kuormituksen muutokset rasittavat katalyyttejä ja laitteistoa enemmän kuin suuressa laitoksessa. Teollisessa tuotannossa lämpötila- ja paineolosuhteet pysyvät yleensä vakaampina, mikä lisää laitteiston ja katalyyttien käyttöikää [17].

E-ammoniakin tuotannossa mittakaavaero näkyy selkeimmin. Haber-Bosch-prosessi on suunniteltu suuriin, jatkuvatoimisiin laitoksiin. e-metaanin ja e-metanolin kohdalla suurempi mittakaava helpottaa lämmönhallintaa, mutta reaktion kemiallinen perusluonne säilyy. Metanolisynteesin lämpötilanhallinta on helpompaa suuremman mittakaavan laitoksissa tehokkaan lämmönvaihdon ansiosta [26].

## 6.2 Reaktiolämpö ja hukkalämpö

Reaktiolämmön ja hukkalämmön hyödyntäminen on merkittävä tekijä Power-to-X-laitosten energiatehokkuudessa. Kaikki tarkastellut synteesisprosessit ovat eksotermisiä, mutta niiden tuottaman lämmön lämpötila, määrä ja hyödyntämismahdollisuudet eroavat toisistaan. Lämmön laatu ja talteenotettava lämpötila ovat ratkaisevia tekijöitä tuotteiden jatkokäytölle. Taulukossa 5 on esitetty e-metaanin, e-metanolin ja e-ammoniakin lämpöintegraatioon liittyviä eroja.

**Taulukko 5. Prosessien hukkalämpö ja lämpöintegraatio**

| Ominaisuus                | E-metaani  | E-metanoli  | E-ammoniikki |
|---------------------------|------------|-------------|--------------|
| Reaktiolämpötila          | 250–400 °C | 200–300 °C  | 400–450 °C   |
| Talteenotettava lämpötila | 80–150 °C  | 100–250 °C  | yli 200 °C   |
| Suora höyryn tuotanto     | Rajallinen | Mahdollista | Mahdollista  |

|                             |                                   |                           |                  |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------|
| Lämpöpumpun käyttö          | Usein hyödyllinen                 | Hyödyllinen               | Harvoin tarpeen  |
| Lämpöpumpun rooli           | Järjestelmäintegraatio            | Lämpötilatason nosto      | Ei ole keskeinen |
| Tyypillinen COP             | 2.5–3.5                           | 3–4                       | –                |
| Lämmön pääasiallinen käyttö | Kaukolämpö, prosessin esilämmitys | Kaukolämpö, prosessihöyry | Prosessihöyry    |
| Joustavuus lämmönkäytössä   | Kohtalainen                       | Hyvä                      | Heikko           |

Lähteet: [16], [26]

### 6.3 Reaktiolämmön synty ja hyödyntämismahdollisuudet

E-metaanin tuotannossa Sabatier–reaktio vapauttaa lämpöä korkeassa reaktiolämmössä. Reaktiolämmön hallitun jäähtytyksen vuoksi talteen otettava lämpö on kuitenkin matalatasoista. Jäähtytys suoritetaan katalyyttien suojaamiseksi ja reaktion hallinnan varmistamiseksi. Talteen otettu lämpö voidaan hyödyntää kaukolämmössä ja prosessien esilämmityksessä, vaikka höyryn tuotanto on rajallista. Lämpöpumppua voidaan hyödyntää lämpötason nostamiseen, mutta se ei ole välttämätön osa metanointiprosessia [16].

Metanolisynteesin eksotermisyys on pienempi kuin metanoinnissa. Prosessin talteenotettava lämpö on keskitason lämpöä, mikä mahdollistaa sen hyödyntämisen lämpöpumpun lämmönlähteenä. Lämpöpumppu nostaa lämpötilan kaukolämpöverkon edellyttämälle tasolle tai hyödynnettäväksi prosessilämpönä. Lämpöpumpun rooli riippuu laitoksen sijainnista ja ympäröivästä energiajärjestelmästä [20].

Ammoniakin tuotannossa Haber-Bosch-prosessissa reaktiolämpö vapautuu korkeassa lämpötilassa. Reaktiolämmön korkean lämpötason vuoksi lämpö voidaan hyödyntää

suoraan prosessihöyryn tuotannossa ilman lämpöpumppua. Prosessin tekninen haaste ei siten ole lämmön talteenotossa, vaan prosessin jatkuvuudessa sekä rajallisessa joustavuudessa. Lämpöpumpun tarve riippuu usein laitoksen kytkeymisestä muuhun energiajärjestelmään [26], [29].

#### 6.4 Lämpöpumpun rooli hukkalämmössä

Synteesireaktiot voivat tapahtua korkeissa lämpötiloissa, mutta usein reaktiolämmön hyödyntämistä rajoittaa talteenotettavan lämmön matala lämpötilataso. Tämä johtuu prosessien lämmönhallinnasta sekä katalyyttien toimivuuden suojaamisesta. Osa lämmöstä on alle 100 °C, mikä rajoittaa sen hyödyntämistä prosessihöyryn tuotannossa ja tekee siitä usein matalalämpöistä hukkalämpöä [16], [20].

Tämän matalalämpöisen energian hyödyntämiseen voidaan käyttää lämpöpumppua. Lämpöpumpun tehtävänä on vaikuttaa prosessin tuotantoketjuun siirtämällä lämpöenergiaa matalalta tasolta korkeammalle tasolle käyttäen sähköenergiaa. Power-to-X-laitoksissa lämpötaso voidaan lämpöpumpuilla nostaa esimerkiksi 40–60 °C tasolta 70–90 °C tasolle, jolloin lämpö soveltuu kaukolämmön peruskuormaksi [4], [16].

