

Anni Tuomimäki

# POWER-TO-X-TEKNOLOGIAT

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kesäkuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Anni Tuomimäki: Power-to-X-teknologiat  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikka  
Kesäkuu 2020

---

Power-to-X-teknologiat ovat herättäneet paljon kiinnostusta viime aikoina, koska ne tarjoavat ratkaisuja ilmastonmuutoksen torjuntaan. Tässä työssä tutustutaan Power-to-X-teknologioihin ja selvitetään, millaisia tuotteita niiden avulla on mahdollista valmistaa, miten näitä tuotteita valmistetaan ja mihin kaikkeen niitä voidaan käyttää. Lisäksi arvioidaan myös Power-to-X-teknologioiden tulevaisuudennäkymiä.

Power-to-X-teknologiolla tarkoitetaan yleisesti niitä prosessiketjuja, joiden avulla uusiutuvaa sähköä muunnetaan joksikin X:ksi. Tärkeitä osaprosesseja näissä prosessiketjuissa ovat veden elektrolyysi sekä hiilidioksidin talteenotto. Veden elektrolyysin avulla tuotetaan vetyä. Siinä vesi hajotetaan uusiutuvan sähkön avulla sen alkuaineiksi eli vedyksi sekä hapeksi. Hiilidioksidin talteenotossa voidaan käyttää muun muassa absorptiota, adsorptiota, kryogeenista erotusta tai membraaneja eli kalvoja. Mahdollisia hiilidioksidin talteenoton lähteitä ovat voimalaitokset, teollisuuden prosessit, biogeeniset lähteet, kuten biokaasun jalostus sekä ympäröivä ilma.

Power-to-X-teknologioiden avulla on mahdollista tuottaa lämpöä, kaasumaisia tuotteita, nestemäisiä tuotteita sekä proteiinia. Lämpöä tuotetaan uusiutuvasta sähköstä suoraan lämpöpumpujen tai sähkökattiloiden avulla. Tällä tavoin tuotettua lämpöä käytetään pääasiassa kaukolämmössä. Kaasumaisia tuotteita ovat veden elektrolyysin avulla tuotettu vety sekä vedyn ja hiilidioksidin avulla valmistettu metaani. Molempia voidaan varastoida, käyttää sähköntuotannossa tai liikenteen polttoaineina sekä syöttää suoraan maakaasuverkkoon. Nestemäisiä tuotteita taas ovat kemikaalit sekä polttoaineet. Niitä valmistetaan pääasiassa kahdella eri tavalla, jotka ovat Fischer–Tropsch-synteesi ja metanolisynteesi. Proteiinia valmistetaan vedystä ja hiilidioksidista käymisprosessilla, ja sitä voidaan lisätä erilaisiin ruokiin nostamaan niiden proteiinipitoisuutta.

Power-to-X-teknologioiden uskotaan olevan suuressa roolissa tulevaisuuden energijärjestelmässä. Tällä hetkellä ei esimerkiksi ole olemassa energianvarastointiteknologiaa, joka pystyisi kilpailemaan pitkäaikaisuudessa Power-to-Gas-teknologian tarjoaman energiavaraston kanssa. Power-to-X-teknologiat ovat jo teknisesti toteutettavissa, mutta jotta ne voisivat tulla kunnolla markkinoille, täytyy niiden kustannusten vielä laskea. Lisäksi säännösten täytyisi kehittyä Power-to-X-teknologioille suotuisammiksi esimerkiksi siten, että hiilidioksidipäästöoikeuksien hinnat olisivat korkeampia.

Avainsanat: Power-to-X, elektrolyysi, hiilidioksidin talteenotto, Fischer–Tropsch-synteesi, energiavarasto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TAUSTA .....	2
3. TEKNOLOGIA .....	5
3.1 Veden elektrolyysi .....	5
3.1.1 Alkalielektrolyysi .....	6
3.1.2 Polymeerimembraanielektrolyysi .....	7
3.1.3 Kiinteäoksidgelektrolyysi .....	9
3.2 Hiilidioksidin talteenotto .....	10
3.2.1 Talteenotto voimalaitoksista ja teollisuuden prosesseista .....	10
3.2.2 Talteenotto biogeenisistä lähteistä .....	12
3.2.3 Talteenotto suoraan ilmakehästä .....	12
4. TUOTTEET .....	14
4.1 Power-to-Heat .....	14
4.2 Power-to-Gas .....	15
4.2.1 Vety .....	15
4.2.2 Metaani .....	16
4.2.3 Synteesikaasu .....	17
4.3 Power-to-Liquids .....	18
4.3.1 Fischer–Tropsch-synteesi .....	18
4.3.2 Metanolisynteesi .....	19
4.4 Power-to-Food .....	20
5. TULEVAISUUS .....	21
6. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	26

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

AEL	engl. Alkaline Electrolysis, alkalielektrolyysi
CaL	engl. Calcium Looping, kalsiumkiertoprosessi
CLC	engl. Chemical Looping Combustion, kemikaalikiertopoltto
DAC	engl. Direct Air Capture, talteenotto suoraan ilmakehästä
EU	Euroopan unioni
FTS	Fischer–Tropsch-synteesi
PEM	engl. Polymer Electrolyte Membrane / Proton Exchange Membrane, polymeerimembraanielektrolyysi
PSA	engl. Pressure Swing Adsorption, adsorptio paineen avulla
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtL	Power-to-Liquids
PtM	Power-to-Methane
PtX	Power-to-X
RED	engl. Renewable Energy Directive, uusiutuvaa energiaa koskeva direktiivi
rWGS	engl. reverse Water-Gas Shift, käänteinen vesikaasun siirtoreaktio
SNG	engl. Synthetic Natural Gas, synteettinen maakaasu
SOEC	engl. Solid Oxide Electrolysis Cell, kiinteäoksidielektrolyysi
TVA	engl. Temperature Swing Adsorption, adsorptio lämmön avulla
TVSA	engl. Temperature Vacuum Swing Adsorption, adsorptio lämmön ja tyhjiön avulla
WGS	engl. Water-Gas Shift, vesikaasun siirtoreaktio

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen torjunta on yksi tämän hetken keskeisimmistä tavoitteista. Tärkeä keino ilmastonmuutoksen torjunnassa on ilmakehään päästettävien hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Jotta hiilidioksidipäästöjä voitaisiin merkittävästi vähentää, täytyy esimerkiksi energiantuotannossa siirtyä käyttämään enemmän uusiutuvia hiilidioksidivapaita energianlähteitä. Uusiutuvilla energialähteillä, kuten tuuli- ja aurinkovoimalla tuotettu sähkö on kuitenkin epäsäännöllistä, eivätkä näin sähköntuotto ja kysyntä vastaa toisiaan ilman energian varastointia. Myös liikenteen hiilidioksidipäästöjä täytyy merkittävästi vähentää. [1]

Niin sanotut Power-to-X-tekniologiat (PtX) ovat herättäneet kiinnostusta viime aikoina, koska ne tarjoavat sekä mahdollisuuden varastoida energiaa että keinon tuottaa liikenteeseen hiilidioksidineutraaleja polttoaineita [1]. PtX-tekniologiat voidaan ymmärtää erilaisiksi prosessiketjuiksi, joille yhteistä on se, että uusiutuvaa sähköä muunnetaan joksikin X:ksi [2]. Esimerkiksi takaisin energiaksi, lämmöksi, synteettisiksi polttoaineiksi, kemikaaleiksi [3] tai jopa proteiineiksi [4]. Tärkeitä osaprosesseja näissä tekniologioissa ovat veden elektrolyysi sekä hiilidioksidin talteenotto [2].

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutustua PtX-tekniologioihin tarkemmin. Tarkoituksena on siis selvittää, mitä kaikkea PtX-tekniologioiden avulla on nykyään jo mahdollista valmistaa, miten näitä PtX-tekniologian avulla tuotettuja tuotteita valmistetaan ja minkälaisiin käyttötarkoituksiin niitä voidaan käyttää. Lisäksi tavoitteena on myös tutustua PtX-tekniologioiden tulevaisuuteen sekä siihen vaikuttaviin tekijöihin.

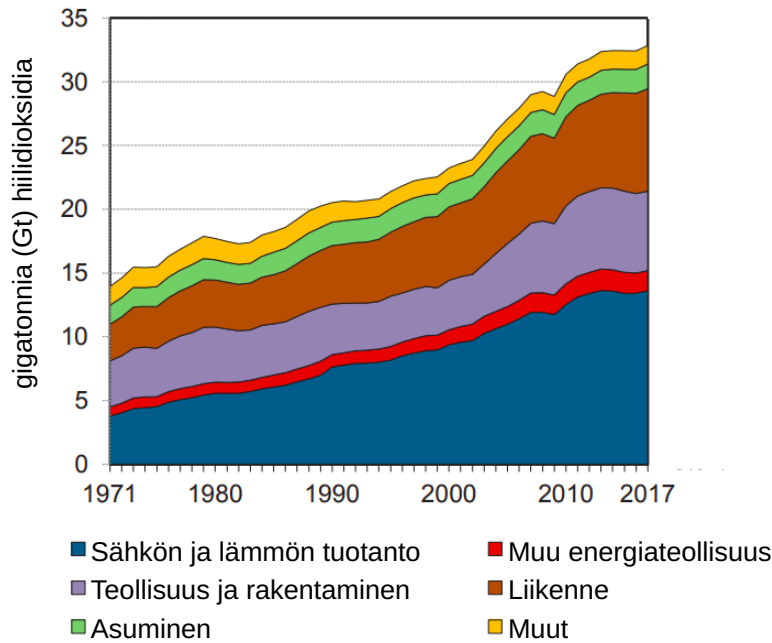
Luvussa 2 perehdytään PtX-tekniologioiden taustaan eli siihen, miksi näitä tekniologioita on tarvinnut lähteä kehittämään. Luvussa 3 käsitellään PtX-tekniologioille tärkeitä tekniologioita eli veden elektrolyysia sekä hiilidioksidin talteenottoa. Luvussa 4 keskitytään PtX-tekniologioiden tuotteisiin sekä niiden valmistustapoihin ja käyttötarkoituksiin. Luvussa 5 pohditaan vielä PtX-tekniologioiden tulevaisuutta.

