

Alex Kanerva

# POWER-TO-GAS ENERGIANVARASTOINNIN KONSEPTINA

**Kandidaatintyö**  
**Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta**  
**Tarkastaja ja ohjaaja: Risto Mikkonen**  
**1/2022**

# TIIVISTELMÄ

Alex Kanerva: Power-to-Gas energianvarastoinnin konseptina  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikka  
Tammikuu 2022

---

Kasvava paine kasvihuonepäästöjen vähentämisestä vaatii ratkaisuja, joista Power-to-Gas teknologiaa pidetään yhtenä lupaavimpana. Tässä työssä tarkastellaan Power-to-Gas teknologiaa: mitä eri aineita teknologialla voidaan valmistaa ja mitä sovellutuksia teknologialle on sekä millaisia teknologiaa hyödyntäviä pilotointihankkeita on olemassa.

Power-to-Gas-teknologialla tarkoitetaan uusiutuvan sähköenergian muuntamista kemiallista energiaa sisältäväksi kaasuksi. Tämän muunnosprosessin olennaisena osana on vesielektrolyysi, jossa sähköenergiaa hyödynnetään veden hajottamiseen vedyksi ja hapeksi. Elektrolyysimenetelmiä ovat alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja kiinteäoksidielektrolyysi. Näistä kehitetyin ja halvin menetelmä on alkalielektrolyysi. Vetyä on mahdollista jatkojalostaa metanaatiolla metaaniksi tai varastoida sellaisenaan. Metanaatio vaatii vedyn lisäksi hiilidioksidin ja sähköenergian lähteen. Hiilidioksidin lähteitä ovat teollisuuden prosessit, sähkövoimalaitokset ja biokaasuvoimalat.

Hiilidioksidin talteenotto kyseisistä lähteistä tapahtuu joko absorptio-, adsorptio-, kalvo- tai kryogeenisellä erotusmenetelmällä, joista kehittynein on absorptiomenetelmä. Hiilidioksidin talteenottoa voidaan luokitella myös sen perusteella, missä pisteessä teollisuuden- tai sähkötuotantovoimalan prosessia talteenotto tapahtuu. Talteenottopisteitä on polttoa edeltävä sekä polton jälkeinen talteenotto ja happipolttu.

Vedystä on myös mahdollista valmistaa ammoniakkaa, jota voidaan varastoida ja käyttää teollisuudessa polttoaineena. Vetyä ja metaania voidaan varastoida kaasuverkkoon ja käyttää polttoaineena liikenteessä sekä teollisuudessa.

Power-to-Gas teknologian yksi tärkeimmistä sovellutuskohteista on kausittainen energian varastointi, sillä Power-to-Gas on ainoa järkevä pitkän aikavälin energianvarastointiteknologia. Teknologiaa voidaan hyödyntää lämmityksessä, teollisuudessa ja liikenteessä.

Power-to-Gas teknologiaan perustuvia pilotointihankkeita on jo vireillä. Ensimmäiset hankkeet syntyivät 1990-luvulla. Saksa on näiden hankkeiden kärkimaa. Jotta Power-to-Gas-teknologiaan perustuvat hankkeet yleistyisivät tulisi elektrolyysiin liittyvien kustannuksen laskea.

Avainsanat: Power-to-Gas, elektrolyysi, metanaatio, hiilidioksidin talteenotto, energiavarasto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. POWER-TO-GAS .....	2
2.1 Power-to-Hydrogen .....	2
2.1.1 Alkalielektrolyysi .....	3
2.1.2 PEM-elektrolyysi .....	4
2.1.3 Kiinteäoksidielektrolyysi .....	5
2.1.4 Elektrolyysimenetelmien vertailu .....	6
2.2 Power-to-Methane .....	10
2.2.1 Metanaatio .....	10
2.2.2 Hiilidioksidin lähteet .....	12
2.2.3 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät .....	13
3. POWER-TO-GAS -KONSEPTIN SOVELLUTUKSET .....	15
3.1 Liikenne .....	15
3.2 Lämmitys .....	16
3.3 Teollisuus .....	16
3.3.1 Teräksen tuotanto .....	17
3.3.2 Ammoniakin tuotanto .....	18
3.4 Vedyn hyödyntäminen sähkö- ja kaasuverkossa .....	19
3.4.1 Polttokennot .....	19
3.4.2 Vedyn integrointi kaasuverkkoon .....	19
4. PILOTOINTIHANKKEET .....	20
4.1 Audi e-gas voimala .....	21
4.2 BioPower2Gas .....	21
5. YHTEENVETO .....	22
LÄHTEET .....	24

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>F</i>	Faradayn vakio [96 485 C/mol]
<i>I</i>	sähkövirta [A]
$\Delta H$	entalpian muutos [J/mol]
<i>t</i>	aika [t]
<i>U</i>	kennojännite [V]
<i>AEL</i>	Alkalielektrolyysi
<i>EU</i>	Euroopan Unioni
<i>PEM</i>	engl. Polymer electrolyte membrane, polymeerikalvo
<i>PtG</i>	Power-to-Gas
<i>PtM</i>	Power-to-Methane

# 1. JOHDANTO

EU:n tavoitteena on päästä ilmastoneutraaliksi vuoteen 2050 mennessä [1]. Tähän on ratkaisuna muun muassa uusiutuvien energianlähteiden käyttö, mutta tulevaisuuden pääasialliset uusiutuvan energian lähteet (aurinko- ja tuulivoima) ovat energiatuotannoltaan vaihtelevia ja ajoittaisia, jolloin sähköntuotanto täytyy tasapainottaa sopivaksi sähköverkon stabiilisuuden näkökulmasta. Tämä vaatii pitkän aikavälin suuria sähköenergian varastoja. [2]

Power-to-Gas (PtG) on yksi tapa lähestyä ongelmaa. PtG:ssä ylimääräinen sähköenergia muutetaan kaasuverkkoon varastoitavaksi kaasuksi. Sähköenergiaa muutetaan elektrolyysin avulla vedyksi, mistä voidaan edelleen metanaatiolla hiilidioksidiksiin yhdistämällä muodostaa synteettistä metaania. [2] Ensimmäiset PtG-projektit syntyivät 1990-luvulla ja projektien määrä on ollut kasvujohteista 2000- ja 2010-lukujen aikana. Projektit perustuvat eri elektrolyysiteknologioiden hyödyntämiseen, ja niitä käsitellään myöhemmissä luvuissa. [3]