Lämpöpumppujen suorituskykyä kuvataan COP–arvolla (coefficient of performance), joka ilmaisee tuotetun lämpöenergian suhteen käytettyyn sähköenergiaan. Teollisissa sovelluksissa COP on välillä 2–4 riippuen käyttöolosuhteista ja lämpötilaerosta. Mitä pienempi lämpötilanosto hukkalämmöstä käyttökelpoiselle on, sitä korkeampi COP voidaan saavuttaa. Vaikka lämpöpumppu kasvattaa järjestelmän energiatehokkuutta, synteesireaktion hyötysuhde ei muutu. Lämpöpumppujen käyttö on erityisen perusteltu prosessissa, joissa hukkalämpöä on koko ajan saatavilla ja lämpötason nosto on maltillinen [4].

Kun lämpöpumppuja integroidaan osaksi Power-to-X-laitoksia, se on usein järjestelmätason ratkaisu eikä prosessitekniinen vaatimus. Lämpöpumppuratkaisujen taloudellinen ja tekninen kannattavuus edellyttää korkeaa käyttöastetta, tasaista lämmöntarvetta sekä kohtuuhintaista tai ylijäämä sähköä. Erityisesti teollisissa ryhmittymissä sekä kaukolämpöverkkoon kytkeytyvissä ympäristöissä lämpöpumput voivat merkittävästi parantaa Power-to-X-laitosten kokonaisenergiatehokkuutta sekä vähentää erillisen lämmöntuotannon tarvetta [4].

## 6.5 Turvallisuusriskit Power-to-X-tuotannossa

Power-to-X-prosessien turvallisuus ulottuu vedyn tuotannosta synteesivaiheisiin, lopputuotteiden käsittelyyn ja varastointiin. Riskien hallinnan merkitys kasvaa siirryttäessä pilottilaitoksista kohti teollista mittakaavaa, sillä käsiteltävien aineiden määrät kasvavat ja prosessiolosuhteet ovat korkeampia paineen ja lämpötilan osalta. Lisäksi mahdollisten riskitilanteiden seuraukset vakavoituvat, kun onnettomuuksien vaikutusalue laajenee [45].

Vety on erittäin herkästi syttyvä ja räjähdysherkkä kaasu, jolla on matala syttymisenergia. Sen käsittely edellyttää tarkkaa valvontaa esimerkiksi vuotojen osalta, riittävää suljettujen tilojen ilmanvaihtoa sekä räjähdyssuojattuja laitteita. Vedyn puristusvaiheessa sekä välivarastoinnissa järjestelmään sitoutuu suuri määrä paine-energiaa, mikä asettaa erityisiä turvallisuusvaatimuksia vetyputkistojen, kompressorien sekä varastosäiliöiden turvallisuudelle [29].

E-metanolin ja e-ammoniakin käsittelyssä on palo- ja räjähdysriskien lisäksi huomioitava myös aineiden myrkyllisyys. Metanoli on myrkyllinen hengitettynä ja nieltynä ja altistuminen sille voi aiheuttaa vakavia terveysvaikutuksia, kuten keskushermostovaurioita. Metanoli on helposti syttyvä neste ja sen varastointi, siirto ja lastaus edellyttävät suljettuja järjestelmiä sekä henkilöstön asianmukaista suojautumista [20].

Ammoniakki on myrkyllisyyden lisäksi voimakkaasti syövyttävä. Haber-Bosch-prosessi tapahtuu korkeissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa, mikä on vaativaa turvallisuuden näkökulmasta. Lisäksi varastointi ja kuljetus edellyttävät ympäristöriskien arviointia [26], [27].

Turvallisuus ei rajoitu pelkästään kemiallisiin ominaisuuksiin, vaan rakentuu myös eri toimijoiden välisestä yhteistyöstä, jossa tiedonkulku ja yhteiset toimintamallit ovat olennaisia. Pilottilaitoksissa voidaan kehittää turvallisia käyttömenetelmiä ja testata riskienhallintamenetelmiä sekä kehittää henkilöstön osaamista. Koulutuksen merkitys korostuu erityisesti poikkeamatilanteissa, joissa operointihenkilöstön on ymmärrettävä prosessien toiminta, rajoitteet sekä kemiallisten aineiden ominaisuudet [45].

## 7. Power-to-X-tuotteiden markkinat ja kysyntä

### 7.1 PtX-tuotteiden markkinat ja käyttökohteet

Tuotteiden markkinat eivät muodosta yhtenäistä kokonaisuutta, vaan kysyntä vaihtelee merkittävästi tuotetyypin, käyttökohteen sekä maantieteellisen sijainnin mukaan. Kysyntää ohjaavat ensisijaisesti päästövähennystavoitteet, sääntelyt sekä sektorit, joissa suora sähköistäminen ei ole teknisesti mahdollista. Tämän vuoksi eri e-tuotteiden markkinat kehittyvät eri tahtiin [21], [29].

E-metaanin tapauksessa kysyntä painottuu lähinnä alueellisiin ja paikallisiin käyttökohteisiin, ja merkittävänä etuna on sen yhteensopivuus nykyisen kaasuverkkoinfrastruktuurin kanssa, jolloin tuotetta voidaan hyödyntää ilman suuria muutoksia jakelu- ja varastointijärjestelmiin. Sovelluskohteita ovat kaasuverkkoinfrastruktuuriin liittyvät ratkaisut sekä raskaan liikenteen polttoaineet. E-metaanin markkinoita rajoittavat energian muunnoshäviöt sekä kilpailu biokaasun ja suoran sähköistämisen kanssa. Biokaasun tuotanto on merkittävää Pohjoismaissa sekä Keski-Euroopassa, mikä rajoittaa e-metaanin kysyntää [14], [29].

E-metanolin markkinat ovat kansainvälisemmät kuin e-metaanin. Kysyntä painottuu meriliikenteeseen, jossa yhä tiukentuvat päästörajoitukset sekä sääntely liittyen polttoaineiden elinkaareen, ohjaavat siirtymistä vähäpäästöisiin vaihtoehtoihin [18], [21].