## 2. TAUSTA

Kasvihuoneilmiö on luonnollinen ilmiö maapallolla. Ilmiö perustuu siihen, että maapallon ilmakehä toimii kasvihuoneen lasikaton tavoin. Auringosta tuleva säteily läpäisee kasvihuoneen lasikaton ja lämmittää sen sisällä olevia kasveja, muita rakenteita sekä sisäilmaa. Kasvihuoneen sisäpuolelta tuleva lämpö- eli infrapunasäteily ei kuitenkaan juuri onnistu läpäisemään kasvihuoneen lasikattoa, jolloin tämän säteilyn energia ei pääse karkaamaan kasvihuoneesta. Maapallon ilmakehä toimii siis samalla periaatteella eli se päästää myös auringosta tulevan säteilyn maan pinnalle, mutta estää maapallon lämpösäteilyä karkaamasta avaruuteen. Kasvihuoneilmiö on tärkeä ilmiö, koska se pitää maapallon pintalämpötilan elämälle suotuisana. Ilman kasvihuoneilmiötä maapallon pintalämpötila olisi noin 33 astetta nykyistä matalampi. [5]

Ilmakehän toimimisen kasvihuoneen lasikaton tavoin mahdollistavat ilmakehän kasvihuonekaasut. Näillä kaasuilla on kyky imeä lämpösäteilyä tietyillä aallonpituuksilla. Tärkeimpiä kasvihuonekaasuja ovat vesihöyry ( $H_2O$ ) ja hiilidioksidi ( $CO_2$ ). Nämä kaasut imevät noin 90 % kaikesta maapallon lämpösäteilystä. Ihminen on toiminnallaan lisännyt kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä ja näin voimistanut kasvihuoneilmiötä. Kasvihuoneilmiön voimistumisesta seuraa muun muassa ilmaston lämpenemistä, sateiden jakauman muuttumista sekä merenpinnan kohoamista. [5]

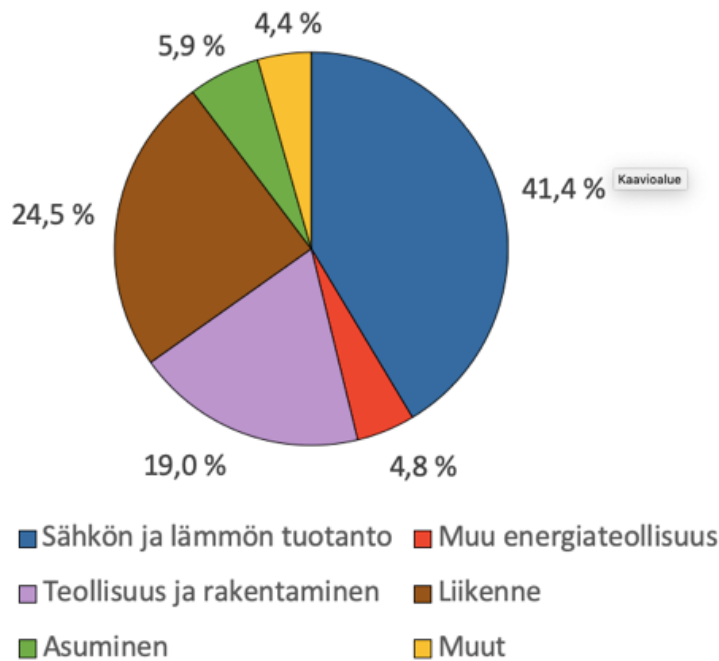
Hiilidioksidi on ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista ylivoimaisesti tärkein [5]. Kuvasta 2.1 nähdään, että ihmisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat yli kaksinkertaistuneet vuosina 1971–2017 aikana niin, että vuonna 2017 ne olivat noin 32 gigatonnia. Jos hiilidioksidipäästöjen lisääntyminen jatkuisi samaa tahtia, olisivat vuoden 2050 hiilidioksidipäästöt jo noin 50 gigatonnia.



Kuva 2.1: Maailman hiilidioksidipäästöjen kehitys vuodesta 1971 vuoteen 2017, muokattu lähteestä [6]

Jotta kasvihuoneilmiön voimistumisesta aiheutuva ilmastonmuutos voitaisiin pysäyttää, täytyy kaikkien maailman maiden olla sen torjunnassa mukana. Vuonna 2015 Pariisissa pidetyssä YK:n ilmastokokouksessa ollaankin sovittu ilmastopimuksesta [1], johon lähes kaikki maailman maat ovat sitoutuneet [7]. Sen tavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu reilusti alle kahteen asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan ja pyrkiä siihen, että lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen [7]. Jotta tämä tavoite olisi mahdollista saavuttaa, täytyisi esimerkiksi energiasektorin hiilidioksidipäästöjen olla lähellä nollaa vuonna 2050 [1].

Eniten hiilidioksidipäästöjä vapautuukin juuri energiantuotannosta. Kuvasta 2.2 nähdään, että vuonna 2017 lähes puolet ihmisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä olivat peräisin sähkö- ja lämpöenergian tuotannosta. Toiset puolet taas koostuivat pääasiassa liikenteestä sekä teollisuudesta ja rakentamisesta. Myös asumisesta syntyi jonkin verran hiilidioksidipäästöjä.



Kuva 2.2: Maailman hiilidioksidipäästöt lähteittäin vuonna 2017, perustuu lähteeseen [6]

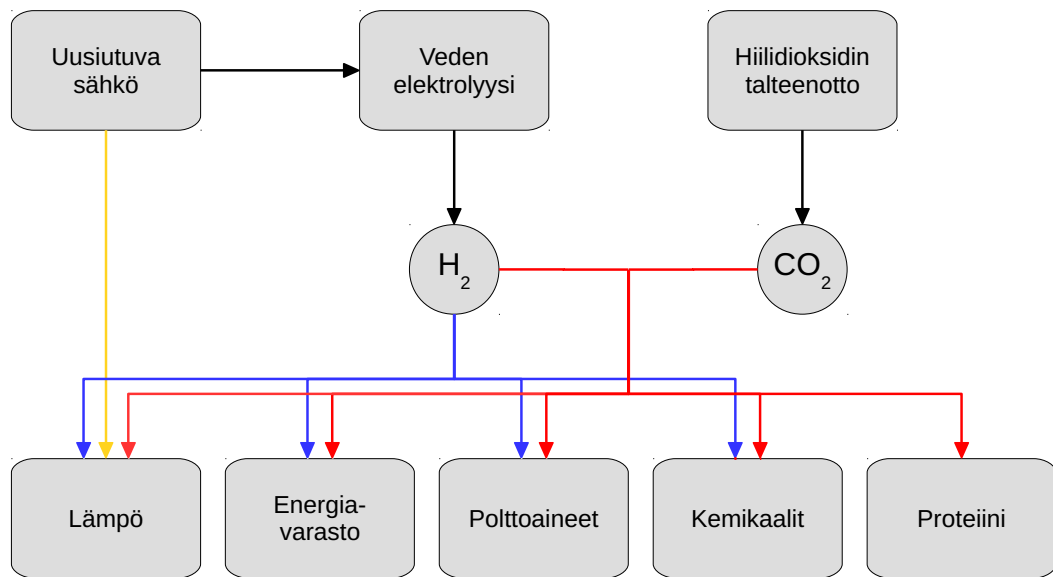
Jotta energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää, täytyisi energiantuotannon perustua pääasiallisesti uusiutuviin energianlähteisiin, kuten tuuli- ja aurinkovoimaan. Tuuli- ja aurinkovoima kuitenkin tuottavat energiaa epätasaisesti, mikä taas johtaa energian tuotannon ja kulutuksen epätasapainoon, ellei käytössä ole energiavarastoa. Liikenteen hiilidioksidipäästöjä taas voitaisiin vähentää tuottamalla hiilineutraaleja polttoaineita. PtX-tekniikat voisivat tarjota ratkaisun näihin molempiin ongelmiin, koska niiden avulla on mahdollista varastoida uusiutuvaa energiaa sekä tuottaa liikenteeseen hiilidioksidineutraaleja polttoaineita. [1]

PtX-tekniikat käsitteellistettiin ensimmäisen kerran 2000-luvun loppupuolella. Vetyteknologiasta oltiin oltu kiinnostuttu jo aiemmin, mutta vasta ilmastonmuutoksen torjuntaan liittyvät tavoitteet elvyttivät PtX-tekniikoiden kehittämisen uudelleen. Erittäin tärkeitä PtX-tekniikoiden kehityksen kannalta ovat olleet Saksan energiastrategia *Energiewende*, joka julkaistiin vuonna 2010 ja jonka tavoitteena on tehdä Saksan energiantuotannosta ympäristöystävällisempää sekä Saksan päätös luopua ydinvoimasta Fukushima ydinonnettomuuden jälkeen vuonna 2011. Saksa onkin ollut johtava maa PtX-tekniikoiden kehittämisessä. [3]



### 3. TEKNOLOGIA

Power-to-X-tekniikat voidaan ajatella erilaisiksi prosessiketjuiksi, joiden avulla uusiutuvaa sähköä muutetaan joksikin X:ksi [2]. Kuvassa 3.1 on esitetty näitä erilaisia prosessiketjuja. Siitä nähdään, että esimerkiksi lämpöä voidaan tuottaa pelkästään uusiutuvan sähkön avulla, kun taas muiden tuotteiden valmistamiseen tarvitaan veden elektrolyysin avulla tuotettua vetyä sekä mahdollisesti myös hiilidioksidia.



Kuva 3.1: Power-to-X-tekniikoiden prosessiketjut

Tärkeitä osaprosesseja PtX-tekniikoissa ovat siis veden elektrolyysi sekä hiilidioksidin talteenotto. Veden elektrolyysia voidaan pitää kaikkein tärkeimpänä, koska se on välttämätön osa useimpia prosessiketjuja. Siinä käytetään myös hyväksi uusiutuvaa sähköä. [9] Seuraavissa alaluvuissa käsitellään näitä osaprosesseja tarkemmin.