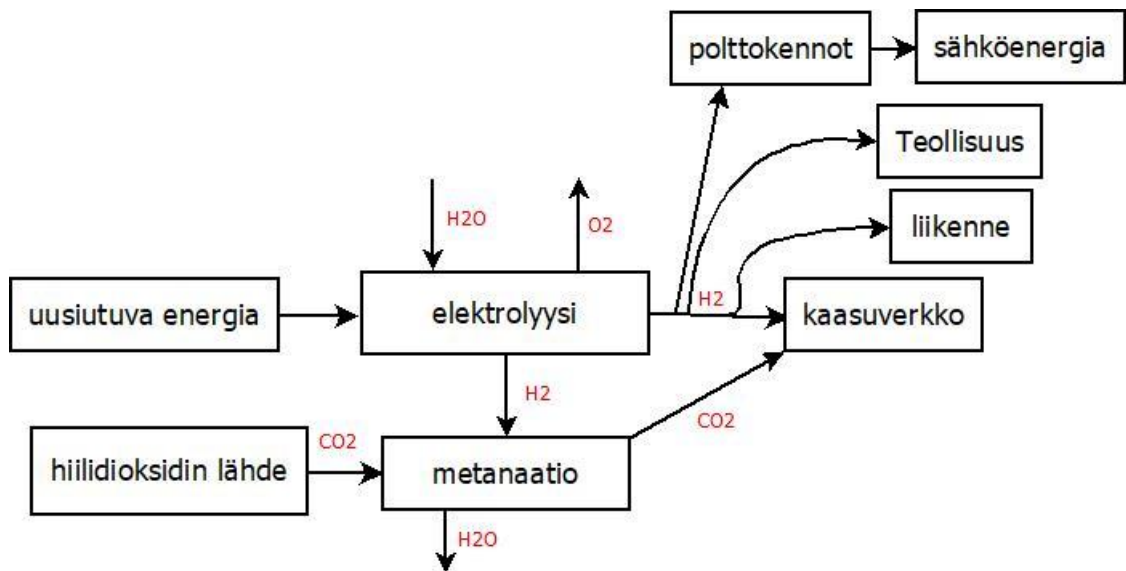
Vedyn tuotanto, esimerkiksi Power-to-Gas -teknologian avulla, on ollut yksi lupaavimmista energiateknologioista nykyaikana. Vedyn voidaan ajatella olevan varastoitava energia, aivan kuten akuissa oleva sähköenergia, eli energia, jota voidaan varastoida sekä siirtää paikasta toiseen. Moni energia-alalla työskentelevä asiantuntija on sitä mieltä, että vety tulee olemaan tulevaisuudessa tärkeä energian varastoiija sekä kuljettaja. [4]

Vety on siitä hyvä energianlähde, että se ei tuota hiilidioksidipäästöjä. Tämän takia sille on mahdollista löytää käyttökohteita esimerkiksi polttokennojen yhteydessä sähköenergian tuottajana. Vetyä on myös mahdollista hyödyntää polttoaineena kulkuneuvoissa, mikä on saanut paljon kannatusta ympäristöystävällisenä polttoainevaihtoehtona. Ongelmana kuitenkin on, että tyypillisissä lämpötiloissa ja paineissa vedyn olomuoto on kaasu, mikä aiheuttaa sen hyödyntämisessä polttoaineena paljon sellaisia haasteita, joita ei aiheudu nestemäisten polttoaineiden käytössä. [4]

Työn tavoitteena on tutustua PtG-teknologiaan ja esitellä jo olemassa olevia pilotointihankkeita sekä tarkastella teknologiaa teknis-taloudellisesta näkökulmasta.

## 2. POWER-TO-GAS

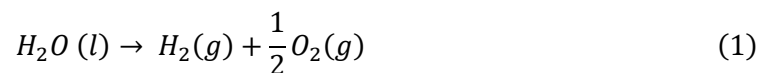
Yleisin tapa hyödyntää PtG -konseptia on muuttaa tasavirran avulla vettä vedyksi. Myös vedyn jalostaminen metaaniksi liittyy PtG -konseptiin, sillä vedyn mutauuttaminen metaaniksi vaatii sähköenergiaa, ja tätä muutosta käsitellään luvussa 2.2. Kuvassa 1 on yleiskuva PtG -konseptin toimintaperiaatteesta.



*Kuva 1. PtG -konseptin toimintaperiaate*

### 2.1 Power-to-Hydrogen

Suurin osa PtG-systeemeistä hyödyntää uusiutuvaa sähköenergiaa vedyksi elektrolyysin avulla, jolloin vesi pilkotaan vedyksi ja hapeksi [5]. Tällöin puhutaan Power-to-Hydrogen-tekniologiasta. Elektrolyysin käyttäessä uusiutuvaa energiaa sen ympäristövaikutus on erittäin matala [3]. Normaaliolosuhteissa (298 K, 1 bar) reaktiota kuvataan seuraavasti:



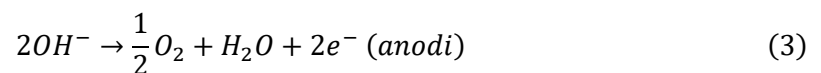
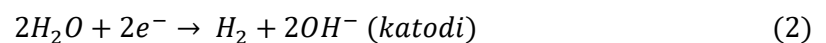
Koska reaktio ei ole spontaani, sen aikaansaamiseksi tarvitaan sähköenergiaa [6]. Elektrolyysimenetelmiä voidaan luokitella käytetyn elektrolyytin mukaan, joka erottaa puolireaktiot katodilla (vedyn muodostuminen) ja anodilla (hapen muodostuminen). Merkittävimmät elektrolyysitekniologiat ovat alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja kiinteäoksidielektrolyysi. [5]

### 2.1.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysi (AEL) on teknologia, jota on käytetty jo 1900-luvulla vedyn megawattiluokan tuotantolaitoksissa, ja se on pääasiain teollisuudessa käytetty elektrolyysimenetelmä. [7] Alkalielektrolyysi on sekä kehitetyin että halvin elektrolyysimenetelmä. Elektrolyysiin perustuvat elektrolyserit voivat tuottaa jopa 700 Nm<sup>3</sup>/h vetyä, jossa N tarkoittaa normaaliolosuhteita, ja niiden käyttöikä on useita kymmeniä tuhansia tunteja, mikä tekee niiden käytöstä kannattavaa. [3]

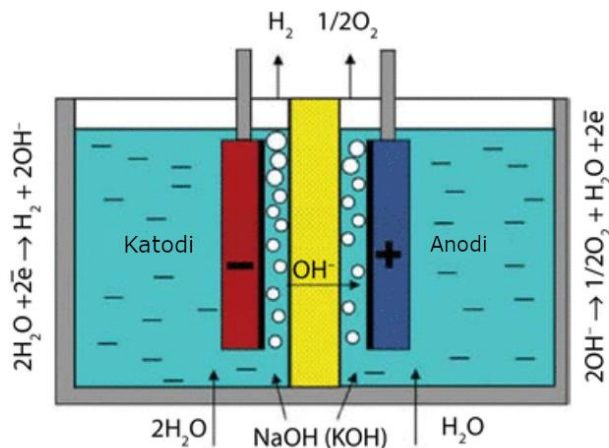
Alkalielektrolyysikennossa elektrodit ovat upotettuna nestemäiseen elektrolyyttiin, joka on yleensä 25–30 % prosenttinen kaliumhydroksidi (KOH) tai natriumhydroksidi (NaOH) liuos [5]. Alkalielektrolyysikennon katodi- ja anodipuoli on erotettu kalvolla, jossa hydroksidi-ionit kulkevat. Tämä kalvo toimii myös lopputuotteiden erottimena. [7] Erottimen ja elektrodien välinen etäisyys on hyvin pieni eikä ylitä muutamaa millimetriä, sillä puolireaktioissa kaasut syntyvät pienemmästä ohmisesta resistanssista johtuen pääasiain elektrodien ja erottimen väliin. Tämä lisää elektrodien yläpään kertyviä kaasukuplia ja niiden kokoa. Kuten kuvasta 2 nähdään, kaasukuplat korvaavat elektrolyytin, josta seuraa elektrolyytin ohmisen resistanssin kasvu. Tämä rajoittaa elektrolyysin virrantiheyden arvoon 200–400 mA/cm<sup>2</sup>. [3]

Kennon elektrodit valmistetaan pääasiain teräksestä, ja reaktiossa liikkuvien varausten kinetiikan parantamiseksi elektrodit ovat päällystetty nikkellillä [3]. Alkalielektrolyysissä tapahtuvat puolireaktiot ovat seuraavia:



Puolireaktioista nähdään, että vettä kuluu katodilla tapahtuvaan puolireaktioon ja anodilla sitä syntyy lopputuotteena. Tästä seuraisi katodipuolen elektrolyyttivirtauksen laimeneminen ja anodipuolen elektrolyyttivirtauksen konsentraatio, jos katodi- ja anodipuolien virtoja ei sekoitettaisi ennen elektrolyysilaitteeseen menemistä. Katodilla tuotettu vetykaasu on yleensä 99,5-99,9 %:tia vetyä kuivauksen jälkeen ja happikaasu n. 99-99,8 %:tia happea. [5]

Reaktioista on myös hyvä huomioida kaksi asiaa: Ensinnäkin kaksi sähkökemiallista reaktiota tapahtuu elektrodin pinnalla, jossa elektrolyytti ja metallinen elektrodi kohtaavat. Toiseksi tuotettu kaasu on suoraan verrannollinen kytkennän yli olevaan virtaan, sillä aina kun neljä elektronia kulkee jännitelähteen yli, syntyy samanaikaisesti happimolekyylit ja kaksi vetymolekyylit.



**Kuva 2.** Alkalielektrolyysikennon kytkentäkaavio, muokattu lähteestä [3]

Kennon tehokkuus riippuu sen virrantiheydestä sekä toimintalämpötilasta. Korkea virrantiheys laskisi pääomaan liittyviä kustannuksia, mutta toisaalta matala virrantiheys laskisi kennon toimintaan liittyviä kustannuksia. Tämän takia alkalielektrolyysi on toiminnassa yleensä pienemmällä kuin  $400\text{--}500\text{ mA/cm}^2$  virrantiheydellä. Elektrolyysiin halutaan korkea toimintalämpötila pienemmän energiankulutuksen vuoksi, mutta noin  $100\text{ °C}$  kohdalla erottimen elinikä sekä elektrolyysin kaasujen puhtaus pienenee. Korkea lämpötila myös lisäisi elektrodien ja kalvon välissä olevien kuplien määrää. [3]

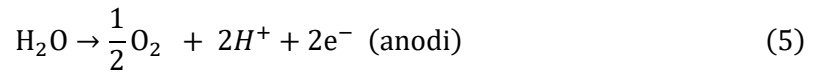
Alkalielektrolyysereitä voidaan hyödyntää  $20\text{--}100\%$  suunnitellusta kapasiteetista ja jopa  $150\%$  lyhyellä aikavälillä, mutta ongelmia on havaittu vaihtelevilla tehonlähteillä. Koska alkalielektrolyyserin uudelleenikäynnistäminen kestää  $30\text{--}60$  minuuttia sen sammumisesta, jatkuva käyttö on suositeltavaa. Elektrolyyserien suurin haitta on, että kennoissa käytetyt elektrolyytit ovat hyvin korrosoituvia, mikä johtaa suuriin ylläpitokustannuksiin, ja koko systeemin uudistus on tarpeen joka  $7\text{--}12$  vuosi. [6]

### 2.1.2 PEM-elektrolyysi

PEM-elektrolyysissä protoninvaihtokalvo (yleensä Nafion kalvo [5]) erottaa elektrolyysikennon puolikennot toisistaan, ja protonit pääsevät liikkumaan kalvon läpi anodilta katodille. Kalvo myös separoi lopputuotteet toisistaan estäen rekombinaation takaisin vedeksi. Kalvon molemmat puolet peitetään kahdella katalyyttisellä kerroksella ja nämä kerrokset ovat kytketty tasavirtaan mahdollistaen elektrolyysireaktion. [7] Elektrodit ovat yleensä kiinni kalvossa [5]. Kuvassa 3 on esitetty PEM-elektrolyysikennon kytkentäkaavio.

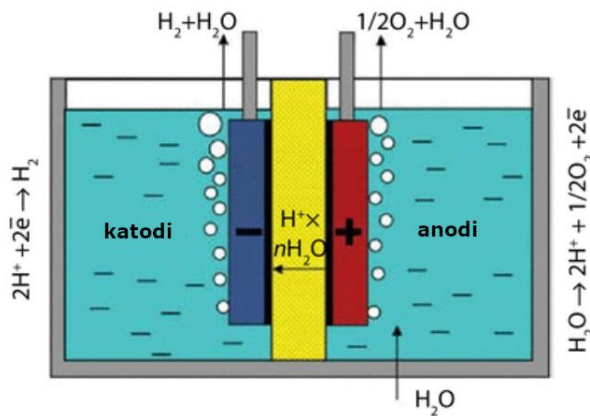
PEM-elektrolyysissä tapahtuvat puolireaktiot ovat seuraavia:





Anodilla vesi siis hajoaa hapeksi ja protoneiksi ja nämä protonit kulkevat protoninvaihtokalvoa pitkin katodille muodostaen vetyä [7]. Elektrolyysissä protoninvaihtokalvo on happamasti korrosoiva, minkä vuoksi jalometalleja käytetään katalyytteinä, anodilla iridiumia ja katodilla platinaa [5].

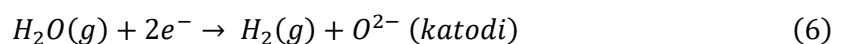
Koska polymeerikalvo päästää katodi ja anodipuolien elektrolyyttejä sekoittumaan erittäin vähän, tuotettu vety on puhtaampaa kuin alkalielektrolyysissä, tyypillisesti vedyn kuivauksen jälkeen yli 99,99%:sta vetykaasua. [5] Alkali- ja PEM-elektrolyysissä hyötysuhde on yleensä 75-85 %:n luokkaa. [3]

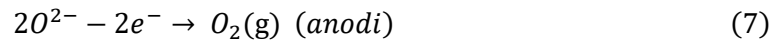


**Kuva 3.** PEM-elektrolyysikennon kytkentäkaavio, muokattu lähteestä [3]

### 2.1.3 Kiinteäoksidielektrolyysi

Kiinteäoksidielektrolyysi on uusin elektrolyysiteknologia ja se on vielä laboratoriovaiheessa [8]. Kiinteäoksidielektrolyysilaitteisto koostuu kiinteäoksidikennopinoista. Kiinteäoksidielektrolyysikennon koostuu keraamisesta kalvosta, joka toimii elektrolyytinä, ja elektrodeista (katodi ja anodi), jotka ovat kalvon molemmilla puolilla. Kiinteäoksidielektrolyysikennon kytkentäkaavio on kuvassa 4. Pinossa on myös levyjä, jotka kuljettavat sähköä, jotta sähkö jakautuisi tasaisesti kennoille, ja levyt toimivat myös vierekkäisten kennojen elektrodien erottajana. Katodipuolen kaasukehä koostuu vesivetykaasuseoksesta ja anodipuolen happikaasusta. [7] Kiinteäoksidielektrolyysikennossa tapahtuvia puolireaktiota kuvataan seuraavasti:

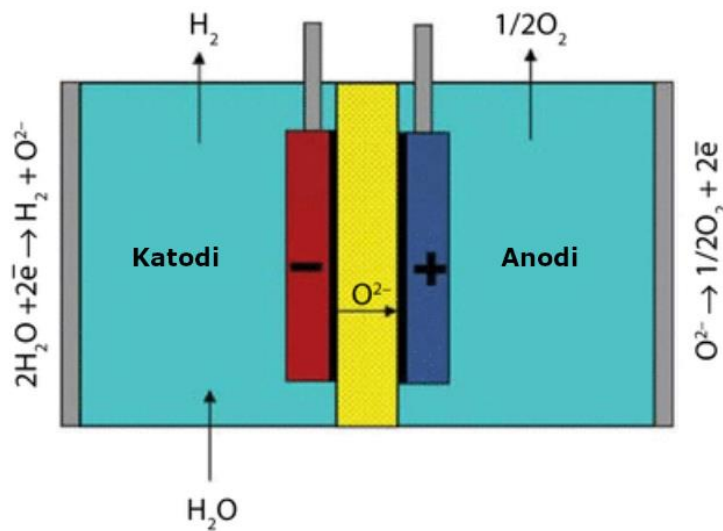




Kuten puolireaktioista nähdään, katodilla vesi hajoaa vedyksi ja oksidi-ioneiksi. Oksidi-ionit siirtyvät keraamista kalvoa pitkin katodilta anodille, jossa ioneista muodostuu happikaasua. [3]

Tämä elektrolyysiteknologia toimii korkeilla lämpötiloilla ( $\approx 700\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ ) [11], ja täten vähentää kennon tasapainotilassa olevaa jännitettä vähentäen sähkökulutusta. Tämä johtuu siitä, että korkeilla lämpötiloilla osa sähköenergiasta, joka vaaditaan vesimolekyylin erotukseen, voidaan korvata lämpöenergialla ja höyryn erottaminen vaatii vähemmän energiaa kuin nestemäisen veden. [7] Korkean lämpötilan hyödyntäminen on merkittävin kiinteäoksidielektrolyysisysteemien etu [8].

Kiinteäoksidielektrolyysisysteemien suurimmat haasteet ovat nopea materiaalien kuluvuus ja pitkäaikaisen käytön stabiilisuuden rajoittuvuus. [3]



**Kuva 4.** Kiinteäoksidielektrolyysikennon kytkentäkaavio, muokattu lähteestä [3]

## 2.1.4 Elektrolyysimenetelmien vertailu

Jotta erityyppisiä elektrolyysereitä voitaisiin vertailla, tarvitsee määrittää niiden hyötysuhde. Hyötysuhde lasketaan selvittämällä elektrolyysiin tuotu energia ja elektrolyysin tuottama vetymäärä. [7]

Elektrolyysiin tuotu energia lasketaan seuraavalla kaavalla

$$E_{el}(J) = U * I * t = n_{kenno} * U_{kenno} * I * t, \quad (8)$$

jossa  $U$  on kennojännite (V),  $I$  on virta (A) ja  $t$  on elektrolyysiin kuluva aika sekunneissa.  $n_{kenno}$  on kennojen lukumäärä elektrolyyserissä (sarjaankytkentä) ja  $U_{kenno}$  on kennon keskimääräinen jännite. [7]

Vedyn ja hapen tuotanto ovat suoraan verrannollisia kennon yli olevaan virtaan ja elektrolyysiin kuluneeseen aikaan ja vedyn tuotanto voidaan laskea kaavalla

$$n_{H_2}(mol) = \frac{I * n_{cell}}{2 * F} * t, \quad (9)$$

jossa  $F$  on Faradayn vakio  $96485 C/mol$ . [7]

Normaaliolosuhteissa (273 K, 100 kPa) vedyn palamisesta, josta seuraa vesihöyryn muodostuminen, vedyn entalpian muutos on  $\Delta H = 242 kJmol^{-1}$ . Nestemäisen veden muodostumisesta seuraava lauhdeveteen sitoutunut lämpö täytyy lisätä syntyvään energiaan, jolloin kokonaisenergia on  $286 kJmol^{-1}$ . Ensimmäiseksi mainittua arvoa kutsutaan alemmaksi lämpöarvoksi ja jälkimmäistä yleemmäksi lämpöarvoksi. [7]

$$E_{H_2-H_2O(vap)}(J) = \frac{I * n_{cell}}{2F} * t * 242\ 000 \quad (10)$$

$$E_{H_2-H_2O(l)}(J) = \frac{I * n_{cell}}{2F} * t * 286\ 000 \quad (11)$$

Nyt voidaan laskea elektrolyyserin tehokkuus  $\varepsilon$  jakamalla tuotetun vedyn energia elektrolyyseriin tuodulla sähköenergialla seuraavilla kaavoilla

$$\varepsilon_{H_2-H_2O(vap)} = \frac{\frac{I * n_{cell}}{2F} * t * 242\ 000}{n_{kenno} * U_{kenno} * I * t} = \frac{242\ 000}{2F * U_{kenno}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{H_2-H_2O(l)} = \frac{286\ 000}{2F * U_{kenno}}. [7] \quad (13)$$

Voidaan huomata, että tehokkuus ei riipu tuotetusta vedystä, vaan virrantiheydestä, lämpötilasta ja paineesta. Tämän takia tehokkuutta ei pidetäärkevimpänä tapana vertailla eri elektrolyyserien suorituskykyä. Elektrolyysien suorituskykyä yleensä verrataan vedyn tuotantomäärien (yksikkönä  $Nm^3H_2h^{-1}$ ) ja elektrolyysien toimintaan kuluville energioille normaaleissa tuotanto-olosuhteissa (lämpötila, paine ja virrantiheys). [7]

Elektrolyysikennoja voidaan vertailla myös niiden virrantiheyden perusteella. Virrallinen hyötysuhde määritellään seuraavasti

$$n_F = \frac{V_{todellinen}}{V_{teoreettinen}}, \quad (14)$$

jossa  $V_{todellinen}$  on elektrolyysiprosessissa tuotettu kaasun määrä tietyssä ajassa ja  $V_{teoreettinen}$  on teoreettinen maksimimäärä, mitä vastaavassa ajassa voidaan tuottaa kaasua. [3]

Tärkeimmät elektrolyysimenetelmien ominaisuudet on listattu taulukkoon 1. Alkalielektrolyysi on kehittynein teknologia, ja sillä on matalimmat investointi- ja ylläpitokustannukset. Useat alkalielektrolyysikennostojen valmistajat tarjoavat jopa 6 MW kennostoja. PEM-elektrolyysimenetelmän kehitys on perustunut vahvasti joustavan energiavaraston sovellutuksiin. PEM-elektrolyysi alkalielektrolyysiin verrattuna tarjoaa kompaktimman rakenteen, paineistetun käytön, enemmän joustavuutta ja lyhyemmät käynnistysajat. [5] Kiinteäoksidikennon edut ovat halvat katalyytit, puhtaat lopputuotteet ja alhaisemmat energiavaatimukset [9].