E-metanolin olennaisia etuja ovat nestemäinen olomuoto, kansainvälinen metanoli-infrastruktuuri sekä monipuoliset käyttökohteet kemianteollisuudessa. E-metanoli voi toimia siirtymäpolttoaineena, sillä sen käyttö ei vaadi laajoja muutoksia polttoaine- ja jakelujärjestelmiin [20], [21].

E-ammoniakin kysyntä perustuu pääasiallisesti teolliseen käyttöön, erityisesti lannoiteteollisuuteen. Ammoniakki on olennainen raaka-aine typpilannoitteiden valmistuksessa, mikä tekee siitä tärkeän myös elintarviketuotannon kannalta [26].

E-ammoniakki on potentiaalinen energian ja vedyn kuljetus- ja varastointimuoto ja sen etuna on kansainvälinen ammoniakkikauppa ja infrastruktuuri. Tämä luo mahdollista kysyntää alueilla, joissa uusiutuvaa sähköä on runsaasti, mutta paikallinen energiakysyntä on rajallista. Energiatarkoitukseen liittyvä käyttö on hidasta verrattuna teolliseen käyttöön,

mikä johtuu ammoniakkin turvallisuus- ja päästöhaasteista sekä energiatehokkuuteen liittyvistä häviöistä suhteessa suoraan sähkön käyttöön [26], [27].

## **7.2 Sääntelyn ja päästöohjauksen vaikutus kysyntään**

Power-to-X-tuotteiden kysyntä ei nojaa pelkästään tuotteiden hintakilpailukykyyn, vaan sääntelyyn sekä päästöohjaukseen. Euroopan unionin ilmasto- ja energiapolitiikassa on asetettu sitovia päästövähennystavoitteita, kuten EU:n ilmastolaki (European Climate Law) sekä Fit for 55 -paketti, jotka lisäävät vähäpäästöisten polttoaineiden kysyntää. Vetytalouteen liittyvät strategiat tukevat Power-to-X-tuotteiden käyttöä vaikeasti sähköistettävillä sektoreilla. PtX-tuotteet voivat siten toimia realistisin vaihtoehtoina fossiilisille polttoaineille [1], [2], [6], [21].

## **8. Euroopan Unionin rooli PtX-arvoketjussa**

Euroopan Unionilla on ratkaiseva merkitys Power-to-X-teknologioiden kehityksen, markkinoiden muodostumisen sekä käyttöönoton ohjauksessa. PtX-ratkaisut ovat tiiviisti sidoksissa EU:n ilmasto-, energia- sekä teollisuuspolitiikkaan. Unionin tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä, vahvistaa energian huoltovarmuutta sekä luoda vihreän siirtymän avulla uutta teollista kilpailukykyä [1], [6].

European Climate Law-asetuksessa on määritelty tavoite vähentää EU:n kasvihuonepäästöjä vähintään 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta. Fit for 55-paketti tukee näiden tavoitteiden saavuttamista ja sisältää esimerkiksi liikennesektoria koskevia sääntelyitä. Pelkkä suora sähköistäminen ei riitä osassa sektoreita päästövähennystavoitteiden saavuttamiseen, vaan on mietittävä vaihtoehtoisia ratkaisuja erityisesti sektoreilla, joissa suora sähköistäminen ei onnistu. Näitä sektoreita ovat muun muassa raskas teollisuus, kemianteollisuus sekä meri- ja lentoliikenne [1], [2], [21].

EU:n tärkeä päästöohjauksen keino on päästökauppajärjestelmä (EU ETS), jonka asteittainen kiristyminen ja laajeneminen meriliikenteeseen lisää fossiilisten polttoaineiden kustannuksia. Tämä kasvattaa uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden suhteellista kilpailukykyä [2], [6].

Myös uusiutuvan energian direktiivi (RED III) asettaa velvoitteita uusiutuvien polttoaineiden osuudelle liikenteessä ja teollisuudessa. Erityisesti uusiutuvat, ei- biologiset

polttoaineet (RFNBO), kuten e-metanoli ja e-ammoniakki, on nostettu erityisasemaan sääntelyssä [19].

EU:n FuelEU Maritime-asetus velvoittaa meriliikenteen toimijoita vähentämään alusten käyttämien polttoaineiden elinkaaripäästöjä. Tämä luo kysyntää vähäpäästöisille polttoaineille, kuten e-metanolille. Sääntelymekanismien merkitys on olennainen, sillä ne kaventavat synteettisten polttoaineiden ja fossiilisten polttoaineiden kustannuseroa sekä tukevat vähäpäästöisten polttoaineiden käyttöönottoa [18].

EU pyrkii vahvistamaan teollista rakennemuutosta vahvistamalla huoltovarmuuttaan energian ja raaka-aineiden osalta. Power-to-X-tuotteet ovat keino vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista sekä energiantuonnista. Samalla PtX-teknologiat mahdollistavat uusiutuvan sähkön muuntamisen tuotteiksi, joita voi esimerkiksi varastoida ja kuljettaa, mikä parantaa energiajärjestelmän joustavuutta [1], [28].

EU tukee Power-to-X-teknologioita useiden rahoitusohjelmien kautta vihreän siirtymän edistämiseksi. Rahoitusta pilotointi-, demonstraatio- ja kaupallisiin hankkeisiin tarjoavat EU:n innovaatorahasto (Innovation Fund) sekä Horizon Europe-ohjelma. Lisäksi IPCEI-hankkeet (Important Projects of Common European Interest) mahdollistavat jäsenvaltioiden julkisen rahoituksen energia- ja teollisuushankkeille. Useat suomalaiset ja eurooppalaiset hankkeet ovat hyödyntäneet näitä rahoitusinstrumentteja. Suurten PtX-hankkeiden rahoittaminen heijastaa EU:n pyrkimystä vahvistaa e-polttoaineiden asemaa energiajärjestelmässä [1], [28].