#### 3.1 Veden elektrolyysi

Veden elektrolyysi on sähkökemiallinen prosessi, jossa vesi hajotetaan sen alkuaineiksi eli vedyksi ( $H_2$ ) ja hapeksi ( $O_2$ ) johtamalla siihen tasavirtaa. Elektrolyysireaktiot tapahtuvat elektrolyysikennoissa, jotka koostuvat kahdesta johtavasta metallielektrodista, anodista ja katodista, sekä niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Kun vetyä halutaan tuottaa, kytketään yhteen monia elektrolyysikennoja. [3] Elektrolyysissä käytettävän veden täytyy olla puhdasta, eikä tavallista vesijohtovettä voida siten käyttää siinä olevien epäpuhtauksien takia. Usein elektrolyysissä käytetäänkin de-ionisoitua vettä. [2]

Elektrolyysissä tapahtuva kemiallinen reaktio, jossa siis vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi, voidaan standardiolosuhteissa (298 K, 1 bar) kirjoittaa muotoon



Standardiolosuhteissa vesi on nestemäistä ja vety sekä happi ovat kaasumaisia. Näissä olosuhteissa pystytään myös määrittämään reaktion entalpiian muutoksen arvoksi  $\Delta H^\circ = +285,84$  kJ/mol ja entropian muutoksen arvoksi  $\Delta S^\circ = +163,15$  J/mol. Näiden arvojen avulla voidaan laskea reaktion Gibbsin vapaaenergian muutos, joka saadaan laskettua seuraavasti:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = 285,840 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298 \text{ K} \cdot 163,15 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mol K}} = +237,22 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}. \quad (2)$$

Kyseessä on vahvasti endoterminen eli lämpöä sitova reaktio, koska  $\Delta H^\circ \gg 0$ . Tämän takia myös Gibbsin vapaaenergian muutos on positiivinen, mikä tarkoittaa sitä, että reaktio ei tapahdu spontaanisti, vaan tarvitsee ulkopuolista energiaa tapahtuakseen. Veden elektrolyysissä tämä energia tuodaan sähkövirran avulla. [8]

Nykyään on olemassa kolme merkittävää elektrolyysiteknologiaa, jotka eroavat toisistaan elektrolyytin perusteella. Nämä teknologiat ovat alkalielektrolyysi (AEL), polymeerimembraanielektrolyysi (PEM) ja kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC). [3] Seuraavissa alaluvuissa esitellään näitä elektrolyysiteknologioita tarkemmin.

### 3.1.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysikennossa elektrodit ovat upotettuina nestemäiseen emäksiseen elektrolyyttiin. Elektrolyyttinä toimii usein KOH- tai NaOH-liuos. Elektrolyyttejä on erottamassa toisistaan myös välikalvo, joka estää kaasujen sekoittumisen. [9]

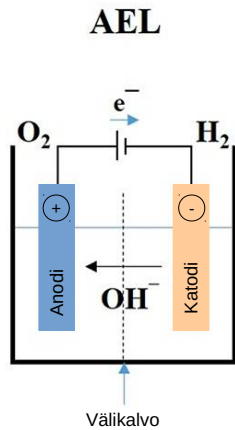
Alkalielektrolyysikennossa elektronit ( $e^-$ ) virtaavat sähkövirran vaikutuksesta anodilta katodille, jossa ne muodostavat veden kanssa vetykaasua ja hydroksidi-ioneja ( $OH^-$ ). Katodilla tapahtuvan reaktion reaktioyhtälö on



Katodilla syntyvät hydroksidi-ionit virtaavat elektrolyytin ja välikalvon läpi anodille, jossa ne hapettuvat hapeksi ja vedeksi. Anodilla tapahtuvan reaktion reaktioyhtälö on



AEL:llä tuotettu vetykaasu on erittäin puhdasta (99–99,8 %). Prosessin reaktiolämpötila on välillä 70–100 °C ja paine on noin 1–30 baaria. [9] Kuvassa 3.2 on esitetty kennon rakenne ja toiminta.



Kuva 3.2: Alkalielektrolyysikennon rakenne ja toiminta, muokattu lähteestä [9].

AEL on kaikista kehittynein ja luotettavin elektrolyysiteknologia, ja se on ollut kaupallisessa käytössä jo pitkään. AEL:n etuna on esimerkiksi sen pitkä käyttöikä, joka on noin 55 000 – 120 000 tuntia. AEL on jo käytössä myös muutamassa Power-to-Gas-voimalassa (PtG). Esimerkiksi Audin e-gas-voimalassa, joka on samalla myös maailman suurin PtG-voimala. [9]

Vaikka AEL on jo melko vakiintunut teknologia, on sillä myös muutamia huonoja puolia, kuten esimerkiksi rajoitettu käyttöpaine sekä sähkövirran tiheys. Näillä tekijöillä on negatiivinen vaikutus vedyn tuotantokustannuksiin. Lisäksi AEL toimii heikosti prosessin sähkön saannin vaihdellessa, minkä takia sen liittäminen uusiutuviin energialähteisiin, kuten tuuli- ja aurinkovoimaan, on vaikeaa. AEL:n kehittämisessä on viime aikoina keskitytty uusien kalvojen ja elektrodimateriaalien kehitykseen kennon hyötysuhteen parantamiseksi. [9]

### 3.1.2 Polymeerimembraanielektrolyysi

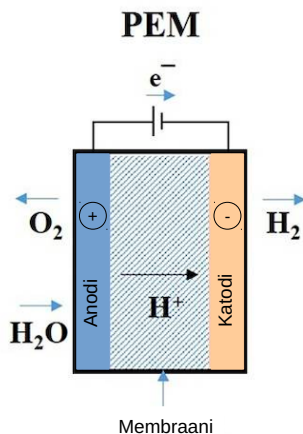
Polymeerimembraanielektrolyysikennossa on anodin ja katodin välissä protoneja johtava polymeerimembraani eli polymeerikalvo [9]. Polymeerikalvo on usein valmistettu Nafion polymeeristä, joka on hyvin ohut. Sen paksuus on noin 0,2 mm. [8,9] Polymeerikalvon tarkoitus elektrolyysikennossa on vähentää syntyvien kaasujen sekoittumista

sekä mahdollistaa suuri protonien johtavuuskyky ja korkea paine. Kalvon käyttäminen nestemäisen elektrolyytin sijasta mahdollistaa myös paremman valmiuden sähkön saannin muutoksiin. [9]

Kennon toiminta perustuu siihen, että anodille tuleva vesi hajotetaan happikaasuksi, protoniksi ( $H^+$ ) sekä elektroneiksi. Anodilta protonit siirtyvät polymeerikalvon läpi katodille. Elektronit taas virtaavat sähkövirran mukana katodille. Katodilla protonit ja elektronit yhdistyvät muodostaen vetykaasua. Anodilla ja katodilla tapahtuvien reaktioiden reaktioyhtälöt ovat



Myös PEM:llä tuotettu vety on erittäin puhdasta. PEM:ssä lämpötila on alle 150 °C ja paine on 20–50 baaria. [9] Kennon rakenne ja toiminta on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3: Polymeerimembraanielektrolyysikennon rakenne ja toiminta, muokattu lähteestä [9]

Tämän teknologian etuina ovat kennon pieni koko, korkea hyötysuhde sekä tuotetun vedyn korkea paine. Se sopii näistä teknologioista myös parhaiten yhteen epätasaisesti sähköä tuottavien uusiutuvien energialähteiden kanssa. Tämän takia PEM olisikin erittäin sopiva PtX-teknologioihin, ja yritykset, kuten Siemens ja Proton OnSite, ovatkin investoineet tämän teknologian kehittämiseen. [9]

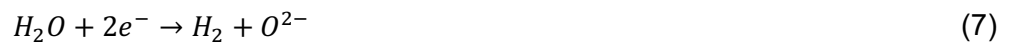
PEM:n huonoja puolia ovat sen kalliit materiaali- ja komponenttikustannukset. Materiaalien täytyy kestää alhaisia pH-arvoja sekä korkeita jännitteitä, ja sen takia materiaaleina

käytetään kalliita titaanipohjaisia komponentteja sekä jalometallipohjaisia elektrokatalyyttejä. Kennoja yritetään kehittää muun muassa vähentämällä jalometallien määrää korvaamalla niitä halvemmilla siirtymämetalleilla. [9]

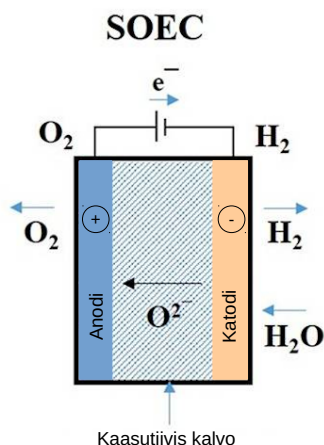
### 3.1.3 Kiinteäoksidielektrolyysi

Kiinteäoksidielektrolyysikennossa on elektrodien välissä kiinteä ioneja johtava keraaminen elektrolyytti. Tämä mahdollistaa kennon toiminnan huomattavasti korkeammassa lämpötiloissa. [10] Edellisistä teknologioista poiketen vesi tulee kennoon höyrynä [3].