Elektrolyysereilla tuotetun kemiallisen energian hinnan keskiarvon on arvioitu laskevan merkittävästi vuodesta 2017 vuoteen 2050 mennessä. Alkalielektrolyysereiden keskimääräinen hinta laskee arvosta 1300 €/kW arvoon 500 €/kW, PEM-elektrolyysereiden arvosta 1900 €/kW arvoon 500 €/kW ja korkean lämpötilan elektrolyysereiden (kiinteäoksidielektrolyyseri) arvosta 3570 €/kW arvoon 535 €/kW. Arvioissa täytyy kuitenkin huomioida, se että esimerkiksi ilmastopoliittiset päätökset voivat häiritä hinnan kehitystä. [10]

**Taulukko 1.** Eri elektrolyysimenetelmien vertailu, muokattu lähteistä [2, 5]

	<b>Alkali- elektrolyysi</b>	<b>PEM-elektrolyysi</b>	<b>Kiinteäoksidielektro- lyysi</b>
<b>Kehitysvaihe</b>	Kaupallinen	Kaupallinen	Laboratorio
<b>Vedyn tuotanto (m<sup>3</sup>/h) normaaliolosuhteissa</b>	<760 = 2,7 MW energiaa	Jopa 450 = 1,6 MW energiaa	-
<b>Elektrolyytti</b>	Alkali seos	Kiinteäpolymeerika- lvo	ZrO <sub>2</sub> keraamisesti dopattu Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :lla
<b>Varauksen kuljettaja</b>	OH <sup>-</sup>	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>
<b>Kennon lämpötila (°C)</b>	40–90	20–100	800–1000
<b>Kennoston nimellishyötysuhde (LVH, %)</b>	63–71	60–68	lähes 100
<b>Systeemin nimellishyötysuhde (%)</b>	51–60	46–60	76–81
<b>Edut</b>	Saatavilla suuriin voimaloihin, hinta, elinikä	Ei korrosiivisia aineita, korkea tehotiheys, korkea paine	Korkea sähköinen tehokkuus, mahdollista integroida hukkalämmön hyödyntämiseen
<b>Haitat</b>	Matala virrantietyys, ylläpitokustannu- kset, korrosiivinen	Kallis ja nopea kuluminen	Rajallinen kennojen pitkän aikavälin stabiilisuus, ei sovellu muuttuviin olosuhteisiin, kallis
<b>Investointointikustannu- kset (€/kW)</b>	800–1500	1400–2100	> 2000
<b>Ylläpitokustannukset (% investointi- kustannuksista vuodessa)</b>	2–3 %	3–5 %	N/A*

\* Ei varmuutta, ei vielä kaupallisessa käytössä

## 2.2 Power-to-Methane

Sähköenergiaa voidaan myös muuttaa metaaniksi vedystä ja hiilidioksidista (Power-to-Methane). Hiilidioksidia ei tosin yleensä löydy puhtaana kaasuna tai sellaisissa kaasuissa, jotka sopisivat PtM-voimaloihin, joten PtM-tekniologiaa käytetäänkin usein vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. [11] On hyvä huomioida, että metaanin käytössä energianlähteenä hiilidioksidia vapautuu uudelleen siten, että nettovaikutus on nolla [3].

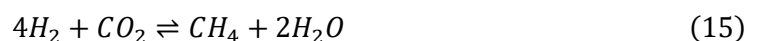
Sähköenergian muuttamista metaaniksi helpottaa se, että monella alueella on vakiintuneita fossiilisten polttoaineiden varastointi- ja kuljetussysteemeitä, joihin voidaan injektoida metaania [12], jolloin se sekoittuu maakaasuun. Maakaasun maailmanlaajuinen varastointikapasiteetti viimeisen viiden vuoden aikana keskimäärin noin 36000 TWh ja tuuli- sekä aurinkovoiman globaali energiantuotanto yhteensä 2413 TWh vuonna 2020 [13, 14].

PtM voimala koostuu elektrolyyseristä, hiilidioksidia keräävästä laitteesta, jos sitä ei ole saatavilla puhtaana tai sopivassa seoksessa, ja metanaatiolaitteistosta. Silloin kuin käytettävissä on ylimääräistä sähköenergiaa, voimala tuottaa elektrolyysin avulla vetyä. Tämän jälkeen saatavilla oleva hiilidioksidi ja vety muutetaan metanaatiolaitteistossa kaasuseokseksi, joka sisältää metaania ja vettä. [11]

### 2.2.1 Metanaatio

Hiilidioksidin metanointiprosessissa vety ja hiilidioksidi muutetaan metaaniksi ja vedeksi. Tämä prosessi voidaan toteuttaa joko kemiallisesti (Sabatier reaktio) tai biologisesti. [15]

Metanaatiota voidaan kuvata seuraavasti:

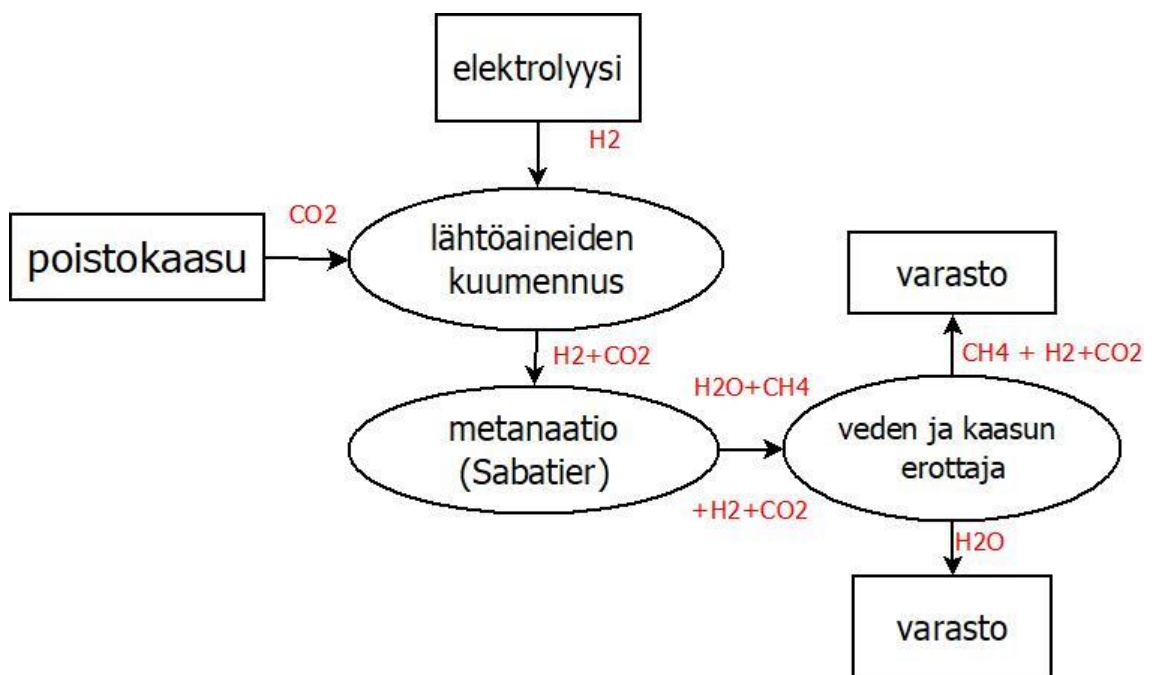


Muunnoksessa matalan kemiallisen energiantiheyden (energian määrä tilavuuden suhteen, MJ/L) vety muuttuu korkean kemiallisen energiantiheyden metaaniksi. Muunnoksen tehokkuus on 83 %, joka liittyy reaktion alempaan lämpöarvoon normaaliolosuhteissa, jossa loput 17 % siis vapautuu lämpönä. [11]

Reaktio on toisaalta myös eksotermisen eli lämpöä vapauttava, joten reaktio on termodynaamisesti suotuisa lopputuotteille silloin, kun paine on korkea ja lämpötila matala. Toisaalta korkean toimintapaineen ylläpitäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa ja matala lämpötila vaatisi katalyyttejä, joka nopeuttaisi reaktiota merkittävästi. [11]

Koska hiilidioksidin hapetus-pelkistysreaktio metaaniksi on kahdeksan elektronin reaktio, reaktioon tarvittava käynnistysenergia on korkea. Tämän vuoksi reaktion toteuttamiseksi tarvitaan katalyyttejä, jotka nopeuttavat reaktiota ja madaltavat reaktion tapahtumiseen vaadittavaa energiaa. [11]

Kemiallinen metanaatio perustuu kiinteiden metallisten katalyyttien käyttöön kiinnitettynä metallioksideihin ja yleisin käytetty katalyytti/metallioksidi yhdistelmä on Ni/ $Al_2O_3$  (Nikkeli/Alumiinioksidi). Kemiallinen metanaatio on nykyisin yleisin tapa tuottaa metaania. Tyypillinen toimintapaine on välillä 1–100 bar ja tyypillinen toimintalämpötila välillä 200–550 °C. [16] Kemiallista metanaatioprosessia on havainnollistettu kuvassa 5.