EU:n rooli ei kuitenkaan rajoitu pelkästään tuotannon tukemiseen. Sääntelyyn perustuva kysynnän luominen sekä yhteisten kriteerien määrittely on yhtä tärkeää. EU-tasolla määritellään uusiutuvan vihreän vedyn ja RFNBO-polttoaineiden alkuperäkriteerit sekä päästövaikutukset, mikä vähentää markkinoiden epävarmuutta ja mahdollistaa rajat ylittävän kaupankäynnin [2], [19].

Power-to-X-ratkaisut muodostavat EU:n näkökulmasta linkin sähköjärjestelmän ja muiden sektorien välille. Uusiutuvan sähköntuotannon kasvaessa muodostuu keinoja hyödyntää ylijäämä sähköä sekä tasapainottaa energiajärjestelmää. Power-to-X toimii täydentävänä tekijänä energiasiirtymässä [1], [4].



## 8.1 EU-rahoituksen kohdentuminen PtX-hankkeisiin

Euroopan Unionin rooli Power-to-X-teknologioiden kehityksessä ei rajoitu pelkästään sääntelyyn ja markkinaohjaukseen, vaan ulottuu myös investointitukiin ja rahoitusmekanismeihin, joiden avulla tuetaan pilotointi- ja kaupallisia hankkeita. Rahoitusta myönnetään eri mekanismien kautta, kuten Innovation Fund-ohjelmasta, European Hydrogen Bank-aloitteesta sekä IPCEI-rahoituksesta [1], [2], [6], [28].

EU:n innovaatorahastosta (Innovation Fund) on myönnetty rahoitusta useille e-metaanin ja e-metanolin tuotantohankkeille eri puolilla Eurooppaa. Suomessa esimerkiksi Ren-Gasin Kotka eNRG-hanke sai vuonna 2023 noin 41,9 miljoonan euron rahoituksen EU:n innovaatorahastosta. Espanjassa Innovation Fund-tukea on myönnetty muun muassa Green Meicga-hankkeelle noin 122,9 miljoonaa euroa [46].

European Hydrogen Bank-aloite tukee uusiutuvan vedyn ja RFNBO-tuotteiden tuotantoa huutokaupparamallilla. Vuoden 2024 huutokaupassa valittiin 15 hanketta, joille myönnetty kokonaisrahoitus oli noin 992 miljoonaa euroa EU-tukea uusiutuvan vedyn tuotantoon [47].

Innovation Fundin IF2-vedyn huutokaupassa valittiin kuusi hanketta, joille myönnettiin yhteensä noin 270,6 miljoonan euron EU-rahoitus. Valittujen hankkeiden joukossa on myös suomalainen Kristinestad PtX (Koppö Energia Oy), joka allekirjoitti EU-rahoitussopimuksen tammikuussa 2026. Lisäksi kolmas European Hydrogen Bank-huutokauppa avattiin vuonna 2025 noin 1,3 miljardin euron budjetilla [46], [48].

EU-rahoitus kohdistuu usein hankkeiden koko arvoketjuun, kuten uusiutuviin, ei-biologisiin polttoaineisiin. E-tuotteet ovat arvoketjun synteettisiä lopputuotteita, joita voidaan edelleen käyttää varastoinnissa, kuljetuksessa ja teollisuuden raaka-aineena. Rahoituksen tarkastelu on hankekohtaista ja perustuu päästövähennystavoitteisiin, teknologian kehitykseen sekä tuotteiden markkinoihin [1], [19], [21].

## 9. Suomen rooli Power-to-X-ketjussa

Suomen rooli Power-to-X-arvoketjussa perustuu sekä uusiutuvan sähkön tuotantoon että maantieteelliseen sijaintiin. Suomella on hyvät edellytykset synteettisten polttoaineiden tuotannolle ja viennille, vaikka kotimarkkinat ovat suhteellisen pienet verrattuna Euroopan

suuriin teollisuuskeskittymiin. Suomi voidaan sijoittaa Power-to-X-ketjun alkuosaan, eli uusiutuvan sähkön tuotantoon ja vedyn jalostukseen [3], [29].

Suomen etuna on kasvava uusiutuvan sähkön tuotanto, erityisesti tuulivoiman osalta. Uusiutuvan sähkön lisääntyminen on johtanut sähkömarkkinoilla usein mataliin sähkön hintoihin, mikä taas kannustaa sähkön muuntamiseen kemialliseen muotoon Power-to-X-tuotteiksi. Power-to-X-prosessit tarjoavat keinon sitoa ylijäämä sähköä vedyksi ja synteettisiksi polttoaineiksi ilman, että sähköntuotantoa joudutaan rajoittamaan. Tämä parantaa Suomen edellytyksiä esimerkiksi elektrolyysilaitoksille [5].

Biogeenisten hiilidioksidilähteiden saatavuus Suomessa on hyvin merkittävä tekijä. Biogeenistä hiilidioksidia Suomessa tuottavat metsäteollisuus, jätepoltto sekä bioenergia, jotka tuottavat biomassasta peräisin olevaa hiilidioksidia eivätkä siten lisää ilmaston hiilidioksidipitoisuutta. Tämä hiilidioksidi soveltuu e-metanolin ja e-metaanin raaka-aineeksi. Biogeeninen hiili vähentää tarvetta kalliille ilmatalteenotto-ratkaisuille sekä vähentää fossiilisten hiililähteiden tarvetta, mikä samalla tukee hiilineutraaliustavoitteita. Tämä tarjoaa Suomelle suhteellisen edun hiilipohjaisten Power-to-X-tuotteiden valmistuksessa [12].

Suomen energia- ja ilmastopolitiikka tukee Power-to-X-ratkaisujen kehitystä. Suomen oma hiilineutraaliustavoite vuoteen 2035 mennessä sekä EU:n päästövähennystavoitteet ohjaavat Suomen investointeja vähähiilisiin tuotantoihin. Lisäksi EU:n ilmastolainsäädäntö velvoittaa jäsenmaat vähentämään päästöjä energia- ja liikennesektoreilla, mikä lisää tarvetta hyödyntää synteettisiä polttoaineita ja vetyä [2], [3].