Kiinteäoksidielektrolyysikennon toiminta on itseasiassa käänteinen polttokennon toiminnalle. Vesi reagoi katodilla sähkövirran tuomien elektronien kanssa muodostaen vetykaasua sekä happi-ioneja ( $O^{2-}$ ). Muodostuneet happi-ionit kulkeutuvat elektrodien välissä olevan kaasutiivin kalvon läpi katodilta anodille. Anodilla happi-ionit yhdistyvät ja muodostavat happikaasua sekä elektroneja. Katodilla ja anodilla tapahtuvien reaktioiden reaktioyhtälöt ovat [9]



SOEC:llä tuotettu vety on myös todella puhdasta. Sen toimintalämpötila, kuten edellä todettiin, on hyvin korkea, noin 650–1000 °C. Kennon toimintapaine on kuitenkin näistä teknologioista matalin. [10] Kennon rakenne ja toiminta on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva3.4: Kiinteäoksidielektrolyysikennon rakenne ja toiminta, muokattu lähteestä [9]

Tämän teknologian etuja ovat muun muassa korkean lämpötilan mahdollistamat korkea hyötysuhde sekä matalat materiaalikustannukset tehokapasiteettiyksikköä kohden. Kiinteäoksidi-elektrolyysikennoa voidaan myös käyttää käänteisesti polttokennona ja muuttaa näin tuotettu vety takaisin sähköksi. Tämän teknologian avulla on siis esimerkiksi mahdollista varastoida uusiutuvaa energiaa, kuten aurinko- tai tuulienergiaa. SOEC:n avulla voidaan myös valmistaa synteetikaasua ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) suoraan vesihöyrystä ja hiilidioksidista. [9,10]

Toisin kuin AEL ja PEM, jotka ovat jo kaupallisessa käytössä, on SOEC vielä prototyyppivaiheessa. Sen elinikää, kestävyyttä sekä paineistettua toimintaa tarvitsee vielä kehittää. Kennon kestävyys ja elinikä ovat huonoja, koska materiaalit eivät kestä tarpeeksi hyvin suuria lämpötiloja. Tutkimuksissa on todettu, että materiaalien heikkenemistä voidaan rajoittaa alhaisilla virrantiheyksillä. Nykyään ollaankin keskitytty materiaalien kestävyuden parantamiseen suuremmilla virrantiheyksillä. [9]

## 3.2 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen useista erilaisista lähteistä. Näitä ovat esimerkiksi polttovoimalaitokset, teollisuuden prosessit, biogeeniset lähteet tai ympäröivä ilma. [11] Kun hiilidioksidi otetaan talteen yllä mainituista päästölähteistä tai ilmakehästä, ei PtX-teknologioista synny uusia hiilidioksidipäästöjä ilmakehään [2]. PtX-teknologioiden tuotteita voidaan toisin sanoen pitää hiilineutraaleina.

Hiilidioksidin talteenoton kannattavuus riippuu hiilidioksidin osapaineesta päästölähteessä. Mitä suurempi on hiilidioksidin osapaine, sitä taloudellisempaa sitä on ottaa siitä talteen. [12] Monissa päästölähteissä hiilidioksidin pitoisuus noin 3–20 tilavuusprosenttia, mutta ilmakehässä se on vain noin 0,04 tilavuusprosenttia [11]. Seuraavissa alaluissa on esitelty erilaisia tekniikoita hiilidioksidin talteenottoon päästölähteittäin.

### 3.2.1 Talteenotto voimalaitoksista ja teollisuuden prosesseista

Polttovoimalaitokset, kuten hiili- ja maakaasuvoimalat, sekä teollisuuden prosessit, kuten teräksen, sementin tai kemikaalien valmistus, ovat fossiilisia hiilidioksidin lähteitä [11]. Energiantuotanto ja teollisuus tuottavat yhdessä yli kolmanneksen maapallon hiilidioksidipäästöistä, minkä takia niiden talteenotto on kannattavaa. Tulevaisuudessa merkittäviä hiilidioksidin talteenoton lähteitä tulevat olemaan muun muassa sementin, raudan, teräksen sekä joidenkin kemikaalien valmistukset, joissa hiilidioksidipäästöjä syntyy savukaasujen lisäksi myös raaka-aineista sivutuotteina. [12]

Polttovoimalaitoksista hiilidioksidia voidaan ottaa talteen polton jälkeen, ennen polttoa tai happipolttoprosessin avulla. Polton jälkeen hiilidioksidi otetaan talteen poltossa syntyneistä savukaasuista. Niistä hiilidioksidia voidaan ottaa talteen muun muassa kemiallisen ja fysikaalisen absorptio, adsorptio, kryogeenisen erotuksen tai membraanien avulla. Kun hiilidioksidia taas otetaan talteen ennen polttoa, kaasutetaan polttoainetta ensin, minkä jälkeen syntyneestä kaasusta hiilidioksidi voidaan ottaa talteen samoilla tekniikoilla kuin poltonjälkeisistä savukaasuista. Teollisuuden prosesseista hiilidioksidia voidaan myös ottaa talteen samoilla yllä mainituilla tekniikoilla. Polton jälkeinen talteenotto on helpointa lisätä jo valmiiden voimalaitosten ja teollisuuslaitosten yhteyteen. [11]

Kemiallinen ja fysikaalinen absorptio ovat jo vakiintuneita menetelmiä hiilidioksidin talteenottoon voimalaitoksilta ja teollisuuden prosesseista [11]. Kemiallisessa absorptiossa käytetään amiinipohjaisia liuottimia ja fysikaalisessa absorptiossa käytetään orgaanisia liuottimia, kuten alkoholeja [11,12]. Absorptioprosessissa kaasuseoksessa oleva hiilidioksidi absorboidaan liuottimeen, joka sitten siirretään lämmitettäväksi, jotta hiilidioksidi voidaan vapauttaa siitä. Hiilidioksidin vapauduttua liuotin voidaan siirtää takaisin absorboimaan lisää hiilidioksidia. [12] Tämän tekniikan huonona puolena on kuitenkin se, että savukaasua täytyy usein jäähdyttää ennen absorptiota ja sitten kuumentaa uudelleen hiilidioksidin vapauttamista varten [13].

Adsorptiota pidetään lupaavana teknologiana. Siinä hiilidioksidi sidotaan kiinteän aineen eli adsorbenttin pintaan ja vapautetaan siitä adsorbenttin täytyessä esimerkiksi paineistamalla. Kryogeeninen erotus taas perustuu hiilidioksidin tiivistymiseen. Kun savukaasua puristetaan ja jäähdytetään, saadaan siitä erotettua hiilidioksidirikasta nestettä. [12] Kryogeenistä erotusta käytetään laajalti jo muiden kaasujen, kuten hapen tai typen, erottamisessa [12], mutta sen kustannukset ovat vielä korkeita [11]. Talteenotossa membraanien eli kalvojen avulla hiilidioksidi saadaan talteen, koska kalvon toiselle puolelle pääsee vain hiilidioksidirikasta kaasua. Kalvon läpäisy perustuu osapaine-eroihin sen eri puolilla. [12] Tämä tekniikka on vielä kehitysvaiheessa, mutta sen etuna on sen matala energian tarve [11].

Happipoltossa polttoainetta poltetaan ilman sijasta puhtaan hapen kanssa, jotta savukaasuihin ei syntyisi typpeä. Poltossa käytetään myös kierrätettyjä savukaasuja, ettei palamislämpötila nouse liian korkeaksi. Poltossa syntynyt savukaasu koostuu siis pääasiassa vain hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Vesihöyry voidaan poistaa savukaasusta tiivistämällä, jolloin jäljelle jää pääasiassa hiilidioksidia. Happipolton huonona puolena on kuitenkin se, että se vaatii puhdasta happea, joka täytyy ensin erottaa ilmasta. [11]

Lisäksi hiilidioksidia voidaan ottaa vielä talteen kahdella kiertoprosessilla: kemikaalikiertopoltolla (CLC) ja kalsiumkiertoprosessilla (CaL). CLC perustuu happipolttoon. Prosessissa happea tuodaan polttoaineeseen hapenkantajan avulla. Hapenkantajana käytetään metallioksidia, joka kiertää prosessissa. Se vuorotellen pelkistetään polttoainereaktorissa ja hapetetaan ilmareaktorissa. [14] CaL:ssa savukaasun hiilidioksidi reagoi kalsiumoksidin (CaO) kanssa karbonointireaktorissa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO<sub>3</sub>). Syntynyt kalsiumkarbonaatti siirretään kalsinointireaktoriin, jossa se hajotetaan hiilidioksidiksi ja kalsiumoksidiksi. Sieltä hiilidioksidi otetaan talteen ja kalsiumoksidi kiertää takaisin karbonointireaktoriin. [13]

### 3.2.2 Talteenotto biogeenisistä lähteistä

Biogeenisiä hiilidioksidin lähteitä ovat muun muassa biokaasun tuotanto- ja jalostusprosessit, bioetanolin tuotantoprosessi sekä muut käymisprosessit kuten esimerkiksi alkoholin, etikan tai asetonin tuotantoprosessit. Myös biomassaa polttavat voimalaitokset ovat biogeenisen hiilidioksidin lähteitä. Biomassavoimalaitoksissa voidaan käyttää samoja edellisessä alaluvussa mainittuja hiilidioksidin talteenottotekniikoita kuin muissakin polttovoimalaitoksissa. [11]

Biokaasua tuotetaan biomassasta anaerobisella mädätyksellä. Biokaasu sisältää suuren osuuden metaania (CH<sub>4</sub>) ja noin 40 % hiilidioksidia. Kun biokaasusta halutaan jalostaa biometaania, hiilidioksidi voidaan erottaa esimerkiksi absorptiolla, adsorptiolla tai membraanien avulla. Tällä tavoin tuotettu hiilidioksidi on puhdasta eikä se tarvitse lisäpuhdistusta. Biokaasun jalostuksessa syntyvä hiilidioksidi voidaan ajatella jätetuotteena, ja sitä on siten saatavilla ilmaiseksi. Myös bioetanolin tuotannosta saadaan hiilidioksidia matalilla kustannuksilla. Bioetanolitehtailla hiilidioksidia syntyy käymisprosessissa. Syntyvällä poistokaasulla on jo valmiiksi suuri hiilidioksidipitoisuus, eikä täten lisäpuhdistus ole välttämätöntä. [11]

### 3.2.3 Talteenotto suoraan ilmakehästä

Hiilidioksidin keräämiseen ilmakehästä käytetään DAC-prosessia (Direct Air Capture) [1]. Koska hiilidioksidin pitoisuus ja osapaine ilmakehässä ovat huomattavasti alhaisempia kuin edellä mainituissa päästölähtessä, ovat prosessin kustannukset korkeat [12]. DAC-prosessia on kuitenkin käytetty jo muun muassa Lappeenrannan yliopiston SOLE-TAIR-projektissa, joka oli PtX-voimalaprojekti [1].