**Kuva 5.** Metaanin kemiallinen tuotantoprosessi, muokattu lähteestä [17]

Nikkelipohjaisia katalyyttejä käyttäessä reaktion sivutuotteena saattaa syntyä häkää, joka likaa käytetyn katalyytin pinnan ja huokoset. Hään syntymistä voidaan vaimentaa lisäämällä painetta tai alentamalla lämpötilaa. [11]

Biologisessa metanaatiossa reaktiota katalysoidaan metanogeenillä eli metaania tuottavilla bakteereilla. Vety ja metanogeenit lisätään biokaasun mädättämöön, jossa hydrolysaation jälkeen (mädätysksen osaprosessi) vedystä ja biokaasusta muodostuneesta hiilidioksidista muodostuu reaktioyhtälön mukaisesti metaania. Biologista metanaatiota voi toteuttaa myös ulkoisessa bioreaktorissa, mutta metanogeenien ja vedyn lisäksi reaktoriin täytyy lisätä myös hiilidioksidia. [23] Biologista metanaatiota tapahtuu tyypillisesti ilmakehän paineessa ja lämpötilassa 20–70 °C [16].

PtM-voimaloden tehonsyöttöön liittyvien kustannusten arvioidaan laskevan merkittävästi vuodesta 2017 vuoteen 2050 menessä, eivätkä ne sisällä elektrolyysereiden kustannuksia. Kemiallisen metanaation kustannusten arvioitiin laskevan arvosta 800 €/kW arvoon 130–400 €/kW. Biologisen metanaation kustannukset laskevat arvosta 1200 €/kW arvoon 300 €/kW. Tulevaisuudessa siis metanaatioon ja vedyn tuotantoon liittyvät kustannukset ovat suunnilleen yhtä suuria, jos kustannukset lasketaan vastaavasti. [10]

## 2.2.2 Hiilidioksidin lähteet

Hiilidioksidia, jota voidaan hyödyntää PtM:ssä esiintyy muun muassa biomassan, sähkövoimalaitoksien ja teollisuuden prosesseissa sekä ulkoilmassa. Hiilidioksidin lähteen houkuttelevuus talteenottoon riippuu sen tilavuudesta, tiheydestä, osapaineesta ja etäisyydestä sopivaan hiilidioksidivarastoon. [18] Taulukkoon 2 on listattu prosesseja ja niiden ominaisuuksia, joissa hiilidioksidin talteenottoa on mahdollista hyödyntää.

**Taulukko 2.** *Hiilidioksidin talteenottomenetelmiä ja niissä esiintyvien kaasujen ominaisuuksia, muokattu lähteestä [18]*

Lähde	Hiilidioksidipitoisuus (%) koko kaasun tilavuudesta	Koko kaasuvirran paine (MPa)	Hiilidioksidin osapaine (MPa)
Ammoniakin tuotanto	18	2,8	0,5
Etyleenin oksidi	8	2,5	0,2
Vedyn tuotanto	15–20	2,2–2,7	0,3–0,5
Metanolin tuotanto	10	2,7	0,27
Maakaasun prosessointi	2–65	0,9–8	0,05–4,4

Biomassan prosesseista syntyvää biokaasua voidaan käyttää metaanintuotossa, kun siitä poistetaan ensin haitalliset yhdisteet [19]. Biokaasun hienontamislaitokset ja bioetanolin tuotantolaitokset synnyttävät sellaista hiilidioksidikaasua, mitä voi suoraan hyödyntää metaanin tuotannossa [11].



Sähköntuotannon ja teollisuuden prosesseissa syntyvät hiilidioksidipäästöt muodostavat yli kolmasosan globaalista hiilidioksidipäästöjen määrästä [11, katso 77]. Vaikka päästöjen hyödyntäminen PtM-prosesseissa on mahdollista, sen taloudellinen järkevyys riippuu muodostuneen hiilidioksidikaasun osapaineesta [11]. Käytännössä kaasun osapaine tässä tapauksessa tarkoittaa koko kaasuvirran tilavuutta kerrottuna sen hiilidioksidin mooliosuudella kaasussa. Mitä pienempi osapaine, sitä vaativammat olosuhteet hiilidioksidin talteenotto vaatii [18].

Korkeaosapaineista hiilidioksidikaasua on taloudellisesti järkevää hyödyntää [11] ja siksi hiilidioksidin talteenotolla on merkittävä rooli prosesseissa, kuten sementin ja teräksen tuotannossa sekä kemiallisissa prosesseissa, joissa lopputuotteena syntyy hiilidioksidia [20.]. Ulkoilmassa olevan hiilidioksidikaasun hyödyntäminen on myös mahdollista, eikä tällöin hiilidioksidia tarvitsisi kuljettaa PtM-voimalaan, mutta ulkoilman osapaine (0,04 % hiilidioksidipitoisuus) on niin pieni, ettei sen hyödyntäminen ole näillä näkymin järkevää [11].

Hiilidioksidipäästöjen talteenotto sähköntuotannon ja teollisuuden prosesseista ei kuitenkaan välttämättä riitä saavuttamaan PtM-teknologian vaatimaa hiilidioksidikaasun määrää. Ongelmaa on yritetty muun muassa ratkaista PtG -konseptin avulla hybridisoimalla se kemiallisen palamisprosessin tai hapenpolton kanssa muodostaen sisäkkäisen silmukan, jossa elektrolyysissä tuotettu happi varastoidaan metaanin hapenpolttoa varten ja metaanin hapenpoltosta syntyvä hiilidioksidi varastoidaan tulevaa metaanintuottoa varten. Tämä tosin vaatii väliaikaiset varastot myös hapelle ja hiilidioksidille metaanin varastoinnin lisäksi. [21]

### **2.2.3 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät**

Hiilidioksidia on mahdollista erottaa muusta kaasusta usealla eri menetelmällä. Menetelmä, jossa hiilidioksidia talteenottavaa nestettä käytetään hiilidioksidin absorptioon, kutsutaan absorptiomenetelmäksi. Absorpteja on sekä kemiallisia, että fysikaalisia. Kemiallisia absorpteja on muun muassa amiinit, nestemäinen ammoniakki sekä natriumkarbonatti. Fysikaalisia absorpteja ovat alkoholit ja muut hapetetut yhdisteet. [11]

Toinen menetelmä, jota pidetään yhtenä lupaavimmista hiilidioksidin talteenottomenetelmistä, on adsorptio. Menetelmässä kiinteää adsorbenttia eli sitovaa ainetta käytetään talteenottamaan hiilidioksidia. Kaasu puristetaan kasaan ja kuljetetaan säiliöön, jossa hiilidioksidi sitoutuu adsorbentin pintaan. Kun pintaan on kertynyt

kylläisesti hiilidioksidia, se saadaan adsorbentista painetta laskemalla ja lämmityksellä. [11]