Tuotantolaitoksia rakennetaan usein teollisuusalueiden lähelle, jolloin e-tuotteiden saatavuus ja kuljetus voidaan järjestää kustannustehokkaasti. Erityisesti rannikkokaupungit ovat luontevia sijainteja e-metanolin ja e-ammoniakin tuotannolle, koska tällöin mahdollistuu myös tuotteen suora vienti kansainvälisille markkinoille [4].

Suomen rooli Power-to-X-arvoketjussa koskee myös tutkimustyötä sekä pilottihankkeita. Suomalaisilla tutkimuslaitoksilla ja korkeakouluilla, kuten VTT:llä ja LUT-yliopistolla, on vahva asema prosessien mallinnuksessa, optimoinnissa sekä pilotoinnissa. Erityisesti tämä on näkynyt e-metaanin ja e-metanolin pilottihankkeissa, joissa painopisteenä on ollut reaktoriratkaisujen kehittäminen, synteetin energiatehokkuus sekä lämmönhallinta. Pilottilaitokset sekä muu tutkimustyö toimivat siirtymävaiheena teolliseen ja kaupalliseen mittakaavaan [8], [39].

Suomen taloudellisena haasteena voidaan pitää kotimaisen kysynnän rajallisuutta suhteessa tuotantokapasiteettiin. Laajamittaista Power-to-X-tuotantoa ei voida kattaa pelkästään raskaan liikenteen ja kotimaisen teollisuuden kysynnällä [21].

Suomen PtX-strategia pohjautuu pääasiassa vientiin, jossa tärkeimpänä on meriliikenteen polttoaineet sekä teolliset raaka-aineet. Nestemäisessä muodossa e-metanoli ja e-ammoniakki soveltuvat kansainväliseen kuljetukseen ja niille on kasvavaa kysyntää myös EU:n ulkopuolella [18], [26].

## **10. Power-to-X-teknologioiden tekniset haasteet ja kehitystarpeet**

Power-to-X-teknologioiden laajamittaiseen käyttöönottoon liittyy monia avoimia kysymyksiä sekä jatkekehitystarpeita. Prosessien kemiallinen tausta tunnetaan hyvin, mutta käytännössä energiatehokkuus, käyttöolosuhteet sekä sähköjärjestelmän rakenne määrittävät, millä tavalla käyttöönotto toteutuu.

### **10.1 Sähkön hinnan ja käyttöasteen merkitys PtX-tuotannossa**

Sähkö on merkittävä tekijä PtX-tuotannossa, johtuen vedyn valmistuksesta elektrolyysillä. Elektrolyysi käyttää suurimman osan Power-to-X-prosessin energiasta. Siksi vedyn tuotannon tehokkuus ja kustannus ovat ratkaisevia, kuinka taloudellisesti tuotanto toteutuu [5], [29].

Vedyn tuotanto kuluttaa nykyisillä kaupallisilla elektrolyysiteknologioilla 50–55 kWh/kg sähköenergiaa kilogrammaa kohti, mikä vastaa noin 65–75 % hyötysuhdetta. Kokonaissähkönkulutus kasvaa hieman, kun vedyn puristus ja synteesisprosessin oheistoiminnot otetaan huomioon. Sähkön hinnan vaihtelut heijastuvat siten lopputuotteen kustannukseen [5], [14].

Laitoksen käyttöaste on sähkön hinnan ohella tärkeä tekijä. Kun tuotantoa ajetaan ainoastaan alhaisen hinnan jaksoina, laitoksen käyttöaste jää matalaksi ja kustannukset jakautuvat pienelle tuotantomäärälle. Jatkuva käyttö edellyttää joko sähkön tasaisempaa saatavuutta tai vedyn varastointia. Eri e-tuotteiden tekniset vaatimukset asettavat rajoituksia prosessien käyttöasteelle ja tuotteen kytkeytymiselle sähköjärjestelmään [14].

## 10.2 Prosessien energiatehokkuus ja vaihtelevat käyttöolosuhteet

Yksi merkittävistä haasteista liittyy PtX-prosessien kokonaisenergiatehokkuuteen. Muunnosprosessi sähköstä kemialliseen energiaan ja takaisin sekä tekninen kannattavuus riippuu erityisesti elektrolyysin sähkönkulutuksesta, vedyn puristuksesta sekä synteesiprosessien lämmönhallinnasta [14], [29].

Toinen kehityksen kohde liittyy prosessien joustavuuteen. Uusiutuva sähköntuotanto aiheuttaa vaihtelevia käyttöolosuhteita, ja Power-to-X-ratkaisujen on toimittava näissä olosuhteissa ilman merkittävää tehokkuuden heikkenemistä. Yksi kehityskohteista liittyy Power-to-X-laitosten toimintaan osakuormalla ja vaihtelevissa käyttötilanteissa. Vedyn tuotanto ja synteesivaiheet toimivat tilanteissa, joissa sähkön saatavuus sekä hinta vaihtelevat. Tämä asettaa vaatimuksia tuotantoketjun joustavuudelle [14].

Prosessin osista erityisesti elektrolyysi, vedyn varastointi ja prosessien synteesireaktorit muodostavat kokonaisuuden, joka vaikuttaa suoraan muiden osien toimivuuteen. Elektrolyysivaihe on usein PtX-prosessin joustavin osa. PEM-elektrolyysiä hyödynnetään usein vaihtelevaan sähköntuotantoon, sillä se pystyy seuraamaan kuorman vaihtelua nopeasti. Elektrolyysiä voidaan kyllä teknisesti ajaa osakuormalla, mutta hyötysuhde heikkenee optimikuormaan verrattuna. Pitkällä aikavälillä suuret kuormitusvaihtelut vaikuttavat komponenttien kestävyteen [5], [14].

Pilottilaitoksissa voidaan tarkastella eri kuormitusvaihteluiden vaikutusta prosessien pysyvyyteen, energiatehokkuuteen sekä laitteistojen kulumiseen myös pitkällä aikavälillä, eli useiden tuhansien käyttötuntien mittaisessa käytössä. Käytännön kokeilussa voidaan arvioida osakuormatoiminnan vaikutusta hyötysuhteen heikentymiseen, katalyyttien käyttöikänsä tai laitteistojen huoltotarpeeseen [14].