DAC-prosessi koostuu usein kolmesta osasta. Ensin ympäröivä ilma täytyy ohjata sorbentille eli sitovaan aineeseen. Sitten ilmakehässä oleva hiilidioksidi täytyy sitoa sorbenttiin absorptiolla tai adsorptiolla. Lopuksi kerätty hiilidioksidi täytyy vielä erottaa sorbentista. Ensimmäisessä vaiheessa voidaan käyttää apuna esimerkiksi tuulettimia. [15]

Toisessa vaiheessa käytetään höydyksi nestemäistä tai kiinteää väliainetta, jolla on taipumus reagoida hiilidioksidin kanssa. Tämä väliaine on emäksinen, ja se muodostaa kovalenttisia sidoksia hiilidioksidissa olevien osittain happamien hiiliatomien kanssa. [1] Koska nestemäisten väliaineiden sidosenergia on suuri, vaatii hiilidioksidin talteenotto niistä valtavasti energiaa, minkä takia kiinteiden väliaineiden käyttö on paljon yleisempää ja tutkitumpaa [15]. Yleisin väliaine onkin kiinteä sorbentti, joka sisältää amiineja. Nämä sorbentit sitovat hiilidioksidin kemiallisella adsorptiolla. [1]

Kiinteään väliaineeseen sidottu hiilidioksidi voidaan kerätä talteen muun muassa lämpötilan tai paineen avulla. Jos käytetään lämpötilaa, on kyseessä TSA (Temperature Swing adsorption) ja jos käytetään painetta, on kyseessä PSA (Pressure Swing Adsorption). [15] On myös mahdollista käyttää hyväksi sekä lämpötilaa että painetta. Jos paine vielä lasketaan lähelle tyhjiön painetta, on kyseessä TSVA (Temperature Vacuum Swing Adsorption). TSVA on houkutteleva vaihtoehto, koska se mahdollistaa hiilidioksidin vapauttamisen pienemmissä lämpötiloissa kuin TSA ja sen käytössä voidaan siten hyödyntää heikkolaatuista lämpöä. [1]

DAC-prosessin parantamisessa keskitytään laajalti adsorbenttien ominaisuuksien kehittämiseen, mutta myös adsorptiokammion muotoilu ja prosessin hallintaa voidaan vielä parantaa. Ilmaa halutaan nimittäin saada mahdollisimman paljon sen laimean hiilidioksidipitoisuuden vuoksi ja prosessia täytyy voida säätää sääolosuhteiden vaihtuessa. [1]

## 4. TUOTTEET

PtX-teknologioissa X viittaa siihen, miksi sähköenergia muunnetaan. X voi olla jokin yksittäinen tuote, tuoteryhmä tai tuotteiden käyttötarkoitus. Esimerkiksi Power-to-Methane (PtM) viittaa yksittäiseen tuotteeseen eli metaaniin, kun taas PtG viittaa tuoteryhmään eli kaasuihin, joihin metaanikin kuuluu. Power-to-Transport sekä Power-to-Power taas viittaavat tuotteiden käyttötarkoituksiin eli käyttöön liikenteessä sekä siihen, että tuotettu tuote muunnetaan takaisin sähköksi. [2]

PtX-teknologioiden tuotteilla on monia erilaisia käyttötarkoituksia. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi sähkön tuottamiseen eli toisin sanoen niiden avulla on mahdollista varastoida energiaa. Verrattuna muihin energiavarastoihin, kuten pumppuvoimalaitoksiin tai pattereihin, takaa energian muuttaminen kemialliseksi energiaksi pitkäkestoisemman energiavaraston. Lisäksi PtX-teknologioiden tuotteita voidaan käyttää myös lämmityksessä, liikenteessä ja teollisuudessa. [3]

Tässä luvussa tutustutaan tarkemmin PtX-teknologioiden avulla valmistettaviin tuotteisiin. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tarkemmin erilaisia PtX-teknologioiden tuoteryhmiä esittelemällä niihin liittyviä valmistusteknologioita sekä niihin kuuluvien tuotteiden käyttötarkoituksia.

### 4.1 Power-to-Heat

Tuote, jota Power-to-Heat-teknologian avulla saadaan on lämpö. Power-to-Heat-termi (PtH) viittaa lämmön tuotantoon suoraan uusiutuvasta sähköstä joko lämpöpumppujen tai sähkökattiloiden avulla. [16] Lämpöpumppujen toiminta perustuu laitteessa kiertävän kylmäaineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen. Höyrystyessään kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ympäristöstään. Sähköä käytetään lämpöpumpun kompressorissa, joka puristaa höyrystetyn kylmäaineen korkeampaan paineeseen, jolloin myös sen lämpötila nousee. Korkeammassa lämpötilassa oleva kylmäaine lauhtutetaan, jolloin vapautuu lämpöä, joka siirretään lämmitysverkostoon. [17] Sähkökattiloissa sähköä käytetään suoraan veden lämmittämiseen sähkövastusten avulla [18].

Eryteisesti sähkökattiloiden investointikulut ovat verrattain pienet eli niiden on mahdollista toimia kannattavasti, vaikka ne toimisivat vain muutamia tunteja täydellä teholla. Tämä tekee niistä erittäin hyviä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun ylimääräisen sähkön hyö-

dyntämiseen. Lämpöpumput pystyvät kuitenkin toimimaan sähkökattiloita tehokkaammin, ja niiden avulla on lämmityksen lisäksi mahdollista myös jäähdyttää. Taloudellisen kannattavuuden takia näiden teknologioiden käyttöönotto on kuitenkin vielä alhaisempaa kuin kilpailevien lämmitysteknologioiden. [19]

PtH-teknologioiden avulla tuotettua lämpöä käytetään pääasiassa kaukolämmössä, mutta sitä voidaan käyttää myös teollisuuden lämmöntarpeeseen. PtH-teknologian etuna on se, että se voi vähentää uusiutuva energian rajoittamisen tarvetta, koska sen avulla uusiutuvien tuottamaa ylimääräistä sähköä voidaan hyödyntää. Lisäksi PtH-teknologioiden avulla on mahdollista säästää polttoainetta lämmöntuotannossa. Erityisesti maat, kuten Tanska ja Saksa, jotka käyttävät paljon uusiutuvia energialähteitä sähköntuotannossaan, ovat viime vuosina lisänneet PtH-projektejaan. [16]

## 4.2 Power-to-Gas

PtX-teknologioiden avulla on mahdollista tuottaa kaasumaisia tuotteita. PtG-prosessissa sähköenergiaa muunnetaan joksikin kaasumaiseksi energiankantajaksi, yleensä vedyksi tai metaaniksi. Vetyä voidaan tuottaa suoraan veden elektrolyysillä ja metaania taas voidaan valmistaa vedyn sekä hiilidioksidin avulla. [20] Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan tarkemmin vedyn käyttötarkoituksia sekä metaanin valmistusta ja sen käyttötarkoituksia. Lopuksi kerrotaan vielä synteetikaasun valmistuksesta, koska sekin on kaasumainen tuote sekä tärkeä väliaine Power-to-Liquids-prosesseissa (PtL).

### 4.2.1 Vety

Useimmissa PtX-teknologioiden prosessiketjuissa veden elektrolyysin avulla tuotettua vetyä käytetään muiden tuotteiden valmistamiseen, mutta sitä voidaan hyödyntää myös sellaisenaan [2]. Sellaisenaan vetyä voidaan käyttää muun muassa sähkön tuottamiseen polttokennojen avulla. Vedyn avulla on siis mahdollista varastoida energiaa. [3] Vetyä voidaan varastoida esimerkiksi suolaesiintymiin, metallihybridivarastoihin sekä nestemäisenä säiliöihin. Etenkin geologiset varastot tarjoavat pitkäaikaisen varastointimahdollisuuden. [2]

Vetyä voidaan syöttää sellaisenaan myös maakaasuverkkoon. Vetyä ei kuitenkaan voida laittaa sinne kovin paljoa, koska suuria määriä laitettaessa, verkkoon täytyisi tehdä muutoksia. Lisäksi vetyä voidaan vielä käyttää polttoaineena vety- eli polttokennoautoissa sekä tärkeiden kemikaalien, kuten ammoniakkin ( $\text{NH}_3$ ), valmistamisessa Harber–Boschmenetelmällä [3]. Harber–Bosch-prosessissa vety ja ilmasta erotettu typpi ( $\text{N}_2$ ) reagoivat seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti [21]:



Vedyn käyttäminen sellaisenaan voi olla hyödyllisempää verrattuna hiilivetyjen tuottamiseen, koska pitkissä prosessiketjuissa on enemmän häviöitä [22]. Pelkän vedyn käyttämistä polttoaineena onkin tutkittu enemmän verrattuna muiden vetypohjaisten seosten käyttämiseen [7]. Kaikesta huolimatta myös vedyn käytöllä sellaisenaan on huonoja puolia, kuten vetysäiliöiden läpäisevyys, huono tilavuuteen suhteutettu energiatiheys sekä tarve mahdollisesti kokonaan uudelle infrastruktuurille [22].

#### 4.2.2 Metaani

PtG-tekniologialla valmistetaan usein metaania. PtM-prosessissa vety ja hiilidioksidi muunnetaan metaaniksi sekä vedeksi. PtG-menetelmillä valmistettua metaania voidaan kutsua myös synteettiseksi maakaasuksi (SNG). Metaania voidaan valmistaa kahdella eri tavalla, kemiallisella metanoinnilla sekä biologisella metanoinnilla. [2] Näistä teknologioista kemiallinen metanointi on paljon kehittyneempi teknologia [9] ja sopii sen takia paremmin suuriin projekteihin [3].