Hiilidioksidia voidaan ottaa myös talteen menetelmällä, mikä perustuu kalvoon, jonka läpi pääsee tietyn kokoisia kaasuyhdisteitä. Tämän menetelmän toimivuus perustuu kalvon eri puolten väliseen paine-eroon, joka pakottaa hiilidioksidipitoisen kaasun kalvon eri puolelle muusta kaasuseoksesta. Viimeinen mainittava menetelmä on kryogeeninen erotus, jossa kaasuseos paineistetaan ja jäädytetään alle sen kiehumispisteen [17], jolloin tiivistyminen erottaa hiilidioksidikylläisen kaasun kaasuseoksesta. [11]

Näistä menetelmistä kemiallista absorptiota hyödynnetään eniten matalissa osapaineissa (3–20 %) ja se on myös kehitetyn talteenottomenetelmä. Fysikaalinen absorptio on menetelmänä kallis, koska se vaatii korkean paineen, eikä menetelmä sovellu matalan osapaineen hiilidioksidin talteenottoon. Adsorption ongelmana on taas se, että sitoutuneet hiilidioksidimolekyylit jäävät adsorbentin pintaan, eikä valmiiseen seokseen kuten absorptiossa, joten menetelmän tehokkuus on matala. Fysikaalisten adsorbenttien tapauksessa menetelmä on matalan hiilidioksidin osapaineen kaasuseoksiksille huono, koska siinä eri kaasujen adsorptioselektiivisyys on alhainen. Kalvoihin perustuvat hiilidioksidin talteenotto menetelmät ovat vielä teoreettisia, mutta kalvomenetelmällä on kuitenkin monia kaupallisia sovellutuksia sen muissa käyttökohteissa, kuten myös kryogeenisellä erottamisella. [11]

Hiilidioksidin talteenottoa voidaan myös luokitella kolmeen eri pisteeseen sen perusteella, missä vaiheessa prosessia hiilidioksidia otetaan talteen teollisuuden ja sähköntuotannon voimaloissa. Polttoa edeltävässä talteenotossa pääasiallinen polttoaine prosessoidaan reaktorissa, jossa polttoaineesta tuotetaan hiilidioksidikaasua sekä vetyä, jota käytetään polttoaineena. Polton jälkeisessä talteenotossa energianlähteen (hiili, maakaasu, öljy tai biomassa) poltossa syntyvästä savukaasusta erotetaan hiilidioksidi. Hapenpoltossa palaminen tapahtuu hapen avulla, jolloin syntyy savukaasua, joka koostuu pääosin vedestä ja hiilidioksidista, jota on mahdollista talteenottaa. Tästä prosessista hiilidioksidin talteenotto on vielä kehitysvaiheessa. On muitakin teollisia prosesseja, kuten matalien päästöjen polttoaineiden tuotanto, jotka hyödyntävät jotakin talteenottomenetelmää. [18]

### 3. POWER-TO-GAS -KONSEPTIN SOVELLUTUKSET

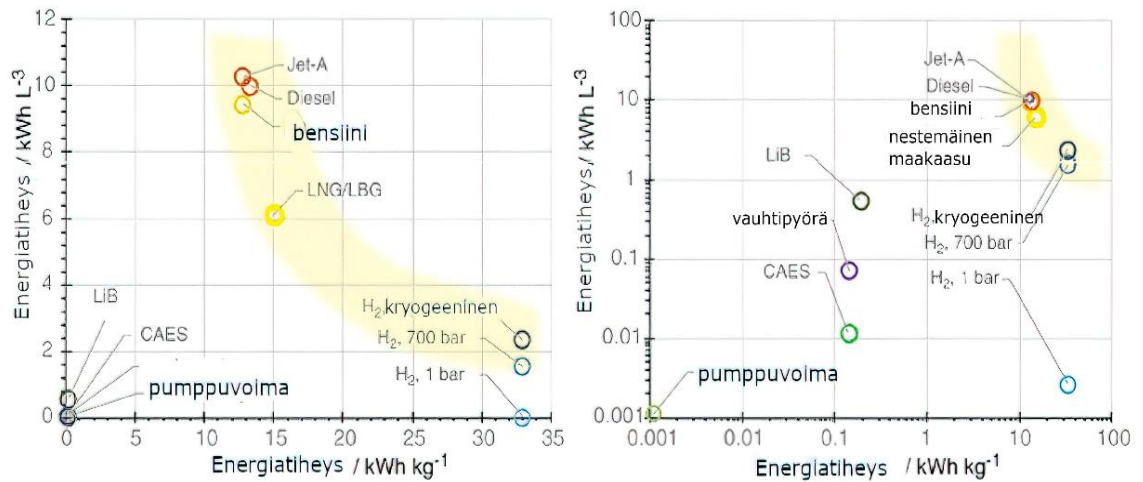
Syitä hyödyntää PtG-teknologioita on monia, mutta ne kytkeytyvät kuitenkin siihen, että mahdollisimman suurta osaa eri uusiutuvista energialähteistä pystyisi hyödyntämään eri energiasektoreilla.

Yksi tärkeimmistä käyttökohteista on kausittainen energian varastointi muuttamalla uusiutuva energia kemialliseksi energiaksi, ja toisaalta toisesta energialähteestä voi olla hyötyä sähköenergiajärjestelmässä. [22] Power-to-gas on ainoa kausittainen energianvarastointiratkaisu. Toinen varastointiratkaisu olisi pumppuvoima, mutta sen ongelmana on sen geologiset haasteet sekä sen globaali potentiaalinen energianvarastointikapasiteetti. Vedyn energiatiheys on enemmän kuin 250-kertainen verrattuna pumppuvoimaan, ( $190 \text{ kWh/m}^3$  vs.  $0,7 \text{ kWh/m}^3$ ). Globaalit energianvarastointivaatimukset olisivat vain 2 % globaalista vuosittaisesta maakaasun tuotannosta energiana. [23]

PtG-teknologiaan perustuvien polttoaineiden tuotanto esimerkiksi logistiikan ja teollisuuden aloille sekä kotitalouksiin ja kemikaalien tuotantoon ovat esimerkkejä teknologian sovellutuksista. Teknologian hybridisointi jo olemassa oleviin systeemeihin on siis yksi mahdollinen vaihtoehto. [22]

#### 3.1 Liikennesektori

Kevyen liikenteen kulkuneuvojen määrän ennustetaan lisääntyvän maailmanlaajuisesti yhdestä miljardista kahteen ja puoleen miljardiin vuoteen 2050 mennessä. Liikenteen ala on yksi niistä aloista, joissa vetyyn varastoitunutta energiaa voidaan hyödyntää. Liikenne vaatii energianvarastointisysteemejä, joissa on suuri energiatiheys massa- ja tilavuuteen nähden. Nestemäinen vety tarjoaa eniten energiaa massaansa nähden, mutta hiilivetyihin perustuvat energiavarastot, kuten diesel ja bensiini, tarjoavat parhaan energiatiheden tilavuuteen nähden. Vedystä jatkojalostettu metaani on näistä vaihtoehtoista kompromissi, sillä sen energiatiheys massa- ja tilavuuteen nähden ovat suotuisia liikennesektorilla. Kuvassa 6 on esitetty eri polttoaineiden energiatihedksiä massa- ja tilavuuteen nähden. [24]



**Kuva 6.** Energiateiheyksiä massa- ja tilavuuteen nähden sekä lineaarisella että logaritmisella asteikolla, muokattu lähteestä [4]