## 10.3 Lämpöintegraation merkitys

Toinen avoin kysymys koskee lämpöintegraation todellista merkitystä Power-to-X-kokonaisuudessa. Reaktiolämmön ja hukkalämmön talteenotto ja hyödyntäminen on teknisesti mahdollista, mutta sen taloudellinen ja tekninen merkitys vaihtelee tuotetyypin, laitoksen koon sekä sijainnin mukaan. Suunnittelussa tasapainotellaan investointikustannusten, saavutettavan lämpöhyödyn sekä sähköntarpeen välillä, erityisesti lämpöpumppujen käytön osalta. Pilottilaitoksissa voidaan realistisesti arvioida missä määrin lämpöintegraatio parantaa järjestelmän suorituskykyä vai jääkö vaikutus vähäiseksi [14].

#### 10.4 Raaka-aineiden saatavuus

Kolmas kehityskohde pohjautuu raaka-aineiden saatavuuteen ja laatuun. Biogeenisen hiilidioksidin saatavuus voi olla alueellisesti rajallista ja sidoksissa muihin teollisiin prosesseihin. Pohdittavaksi jää, ohjaako tämä Power-to-X-tuotantoa kohti ilmasta talteen otettavaa hiilidioksidia (DAC). Ilmasta talteen otettava hiilidioksidi lisää sekä energiankulutusta että kustannuksia [14], [29].

Pilotointivaiheessa on tärkeää arvioida ja kerätä tietoa tekijöistä, jotka vaikuttavat prosessien toimivuuteen, katalyyttien kestävyys ja koko PtX-tuotantoketjun energiataseeseen. Energiataseella tarkoitetaan PtX-prosessien kokonaisenergiavirtoja: sähköenergian muuntumista kemialliseen energiaan, syntyviä lämpöhäviöitä sekä energian talteenoton mahdollisuuksia [29].

#### 10.5 Pilottilaitosten tärkeä rooli

Power-to-X-tuotteiden lopullinen rooli energijärjestelmässä jää osin avoimeksi. E-metanoli toimii lopputuotteena meriliikenteessä ja e-ammoniakki lannoiteteollisuudessa, kun taas osa tuotteista edellyttää jatkojalostusta. Tuotteen käyttökohde vaikuttaa, mihin arvoketjun energiahäviöt kohdistuvat. Pilottilaitokset mahdollistavat erilaisten käyttötilanteiden vertaamisen käytännön tasolla [21], [26].

Säätely, päästöohjaus ja tukimekanismit määrittävät Power-to-X-teknologioiden kilpailukyvyn yhdessä markkinakysynnän kanssa. Jatkon kannalta ratkaisevaa on, miten ohjauskeinot kehittyvät ja kohdistuvat eri tuotteisiin. Pilottilaitoksista saadut käytännön kokemukset tukevat investointipäätöksiä ja vähentävät epävarmuustekijöitä siirryttäessä kaupalliseen tuotantoon [29].

Pilottilaitosten rooli ei ole olla pelkästään välivaihe kaupalliseen tuotantoon. Ne ovat arvioinnin väline, miten Power-to-X-prosessit voidaan kytkeä sähköjärjestelmään, lämmön käyttöön sekä raaka-ainevirtoihin [29].

Edellä esitetyt kehitystarpeet osoittavat, että Power-to-X-teknologioiden eteneminen kohti kaupallista mittakaavaa ei ole yksittäisen vaiheen optimointia, vaan koko tuotantoketjun tarkastelua osana energijärjestelmää. Niiden avulla voidaan tarkastella prosessien toimivuutta todellisissa käyttöolosuhteissa [14].

Seuraavaan taulukkoon on koottu pilotointivaiheen tärkeitä painopisteitä, niihin liittyviä haasteita sekä ratkaisusuunnat, joiden avulla teknologiat voivat kehittyä kohti laajamittaista käyttöä.

**Taulukko 6. Pilottilaitosten painopisteet, haasteet ja ratkaisusuunnat**

| Pilotoinnin painopiste                     | Haasteet/epävarmuus                                                | Ratkaisut ja havainnot                                                 |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Prosessien kokonaisenergiatehokkuus        | Muuntohäviöiden kasaantuminen                                      | Energiavirtojen mittaus, häviöiden paikannus                           |
| Dynaaminen käyttö ja osakuormatoiminta     | Tehokkuuden heikentyminen                                          | Käynnistys- ja pysäytyssykylien vaikutus hyötysuhteeseen ja kulumiseen |
| Laitteistojen sekä katalyyttien kestävyys  | Materiaalien kulumisen ja katalyyttien aktiivisuuden heikkeneminen | Pitkäaikaiset käyttötestit, vaihtovälien määrittäminen                 |
| Reaktiolämmön ja hukkalämmön hyödyntäminen | Lämmön matala taso ja epävarma taloudellinen hyöty                 | Lämpötilan mittaus, lämpöpumppujen COP ja integraatio                  |
| Raaka-aineiden saatavuus ja laatu          | Hiilidioksidin epäpuhtaudet                                        | Puhdistusratkaisut, vaikutus katalyytteihin                            |
| Vedyn tuotannon ja synteesin yhteensovitus | Prosessien erilaisuus                                              | Vedyn välivarastointi                                                  |
| Tuotekohtaiset erot PtX-ketjussa           | Yhden ratkaisumallin soveltumattomuus kaikkiin tuotteisiin         | PtX-prosessin vertailu käytännössä                                     |
| Kaupallinen skaalautuvuus                  | Pilotin tulosten siirrettävyys                                     | Riskien tunnistaminen ja investointikynnyksen madaltaminen             |

|                                 |                                                                                                               |                                                                                                   |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turvallisuus ja riskienhallinta | Vedyn vuotoriski, ammoniakkin ja metanolin myrkyllisyys, korkeat paineet, henkilöstön osaamisen varmistaminen | Vuodonvalvonta, sopivat materiaalivalinnat, analyysit ja turvallisuustestit, henkilöstön koulutus |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|

Taulukko perustuu kirjallisuudessa esitettyihin Power-to-X-järjestelmien pilotointi- ja kehityshaasteisiin [14], [26], [29]

Taulukko esittää pilottilaitoksille tärkeimpiä tarkastelun kohteita, jotka liittyvät PtX-teknologioiden siirtymiseen kohti kaupallista mittakaavaa. Tarkastelu kohdistuu vaihteleviin käyttöolosuhteisiin sekä osakuormakäyttöön.