Kemiallisen metanoinnissa tapahtuva reaktio on Sabatier-reaktio [22], jonka reaktioyhtälö on [9]



Reaktio on eksoterminen, ja se tapahtuu usein 200–550 °C lämpötilassa sekä alle 100 baarin paineessa. Katalyyttinä reaktiossa käytetään usein nikkelpohjaisia katalyytteja, koska niillä saadaan korkea aktiivisuus ja koska niiden hinta on alhainen. Näillä katalyyteilla reaktion lämpötila on kuitenkin rajattu yllä esitettyihin lämpötiloihin ja siksi tutkimusta katalyytin parantamisesta on tehty. Esimerkiksi jalometalleja on tutkittu, koska ne toimivat hyvin matalammissa lämpötiloissa. [9]

Biologisessa metanoinnissa mikrobit toimivat biokatalyytteinä ja muuntavat vedyn ja hiilidioksidin metaaniksi. Biologisen metanoinnin etuja ovat sen toiminta ilmakehän paineessa sekä alhaisissa noin 40–70 °C lämpötiloissa. Mikrobit sietävät myös hyvin epäpuhtauksia, joita on usein syötekaasuissa. Kuitenkin hitaammat reaktioajat sekä suurempi tehontarve verrattuna kemialliseen metanointiin tekevät hyötysuhteesta huonomman. [23]

Metaania käytetään muun muassa lämmön ja sähkön tuotannossa. Koska tuotettu SNG on todella puhdasta, voidaan sitä syöttää suoraan jo olemassa oleviin maakaasuverkkoihin, varastoida tai polttaa maakaasulaitoksissa. [9] Metaania voidaan käyttää myös polttoaineena kaasuautoissa [3]. Myös joitakin PtM-voimaloita on jo olemassa. Esimerkiksi Audin e-gas-voimala on PtM-voimala. Myös esimerkiksi Euroopan Unionin (EU) rahoittama Store&Go-projekti sekä EU:n ja Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative'n yhdessä rahoittama HELMETH-projekti keskittyvät PtM-prosessiin. [9]

### 4.2.3 Synteesikaasu

Synteesikaasu on hiilimonoksidin ja vedyn sekoitus. Sitä käytetään yleisesti väliainetuotteena ja prosessoidaan myöhemmin muun muassa liikenteen käyttöön tai kemikaaliteollisuuteen. Perinteisen höyryreformoinnin lisäksi sitä voidaan valmistaa myös muun muassa metaanin kuivareformoinnin, käänteisen vesikaasun siirtoreaktion (rWGS) sekä elektrolyysin avulla. [2]

Reformoinneissa tarvitaan lähtöaineeksi metaania. Höyryreformoinnissa metaani reagoi vesihöyryn kanssa. Tapahtuvan reaktion reaktioyhtälö on



Kuivareformoinnissa taas metaani reagoi hiilidioksidin kanssa, ja siinä tapahtuvan reaktion reaktioyhtälö on



Molemmat reaktiot ovat endotermisiä ja katalyyttisiä. Höyryreformointi on ollut vallitseva teknologia, mutta kuivareformointi on myös tärkeä vaihtoehto, koska se hyödyntää kahta merkittävää kasvihuonekaasua. [24]

PtX-teknologioiden kannalta tärkeimmät valmistustavat ovat kuitenkin rWGS sekä elektrolyysi, koska niiden lähtöaineina ovat vety ja hiilidioksidi. rWGS on endoterminen reaktio, joka tapahtuu korkeissa yli 600 °C lämpötiloissa [1]. Reaktiossa hiilidioksidi muunnetaan synteesikaasuun tarvittavaksi hiilimonoksidiksi, ja sen reaktioyhtälö on [25]



Elektrolyysillä tuottaminen onnistuu SOEC:llä. Elektrolyysissä vesi ja hiilidioksidi muunnetaan sähkön ja lämmön avulla vedyksi sekä hiilimonoksidiksi. Elektrolyysissä tapahtuvat reaktiot ovat veden elektrolyysi (1) sekä hiilidioksidin elektrolyysi, jonka reaktioyhtälö on



Lisäksi elektrolyysissä voi tapahtua myös rWGS-reaktiota, jos veden elektrolyysillä syntynyt vety ja hiilidioksidi reagoivat keskenään. [26]

### 4.3 Power-to-Liquids

PtX-teknologioiden avulla voidaan valmistaa myös nestemäisiä tuotteita. Nämä ovat pääasiassa liikenteen polttoaineita sekä kemikaaleja. Termit Power-to-Fuels ja Power-to-Chemicals liittyvätkin läheisesti PtL-termiin, eikä niitä sen takia ole käsitelty omissa alaluvuissaan. [2] PtL-teknologian avulla tuotetut polttoaineet ovat hiilineutraaleja, koska niissä oleva hiilidioksidi on otettu talteen jostakin päästölähteestä tai suoraan ilmakehästä. Erityisesti ilmailulle PtL-teknologiat tarjoavat merkittävän mahdollisuuden, koska siellä ei ole vielä tarjolla muita fossiilivapaita polttoaineita. Tuotettuja polttoaineita ovat esimerkiksi bensiini, diesel, dimetyylieetteri ja kerosiini. Esimerkkejä valmistettavista kemikaaleista ovat esimerkiksi muurahaishappo sekä formaldehydi. [9]

Nestemäisiä tuotteita valmistetaan yleisesti kahdella eri tavalla hiilidioksidista sekä vedystä. Nämä valmistustavat perustuvat hiilidioksidin tai hiilimonoksidin hydraukseen ja ovat Fischer–Tropsch-synteesi (FTS) sekä metanolisynteesi. [2] Näitä valmistustapoja on esitelty tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

#### 4.3.1 Fischer–Tropsch-synteesi

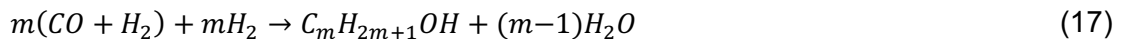
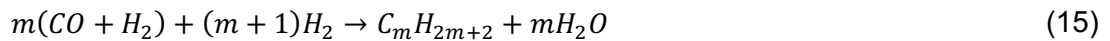
FTS on tunnettu teknologia, jonka avulla voidaan valmistaa kaasumaisia, nestemäisiä sekä kiinteitä hiilivetyjä synteesikaasusta eli hiilimonoksidin ja vedyn seoksesta. Koska synteesikaasuun tarvitaan hiilimonoksidia ja käytössä on pääasiassa hiilidioksidia, täytyy hiilidioksidi usein muuttua ensin hiilimonoksidiksi. Tämä on mahdollista esimerkiksi yllä mainitulla rWGS-reaktiolla. [1]

FTS:n tuotteena syntyy pääasiassa erilaisia hiilivetyjä, joilla on eri määrä hiiliatomeja [1]. Tuotteessa voi olla esimerkiksi alkaaneja, alkeeneja sekä alkoholeja ja muita hapettuneita hiilivetyjä [22]. Syntyneiden hiilivetyjen jakauma riippuu reaktion olosuhteista sekä

käytetystä katalyytistä [1]. Esimerkiksi korkeammissa lämpötiloissa syntyy pääasiassa lyhytketjuisia hiilivetyjä, kun taas matalammissa lämpötiloissa syntyy enemmän pitkäketjuisia hiilivetyjä [27].

Katalyytteinä FTS:ssä käytetään esimerkiksi rautaa, kobolttia tai ruteniumia [22]. Kun katalyyttinä käytetään rautaa, voi veden muodostumisen seurauksena tapahtua myös vesikaasun siirtoreaktio (WGS). Kobolttia käytettäessä taas WGS sekä alkeenien ja alkoholien muodostuminen on häviävän pientä. [28]

Esimerkkejä FTS:ssä tapahtuvista reaktioyhtälöistä ovat esimerkiksi alkaanien (15), alkeenien (16) ja alkoholien syntymisreaktiot (17) sekä vesikaasun siirtoreaktio (18):



Yhtälöistä nähdään, että myös vedyn ja hiilimonoksidin suhde vaikuttaa syntyviin tuotteisiin. [28]

FTS on erittäin voimakkaasti eksoterminen reaktio ja tarvitsee sen takia jatkuvaa viilenystä [22]. Reaktion toimintapaine on noin 20–30 baaria ja lämpötila noin 180–250 °C [1]. FTS:n jälkeen syntynyt tuoteseos jalostetaan samalla tavalla kuin raakaöljy [22].

### 4.3.2 Metanolisynteesi

Metanolisynteessissä vety ja hiilidioksidi tai hiilimonoksidi muunnetaan metanoliksi ( $H_3COH$ ). [9] Yleisesti metanolia tuotetaan synteesisikaasusta. Tällöin reaktioyhtälö on



Viimeaikaisissa tutkimuksissa on kuitenkin keskitytty metanolin tuottamiseen suoraan hiilidioksidista, jotta ei tarvittaisi rWGS-reaktiota. Tällöin reaktioyhtälö on



Tällä reaktiolla on kuitenkin vielä teknisiä haasteita, kuten se, että tarvittavat paineet ovat korkeita, jopa yli 30 MPa. [29]

Metanoli on monikäyttöinen raaka-aine kemianteollisuudessa sekä tärkeä liikenteen polttoaineiden valmistamisessa. Metanolia voidaan kuitenkin käyttää myös sellaisenaan esimerkiksi merenkulun polttoaineina. Muita polttoaineita, kuten bensiiniä, dieseliä, dimeytylieetteriä ja kerosiinia valmistetaan muuntamalla metanoli ensin kevyiksi alkeeneiksi, jotka sitten yhdistetään halutuiksi suuremmiksi molekyyleiksi. [29]

#### **4.4 Power-to-Food**

PtX-teknologioiden avulla voidaan valmistaa nykyään jopa ruokaa. Suomalainen start-up Solar Foods on kehittänyt proteiinin, jota valmistetaan hiilidioksidin, veden ja sähkön avulla. Tuotteen nimi on Solein. [4]

Soleinia valmistettaessa käytetään hiilidioksidia, vetyä ja sähköä käymisprosessissa. Typpi lisätään tähän tuotteeseen ammoniakkin vesiliuoksen avulla. Valmistusprosessia voisi verrata viinin valmistukseen, mutta hiivan sijasta Soleinin valmistuksessa käytetään patentoitua täysin luonnollista bakteeria. Sokerin sijasta tämä bakteeri syö hiilen ja energian lähteeksensä hiilidioksidia ja vetyä. Bakteerin syödessä vetykuplia se kasvaa ja lisääntyy. Tästä prosessista poistetaan jatkuvasti nestettä, ja kun tuote kuivuu, saadaan valmista Solein-jauhetta. [4]

Solein muistuttaa ulkonäöltään esimerkiksi vehnä jauhoja, eikä sillä ole juuri mitään omaa makua. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi lisäämällä sitä leipään, pastaan, jogurttiin tai valmisruokiin nostamaan niiden proteiinipitoisuutta. Tulevaisuudessa Solein voisi auttaa myös laboratoriossa valmistetun lihan tuottamisessa. [4]