Pilottilaitoksissa korostuu prosessien ymmärtäminen erilaisissa toimintaympäristöissä. Uusiutuvan sähköntuotannon vaihtelut vaikuttavat samaan aikaan elektrolyysiin, vedyn käsittelyyn, synteysiin sekä lämmönhallintaan. Pelkällä mallinnuksella näitä yhteisvaikutuksia ei voida kuvata, vaan ne edellyttävät käytännön testausta [14].

Pilottilaitosten avulla voidaan arvioida, missä määrin hukkalämmön talteenotto ja lämpöpumpun käyttö parantavat järjestelmän tehokkuutta suhteessa lisäinvestointiin. Tämä on olennaista ennen siirtymistä teolliseen tuotantoon [14].

Pilotointivaiheessa voidaan lisäksi arvioida raaka-aineiden saatavuuden vaikutusta tuotantoon. Pilottilaitokset toimivat käytännön testausympäristöinä, joissa voidaan arvioida PtX-prosessien teknistä ja taloudellista toimivuutta [29].

## 11. Yhteenveto

Tässä selvityksessä analysoitiin e-metaanin, e-metanolin ja e-ammoniakin välisiä eroja Power-to-X-tuotteina kemian, prosessitekniikan ja energijärjestelmän näkökulmasta. Lähtökohtana oli selvittää, miten e-metaani, e-metanolin ja e-ammoniikki eroavat toisistaan kemiallisesti ja prosessiteknisesti sekä miten erot näkyvät energiatehokkuudessa ja joustavuudessa. Tutkimuksessa tuotiin esille myös, mikä on pilottilaitosten merkitys teknologian kehitykselle sekä millaiset edellytykset Suomella on Power-to-X-arvoketjussa.

Kemialliset ja prosessitekniset erot johtuvat pääosin vedyn sitoutumisesta, reaktio-olosuhteista sekä tuotantoketjun rakenteesta. Osa vedystä sitoutuu e-metaanissa veteen, mikä heikentää vedyn käyttöastetta. E-metanolissa suurempi osuus vedystä sitoutuu lopputuotteeseen. Lisäksi e-metanolin nestemäinen olomuoto helpottaa varastointia ja kuljetusta. Vety sitoutuu kemiallisesti lähes kokonaan ammoniakkimolekyyliin, mutta järjestelmätasolla vedyn kokonaishyödyntämiseen vaikuttavat puristus-, kierrätys- ja energiahäviöt. Erot määrittävät tuotteen soveltuvuuden eri käyttökohteisiin.

Energiatehokkuuden kannalta suurin energiankulutus kohdistuu elektrolyysivaiheeseen, jossa vedyn käyttöaste vaikuttaa merkittävästi kokonaishyötysuhteeseen. Sähkön hinnan ja käyttöasteen merkitys korostuu erityisesti tässä vaiheessa, mikä vaikuttaa suoraan tuotantoketjun taloudelliseen kannattavuuteen. Tämän vuoksi vedyn sitoutuminen lopputuotteeseen selittää pitkälti tarkasteltujen Power-to-X-tuotteiden välisiä eroja.

Lämpöintegraation hyöty riippuu laitoksen koosta, käyttöasteesta sekä sijainnista. Prosessien joustavuutta vertailtaessa metanointi ja metanolisynteesi soveltuvat paremmin vaihtelevaan sähköntuotantoon. Reaktiolämmön hyödyntäminen vaihtelee tuotteen mukaan: e-metanolin ja e-metaanin prosesseissa talteenotettava lämpö on keskilämpöistä tai matalalämpöistä, kun taas e-ammoniakissa lämpö on korkealämpöistä prosessihöyryä.

Siirryttäessä tutkimus- ja kehitysvaiheesta kohti kaupallista mittakaavaa, pilottilaitosten merkitys kasvaa. Pilotoinnissa arvioidaan osakuormatoiminnan vaikutuksia, katalyyttien kestävyyttä, turvallisuutta sekä lämpöintegraation hyötyjä. Käytännön kokemukset vähentävät teknisiä epävarmuuksia ja tukevat investointipäätöksiä.

Suomen edellytykset e-tuotteiden tuotantoon perustuvat laajenevaan uusiutuvan sähkön tuotantoon, biogeenisen hiilidioksidin saatavuuteen sekä vahvaan tutkimus- ja



pilotointiosaamiseen. Markkinat Suomessa ovat kuitenkin rajalliset, mikä ohjaa kehitystä vientiin. Euroopan unionin sääntely sekä päästökaupan kiristyminen ohjaavat kysyntää synteettisille polttoaineille ja samalla tukevat investointeja.

Tarkastelun perusteella PtX-tuotteiden soveltuvuus riippuu teknisten ominaisuuksien lisäksi energiajärjestelmän rakenteesta, käyttöympäristöstä sekä markkinakysynnästä.

## Lähdeluettelo

- [1] European Commission, *A Hydrogen Strategy for a Climate–Neutral Europe*, 2020.
- [2] European Commission, *Fit for 55: Delivering the EU’s 2030 Climate Target*, 2021.
- [3] Valtioneuvosto, *Suomen pitkän aikavälin ilmasto– ja energiastrategia*, 2019.
- [4] International Energy Agency (IEA), *Energy System Integration*, 2021.
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*, 2021.
- [6] European Union, Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council (European Climate Law), *Official Journal of the European Union*, 2021.
- [7] ENTSO-E, *Ten-Year Network Development Plan (TYNDP)*, 2022.
- [8] VTT Technical Research Centre of Finland,  
*Power-to-X-teknologiat ja järjestelmävaikutukset*, 2018.
- [9] VTT Technical Research Centre of Finland, *Power-to-X Technologies for Sector Coupling*, 2021.
- [10] S. Rönsch, J. Schneider, S. Matthischke et al., "Review on methanation – From fundamentals to current projects," *Fuel*, vol. 166, pp. 276–296, 2016.
- [11] J. Gao, Y. Wang et al., "A thermodynamic analysis of methanation reactions," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 334–340, 2012.
- [12] VTT Technical Research Centre of Finland,  
*Biogeeninen hiilidioksidi ja Power-to-X-ratkaisut Suomessa*, 2022.
- [13] IEA, *The Future of Hydrogen*, 2019.
- [14] M. Götz et al., "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, 2016.
- [15] Thema Consulting Group, *CO<sub>2</sub> Capture and Utilization of Nordic Industry*, 2020.
- [16] E. Giglio, A. Lanzini et al., "Methanation of carbon dioxide: A review of process technologies," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 798–804, 2015.
- [17] M. Bailera et al., "Power-to-Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO<sub>2</sub>," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 292–312, 2017.
- [18] European Union, Regulation (EU) 2023/1085 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport (FuelEU Maritime), *Official Journal of the European Union*, 2023.
- [19] European Union, Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 (RED III), *Official Journal of the European Union*, 2023.

- [20] IRENA, *Innovation Outlook: Renewable Methanol*, 2021.
- [21] IEA, *E-Fuels: Status and Outlook*, 2023.
- [22] DNV, *Alternative Fuels Insight (AFI) – Maritime Fuel Transition Statistics*, 2024.
- [23] A.P. Moller–Maersk, "Launch of Laura Maersk – First methanol-enabled container vessel," Press Release, 2023.
- [24] G. C. Graaf, E. J. Stamhuis, and A. A. C. M. Beenackers, "Kinetics of low-pressure methanol synthesis," *Chemical Engineering Science*, vol. 43, no. 12, pp. 3185–3195, 1988.
- [25] G. C. Chinchin et al., "Mechanism of methanol synthesis from carbon dioxide mixtures over copper catalysts," *Applied Catalysis*, vol. 30, pp. 333–338, 1987.
- [26] IEA, *Ammonia Technology Roadmap*, 2021.
- [27] A. Valera–Medina et al., "Ammonia for power," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, pp. 63–102, 2018.
- [28] European Commission, *REPowerEU Plan*, 2022.
- [29] IEA, *Global Hydrogen Review*, 2022.
- [30] M. Fasihi and C. Breyer, "Techno-economic assessment of power-to-liquids fuels production and global trading," *Applied Energy*, vol. 245, pp. 117–129, 2019.
- [31] C. Hank et al., "Techno-economic analysis of Power-to-Liquid fuels for aviation in a German case study," *Renewable Energy*, vol. 122, pp. 386–397, 2018.
- [32] S. Brynolf, M. Taljegard, J. Grahn, and I. Hansson, "Electrofuels for the transport sector: A review of production costs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 84, pp. 188–203, 2018.
- [33] IEA, *Direct Air Capture*, 2022.
- [34] IEA, *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels*, 2022.
- [35] Nordic Ren–Gas, *Projects*, 2024. Saatavilla: <https://www.nordicrengas.fi>
- [36] P2X Solutions, *Harjavalta Power-to-X Project*, 2024. Saatavilla: <https://www.p2x.fi>
- [37] Arctic Sisu Corporation, *E-methane Production Project in Kotka*, 2024. Saatavilla: <https://www.arcticsisu.com>
- [38] VTT Technical Research Centre of Finland, *Bioruukki Pilot Platform*, 2024. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com>
- [39] LUT University, *Power-to-Gas Research Platform*, 2024. Saatavilla: <https://www.lut.fi>
- [40] Nordic Ren–Gas, *E-methane and E-fuel Projects in Tampere, Lahti and Kotka*, Press release, 2023.
- [41] *Liquid Wind and Turun Energia to develop an eMethanol facility in Naantali, Finland*. Press release, 2025. Saatavilla: <https://www.liquidwind.com>

[42] St1 Nordic Oy and LUT University, *Power-to-Methanol Pilot Project in Lappeenranta*, 2024. Saatavilla: <https://www.st1.com>

[43] Koppö Energia, *E-methanol Plant Development in Kristiinankaupunki*, 2024. Saatavilla: <https://www.koppoenergia.fi>

[44] P2X Solutions, *Power-to-X Project Development in Joensuu*, 2024.

Saatavilla: <https://www.p2x.fi>

[45] IEA, *Hydrogen Safety and Regulatory Environment*, 2023.

[46] European Commission, *Six winners of the 2024 Innovation Fund Hydrogen Auction sign grant agreements advancing renewable hydrogen*, 2026. Saatavilla: [https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/six-winners-2024-innovation-fund-hydrogen-auction-sign-grant-agreements-advancing-renewable-hydrogen-2026-01-20\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/six-winners-2024-innovation-fund-hydrogen-auction-sign-grant-agreements-advancing-renewable-hydrogen-2026-01-20_en)

[47] European Commission, *European Hydrogen Bank - First Auction (IF24) Results*, 2024.

Saatavilla:

[https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/if24-auction\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/if24-auction_en)

[48] European Commission, *European Hydrogen Bank-Third Auction 2025 Launch*, 2025.

Saatavilla:

[https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/if25-hydrogen-auction\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/if25-hydrogen-auction_en)

[49] Zhang, K. et al. *Status and perspectives of key materials for PEM electrolyzer*. Nano Research Energy, 2022.

Saatavilla: <https://www.sciopen.com/article/10.26599/NRE.2022.9120032>