## 5. TULEVAISUUS

Tässä luvussa perehdytään PtX-teknologioiden tulevaisuuteen sekä siihen vaikuttaviin tekijöihin. Tulevaisuuden näkymiä arvioidaan pääasiassa Euroopan näkökulmasta, koska suurin osa tähänastisista PtX-projekteista on sijoittunut Eurooppaan ja siellä etenkin Saksaan [3,7]. Saksan onkin ollut johtava maa PtX-teknologioiden kehittämisessä [3]. PtX-teknologioiden potentiaalia on myös vaikeaa arvioida yhteisesti laajalle alueelle, koska se riippuu muun muassa sääolosuhteista, ja onkin siksi erilainen Euroopan eri maissa. Esimerkiksi Tanskassa ja Pohjois-Saksassa, joissa on paljon tuulivoimaa sekä Itävallassa, jossa on paljon vesivoimaa, voisi esimerkiksi PtH-teknologioilla olla hyvät tulevaisuudennäkymät. [19]

PtX-teknologiat nähdään muutenkin suuressa roolissa tulevaisuuden energijärjestelmässä. Tämä johtuu erityisesti siitä, että PtX-teknologioiden avulla on mahdollista varastoida energiaa pitkäksi ajaksi. [22] Uusiutuvan energian lisääntyessä tulevaisuudessa energian varastointitarve kasvaa, eikä tällä hetkellä PtG-teknologian tarjoamalle pitkäaikaiselle energian varastointikeinolle ole olemassa kilpailijaa [20]. PtG-teknologiat nähdäänkin tulevaisuudessa tärkeässä roolissa etenkin silloin, jos uusiutuvan energian osuus on suuri. On esimerkiksi ennustettu, että jos tulevaisuudessa 80 % energiasta tuotettaisiin uusiutuvilla, olisivat PtG-energiavarastot tärkeämmässä roolissa kuin esimerkiksi patterit. Jos taas vain 50 % energiasta tuotetaan uusiutuvilla, olisi asia kuitenkin vielä toisinpäin. [30]

PtX-teknologiat nähdään tärkeinä tulevaisuudessa myös sen takia, koska niiden avulla on mahdollista tuottaa hiilineutraaleja synteettisiä polttoaineita [22]. PtL-teknologian avulla tuotetut synteettiset polttoaineet ovat tärkeitä tulevaisuudessa, koska liikenteen hiilidioksidipäästöjä täytyy vähentää ja koska koko autokannan vaihtaminen sähköautoiksi veisi liian kauan aikaa [31]. Polttoaineiden vaihtaminen hiilineutraaleiksi olisi siis tehokkaampi ratkaisu.

Koska uusiutuvat energialähteet tuottavat sähköä epätasaisesti, niiden yleistyessä tulevaisuudessa myös ylijäämäenergian määrä lisääntyy [31]. PtX-teknologiat ovat jo teknisesti valmiita hyödyntämään tätä ylimääräistä sähköä, jonka hukkaan meneminen aiheuttaisi siis taloudellisia tappioita [22]. Muun muassa PtH-teknologioiden avulla tätä ylimääräistä sähköä voidaan muuntaa lämmöksi [19]. Myös Power-to-Food-teknologia voi-

daan nähdä potentiaalisena tulevaisuudessa, koska maataloudesta aiheutuu paljon kasvihuonekaasupäästöjä, ja sen avulla on mahdollista eristää ruoantuotanto maataloudesta [4].

Vaikka PtX-teknologiat nähdään tärkeinä tulevaisuudessa juuri ilmastonmuutoksen torjumisen takia, eivät niiden ympäristövaikutukset aina ole vähäpätöisiä. Niihin vaikuttavat muun muassa energialähteen hiilijalanjälki, hiilidioksidin lähde sekä prosessin hyötysuhde. [3] Jos esimerkiksi PtX-teknologioiden tarvitsema energia otetaan sähköverkosta, johon edelleen tuotetaan iso osa sähköstä fossiilisilla energialähteillä, ovat niiden ympäristövaikutukset huomattavasti suurempia kuin pelkästään uusiutuvaa energiaa käytettäessä. Vety- tai kaasuautot, jotka eivät aiheuta suoria päästöjä ilmakehään, voivat jopa aiheuttaa suuremmat ympäristövaikutukset kuin bensiinikäyttöiset polttomoottoriautot, jos vedyn ja metaanin tuottamiseen PtG-teknologialla käytetään sähköverkon sähköä. [2]

Hiilidioksidin talteenotto taas voidaan ajatella ympäristövaikutuksiltaan lähes olemattomaksi, koska jätehiilidioksidia otetaan hyötykäyttöön. Toisaalta kun huomioidaan myös talteenottomenetelmä, kasvavat hiilidioksidin talteenoton ympäristövaikutukset moninkertaisiksi. PtX-teknologioiden avulla on kuitenkin tulevaisuudessa mahdollista vähentää ilmastonmuutoksen vaikutusta, jos käytetään vain uusiutuvaa sähköä sekä parannetaan hiilidioksidin talteenottomenetelmiä. [2] Jotta uusiutuvilla energialähteillä voitaisiin tuottaa tarpeeksi sähköä PtX-teknologioiden käyttöön, täytyy niiden kapasiteettia vielä kuitenkin nostaa huomattavasti [31].

Jotta PtX-teknologiat saataisiin tulevaisuudessa kunnolla markkinoille, täytyy niiden ja etenkin elektrolyysien kustannusten vielä laskea sekä hyötysuhteiden nousta [9]. Veden elektrolyysi on PtX-teknologioiden tärkein osaprosessi, ja onkin väitetty, että PtX-teknologioiden taloudelliset ongelmat voisivat ratketa elektrolyysien hyötysuhteiden parantamisen myötä [22]. Tulevaisuudessa AEL:n ja PEM:n hyötysuhteiden odotetaan nousevan sekä kustannusten laskevan [20]. Esimerkiksi PEM:n kustannusten odotetaan laskevan jopa 50 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoteen 2015 [20,31]. SOEC:n uskotaan myös tulevan pian kaupalliseksi [20].

PtX-teknologioiden tulevaisuuden näkymiin vaikuttavat myös erilaiset säännökset. Niiden avulla voidaan kannustaa PtX-teknologioiden kehittämiseen sekä niiden käyttöönottoon. Esimerkiksi hiilidioksidipäästöoikeuksista täytyisi tehdä sellaisia, että ne kannustaisivat kohti hiilidioksidivapaita tekniikoita. Myös PtX-teknologioiden avulla valmistetut

polttoaineet täytyisi tunnustaa uusiutuviksi polttoaineiksi niin, että niidenkin avulla voitaisiin saavuttaa liikenteen tavoitteet uusiutuvien energialähteiden käytössä. [20] Lisäksi vielä PtX-tekniologioiden verotusta voitaisiin helpottaa muun muassa silloin, kun ne hyödyntävät ylijäämäenergiaa. Tämä olisi perusteltua, koska kun verkkoon tulee liikaa sähköä, voisivat PtX-tekniologiat silloin edistää sen sujuvaa toimintaa. [19]

Säännöksiä on jo alettu muuttamaan PtX-tekniologioille suotuisimmiksi. Esimerkiksi RED:iä (Renewable Energy Directive) on päivitetty vuonna 2018 enemmän PtX-tekniologioita tukevaan suuntaan. Siinä nimittäin mainitaan selkeästi, että uusiutuvilla tuotetun vedyn suoralla ja epäsuoralla käytöllä voitaisiin ylittää tavoitteeseen, jossa vuonna 2030 14 % liikenteestä käyttäisi uusiutuvaa energiaa. [3]

Ihmisten mielikuvat PtX-tekniologioista vaikuttavat myös niiden tulevaisuuteen. Esimerkiksi Saksassa ei ole ollut ongelmia PtX-tekniologioiden pilottihankkeiden sosiaalisessa hyväksymisessä. Energianvarastointi ja -muuntamisteknologiat ovatkin yleisesti paremmin hyväksytyjä kuin sähköverkkojen laajennukset. Ei kuitenkaan pystytä sanomaan, pysyvätkö ihmisten mielikuvat PtX-tekniologioista positiivisina myös tulevaisuudessa, kun uusiutuvan energian kapasiteettia joudutaan kasvattamaan valtavasti niitä varten. [22] PtX-tekniologioiden sosiaalista hyväksymistä voi laskea myös se, etteivät niiden ympäristövaikutukset aina ole täysin vähäpätöisiä kuten edellä on jo käynyt ilmi. PtX-tekniologioiden etuja ja haittoja voi olla myös vaikea ymmärtää ja siksi onkin tärkeää, että eri sidosryhmille tiedotetaan selkeästi PtX-tekniologioiden vaikutuksista. [3] Etenkin poliittisten päättäjien olisi tärkeää ymmärtää PtX-tekniologioiden tulevaisuuden potentiaali [19].

Vaikka PtX-tekniologiat ovat jo teknologisesti kehittyneitä, ja niiden tutkimus-, kehitys- ja demonstraatiohankkeita on ollut useita, ei niille ole siis vielä muodostunut kunnon markkinoita [3]. Jotta PtX-tekniologioille saataisiin kunnon markkinat, täytyisi siis ainakin niiden hintojen vielä laskea. Alhaiset hinnat saavutetaan usein kuitenkin vasta massatuotannolla. Tätä varten PtX-tekniologiat kaipaavat vielä käytännön kokemusta, jota kannattaisi aluksi hankkia alueilta, jonne esimerkiksi PtG-tekniologioiden lisääminen on jo kannattavaa. Tällaisia alueita voisivat olla muun muassa saaret, joilla paljon uusiutuvaa energiaa sekä kalliit varajärjestelmät. [20] Käytännön kokemuksen, hintojen laskun, hyötysuhteiden nousun ja suotuisten säännösten myötä PtX-tekniologiat voisivat siis päästä tulevaisuudessa markkinoille.

## 6. YHTEENVETO

PtX-teknologiat on käsitteellistetty 2000-luvun lopussa. Sen jälkeen niitä on etenkin Saksassa alettu kehittää enemmän, koska niiden avulla on mahdollista auttaa ilmastonmuutoksen torjunnassa. PtX-teknologioiden avulla on nimittäin mahdollista varastoida uusiutuvaa energiaa pitkäaikaisesti sekä tuottaa liikenteeseen hiilineutraaleja polttoaineita. Näillä PtX-teknologioilla tarkoitetaan sellaisia prosessiketjuja, joissa uusiutuvaa sähköä muunnetaan joksikin X:ksi.

Tärkein osaprosessi PtX-teknologioiden prosessiketjuissa on veden elektrolyysi. Sen avulla tuotetaan vetyä hajottamalla vesi vedyksi sekä hapeksi johtamalla siihen sähkövirtaa. On olemassa kolme tärkeää elektrolyysiteknologiaa, jotka eroavat toisistaan elektrolyyteiltään: AEL, PEM ja SOEC. Näistä PEM:ä pidetään kaikkein lupaavimpana PtX-teknologioille, koska se sopii parhaiten yhteen epätasaisesti sähköä tuottavien uusiutuvien energialähteiden kanssa.

Toinen tärkeä osaprosessi on hiilidioksidin talteenotto. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen voimalaitoksista, teollisuuden prosesseista, biogeenisistä lähteistä tai jopa suoraan ilmakehästä. Talteenoton kustannukset riippuvat hiilidioksidilähteen hiilidioksidipitoisuudesta. Talteenotossa voidaan käyttää muun muassa absorptiota, adsorptiota, kryogeenista erotusta, membraaneja tai kiertoprosesseja, kuten CLC:a ja CaL:a. Kun PtX-teknologioiden tarvitsema hiilidioksidi otetaan talteen jostakin yllä mainitusta lähteestä, ei PtX-teknologioista synny uusia hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Todellisuudessa kuitenkin talteenotosta voi syntyä päästöjä.

PtX-teknologioissa X:llä voidaan viitata tuotteeseen tuoteryhmään tai käyttötarkoitukseen. Tuoteryhmiä ovat esimerkiksi lämpö, kaasut, nesteet sekä proteiini. Lämpöä tuotetaan uusiutuvasta sähköstä suoraan lämpöpumppujen tai sähkökattiloiden avulla, ja sitä käytetään pääasiassa kaukolämmössä. Kaasuja taas ovat pääasiassa vety sekä metaani. Vetyä valmistetaan veden elektrolyysin avulla ja metaania metanoinnilla vedystä sekä hiilidioksidista. Molempia voidaan käyttää muun muassa energian varastoisessa, joka on tärkein PtX-teknologioiden tarjoama mahdollisuus.

PtX-teknologioiden avulla tuotetut nesteet ovat liikenteen polttoaineita sekä kemikaaleja. Niitä tuotetaan yleisesti kahdella eri tavalla, jotka ovat FTS ja metanolisynteesi. FTS on jo tunnettu teknologia, jossa synteesikaasusta tuotetaan erilaisia hiilivetyjä. Metanolisynteesi

teesissä taas tuotetaan ensin metanolia, josta sitten jatketaan haluttuihin tuotteisiin. Proteiinia valmistetaan käymisprosessilla vedystä ja hiilidioksidista, ja sitä voidaan käyttää erilaisissa ruoissa nostamassa niiden proteiinipitoisuutta.

PtX-tekniologiolla uskotaan olevan suuri rooli tulevaisuuden energiajärjestelmässä, koska tulevaisuudessa uusiutuvan energian määrää lisätään ja PtX-tekniologioiden avulla on mahdollista varastoida sitä pitkäksi ajaksi. PtX-tekniologioiden avulla voidaan myös hyödyntää uusiutuvien energialähteiden tuottamaa ylijäämäsähköä. PtX-tekniologioille ei kuitenkaan ole vielä muodostunut markkinoita. Jotta ne voisivat muodostua, täytyisi muun muassa PtX-tekniologioiden kustannusten laskea sekä hyötysuhteiden nousta. Myös säännösten täytyisi muuttua PtX-tekniologioille suotuisimmiksi esimerkiksi siten, että hiilidioksidipäästöoikeuksien hinnat nousisivat ja PtX-tekniologioiden avulla tuotetut polttoaineet tunnistettaisiin biopolttoaineiksi.

Vaikka elektrolyysien hintojen odotetaan laskevan tulevaisuudessa ja säännöksissä on jo tapahtunut ensimmäisiä positiivisia muutoksia, ei ole varmaa, milloin PtX-tekniologiat tulevat markkinoille. Jos ne eivät ehdi markkinoille riittävän nopeasti, on riskinä se, ettei uusiutuvan energian osuutta voida nostaa suunnitellusti, koska sitä varten tarvittavaa energianvarastointikapasiteettia ei ole olemassa. Esimerkiksi PtG-tekniologiat nähdään tärkeässä roolissa kuitenkin vasta, kun uusiutuvan energian osuus on suuri. Jos siis uusiutuvan energian osuus ei kasvakaan suureksi, ei PtG-tekniologioiden pitkäaikaiselle energiavarastoille välttämättä ole tarvetta. Ilmastonmuutoksen torjumisen kannalta olisi kuitenkin tärkeää, että ainakin PtG-tekniologiat pääsisivät pian markkinoille niin, että uusiutuvan energian osuutta voitaisiin lisätä. On siis tärkeää, että PtX-tekniologioiden tutkimista ja kehittämistä jatketaan edelleen ja että esimerkiksi poliittisille päättäjille tiedotetaan niiden potentiaalista.

## LÄHTEET

- [1] F. V. Vázquez et al. Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept, *Journal of CO2 Utilization*, 2018, Vol.28, pp.235–246
- [2] J. C. Koj et al. Environmental impacts of power-to-X systems - A review of technological and methodological choices in Life Cycle Assessments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol.112, pp.865–879
- [3] B. Decourt, Weaknesses and drivers for power-to-X diffusion in Europe. Insights from technological innovation system analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, Vol.44, pp.17411–17430
- [4] F. Southey, Solar Foods makes protein out of thin air: 'This is the most environmentally friendly food there is', *Food Navigator*, 2019, Viitattu 1.6.2020, Saatavissa: <https://www.foodnavigator.com/Article/2019/07/15/Solar-Foods-makes-protein-out-of-thin-air-This-is-the-most-environmentally-friendly-food-there-is>
- [5] H. Nevanlinna, Muutamme ilmasto, Karttakeskus, Porvoo, WS Bookwell Oy, 2008
- [6] IEA, CO2 emissions by product and flow (Edition 2019), OECD Publishing, 2020
- [7] Z. Chehade et al. Review and analysis of demonstration projects on power-to-X pathways in the world, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, Vol.44 pp.27637–27655
- [8] A. Godula-Jopek et al. Hydrogen Production : by Electrolysis, Weinheim, Germany, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015
- [9] B. Rego de Vasconcelos and J. Lavoie, Recent Advances in Power-to-X Technology for the Production of Fuels and Chemicals, *Frontiers in chemistry*, 2019, Vol.7, pp.392–415
- [10] O. Schmidt et al. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, Vol.42, pp.30470–30492
- [11] G. Reiter and J. Lindorfer, Evaluating CO2 sources for power-to-gas applications – A case study for Austria, *Journal of CO2 Utilization*, 2015, Vol.10, pp.40–49
- [12] K. Ghaib and F. Ben-Fares, Power-to-Methane: A state-of-the-art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol.81, pp.433–446
- [13] J. Farfan et al. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X, *Journal of Cleaner Production*, 2019, Vol.217, pp.821–835
- [14] M. San Pio et al. Kinetics of CuO/SiO2 and CuO/Al2O3 oxygen carriers for chemical looping combustion, *Chemical Engineering Science*, 2018, Vol.175, pp.56–71

- [15] P. Viebahn et al. The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program – Results of a Multi-Dimensional Analysis, *Energies*, 2019, Vol.12 pp.3443–3465
- [16] G. Schweiger et al. The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems, *Energy*, 2017, Vol.137, pp.661–669
- [17] Motiva, Lämpöä ilmassa – Ilmalämpöpumput, 2012, 16p. Viitattu 1.6.2020, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/7964/Lampoa\\_ilmassa\\_Ilmalampopumput.pdf](https://www.motiva.fi/files/7964/Lampoa_ilmassa_Ilmalampopumput.pdf)
- [18] Motiva, Sähkövaraajat ja -kattilat, verkkosivusto, Viitattu 1.6.2020, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/sahkovaaraajat\\_ja\\_-kattilat](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/sahkovaaraajat_ja_-kattilat)
- [19] H. Yilmaz et al. Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system, *Energy Strategy Reviews*, 2018, Vol.20, pp.6–19
- [20] P. Schulze et al. Power-to-gas in a decarbonized European energy system based on renewable energy sources, 2017, *European Power to Gas, White Paper*, 28p.
- [21] J. Bunne et al. Power-to-X: Between Electricity Storage, e-Production, and Demand Side Management, *Chemie Ingenieur Technik*, 2020, Vol.92, pp.74–84
- [22] C. Schnuelle et al. Socio-technical-economic assessment of power-to-X: Potentials and limitations for an integration into the German energy system, *Energy Research & Social Science*, 2019, Vol.51, pp.187–197
- [23] M. Götz et al. State of the Art and Perspectives of CO<sub>2</sub> Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications, *International Gas Union Research Conference*, Copenhagen, Denmark, 2014, 13p.
- [24] M. Noureldin et al. Optimization and Selection of Reforming Approaches for Syngas Generation from Natural/Shale Gas, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, Vol. 53, pp.1841–1855
- [25] A. Wolf et al. Syngas Production via Reverse Water-Gas Shift Reaction over a Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst: Catalyst Stability, Reaction Kinetics, and Modeling, *Chemical Engineering & Technology*, 2016, Vol.39, pp.1040–1048
- [26] W. Zhang et al. Thermodynamic analysis of the efficiency of high temperature co-electrolysis system for syngas production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, Vol 41, pp.15960–15969
- [27] M. Iglesias et al. Combinations of CO/CO<sub>2</sub> Reactions with Fischer–Tropsch Synthesis, *Catalysis Today*, 2013, Vol.215, pp.194–200
- [28] G. Jiménez-García and R. Maya-Yescas, Differences between Fisher–Tropsch synthesis of either gasoline or diesel based on changes of entropy and free energy, *Fuel*, 2015, Vol.149, pp.184–190
- [29] P. Schmidt et al. Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review, *Chemie Ingenieur Technik*, 2018, Vol. 90, pp.127–140

- [30] A. Belderbos et al. Possible role of power-to-gas in future energy systems, 12th International Conference on the European Energy Market, 2015, Leuven, Belgium, 6p.
- [31] F. Ausfelder and K. Wagemann, Power-to-Fuels: E-Fuels as an Important Option for a Climate-Friendly Mobility of the Future, Chemie Ingenieur Technik, 2020, Vol.92, pp.21–30