Vety, biopolttoaineet ja sähköautot ovat kolme matalien hiilidioksidipäästöjen vaihtoehtoa. Vedyn etu näiden vaihtoehtojen välillä on se, että sillä ei ole biopolttoaineiden maakäyttöön ja ilmanlaatuun vaikuttavia haittavaikutuksia eikä sähköautojen matkan pituuden rajoittuvuuksia ja pitkiä latausaikoja. Teknologian kehityksen suhteen sähköautot ovat kuitenkin huomattavasti edellä muita mainittuja vaihtoehtoja matalien hintojen ja valmiimman infrastruktuurin vuoksi. [24]

### 3.2 Lämmityssektori

Lämmitys ja valaistus muodostavat noin 60–80 %:a koko energiankulutuksesta Euroopan teollisuus- ja asumisalueilla Euroopassa. Lämmityssektorin hiilestä vapautuminen on kuitenkin monessa maanosassa haasteellista, sillä se on monella lauhkealla alueella suurin energiankuluttaja. Näillä alueilla lämmitysvaatimukset vaihtelevat merkittävästi, päivittäin ja vuodenoittain. Energiavaatimuksiin fossiiliset polttoaineet tarjoavat vaadittua joustavuutta. Erityisesti talvet vaikeuttavat matalapäästöisen lämmityksen saavuttamista, sillä energiavaatimukset ovat niin korkealla verrattuna muuhun kuin lämmityksen kuluvaan energiaan. [24]

### 3.3 Teollisuus

Teollisuudessa on paljon sektoreita, joiden aiheuttamia päästöjä on vaikea vähentää. Nämä sektorit vaativat paljon energiaa, mutta toisaalta niitä on myös vaikeaa sähköistää. Näistä sektoreista esimerkkinä ovat kemialliset ja polttoaineiden jalostussektorit, joissa

vetyä käytetään kemikaalien, kuten ammoniakkin ja metaanin tuotannossa. Euroopassa käytetään vedystä jopa 90 % näiden kemikaalien tuotantoon sekä öljyn jalostukseen, joista aiheutuu 41 % koko Euroopan päästöistä.

### 3.3.1 Teräksen tuotanto

Terästeollisuuden osuus maailman hiilidioksidipäästöistä on yli 6 %. Kiinassa terästeollisuuden osuus kaikista maan hiilidioksidipäästöistä on yli 15 %, ja yli 90 % kaikesta raakateräksestä tuotetaan masuuneilla, joiden pääasiallinen energianlähde on hiili. Teräksen kysyntä on valtavaa ja masuunit ovat taloudellinen vaihtoehto, joten hiili pysyy Kiinassa pääasiallisena energianlähteenä raakaraudan tuotannossa. Masuuneihin perustuva raudantuotanto on menetelmänä muutenkin todella pitkälle kehitetty, eikä käytännössä päästöjä tai energiankulutusta voida enää merkittävästi vähentää. Tämän johdosta tulevaisuudessa täytyy kehittää vähäpäästöisempiä teknologioita teräksen tuotantoon. [25]

Teknologiassa voisi hyödyntää esimerkiksi vetyä, jolla on hyvä energiapitoisuus ja lämmönjohtavuus sekä suuri reaktionopeus. Vedyllä olisi paljon potentiaalia korvata korkeapäästöinen hiili raakaraudan pelkistimenä. Vety energianlähteenä vaatisi kuitenkin kilpailukykyisen hinnan ja mahdollisuuden massatuottaa sitä. [25]

Vetyteknologia perustuu vetyrikkaan liuottimen injektointiin masuuniin. Hiili on kuitenkin yleisin raudan pelkistin eikä sitä voida täysin korvata, kun rautaa tuotetaan masuuneilla. Vedyn määrää suhteessa hiileen voidaan kuitenkin lisätä ja suhteen oletetaan kasvavan tulevaisuudessa. Suhteen kasvaessa masuunin käytössä saattaa kuitenkin seurata ongelmia, jotka täytyy huomioida tulevaisuudessa. [25]

Prosesseissa, jossa rautamalmia kuumennetaan sulamispisteen yli, kutsutaan suorapelkistys -prosesseiksi (DRI) [24]. Näitä ovat hiili- sekä kaasupohjaiset DRI-prosessit. Vedyn hyödyntämisessä keskitytään lähinnä kaasupohjaisiin DRI-prosesseihin, jotka vastaavat yli 90 % DRI:n raudan tuotannosta. Prosessissa teräsvoimaloiden poistokaasuja sekä maakaasua hyödynnetään siten, että saadaan paljon vetyä sekä jonkin verran häkää sisältävää kaasua. Puhtaan vetykaasun hyödyntäminen ja vedyn pitoisuuden lisääminen ovat tämän teknologian tulevaisuuden kehityskohteita. [25]

Fossiilivapaasta teräksentuotannosta esimerkkinä on SSAB:n HYBDIT-hanke. SSAB on rakennuttamassa Ruotsiin DRI:tä hyödyntävää voimalaa Luulajaan sekä fossiilivapaasti rautamalmipellettejä valmistavaa voimalaa Malmbergiin. DRI:tä hyödyntävän voimalan

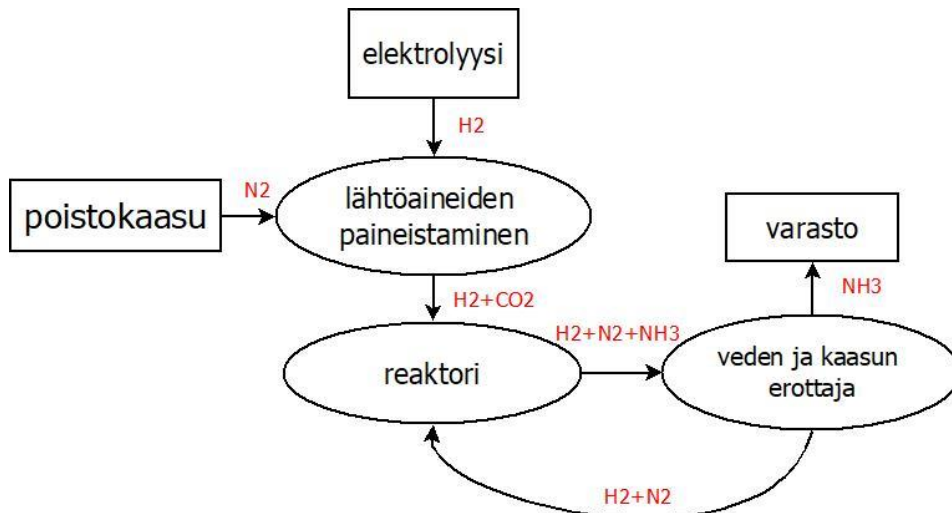
läheisyyteen rakennetaan myös vetyvarasto. HYBDIT-hankkeen demonstraatiovaihe pyritään saavuttamaan vuoteen 2025 mennessä. [26]

### 3.3.2 Ammoniakin tuotanto

Teollisuuden prosessien poistokaasuista, jotka sisältävät muun muassa hiilidioksidia ja typpeä, voidaan metaanin lisäksi muodostaa vedystä ja tyypestä Haber-Bosch prosessissa ammoniakkia. Prosessin kemiallinen reaktioyhtälö on



Tämä reaktio on eksoterminen ja vapauttaa  $92 \text{ kJmol}^{-1}$  energiaa. Prosessissa lämpötila on välillä  $350\text{--}550 \text{ }^\circ\text{C}$  ja paine  $14\text{--}32 \text{ MPa}$ . Korkea lämpötila vaaditaan typpimolekyylin hajottamiseen. Katalyyttinä käytetään rautaa sen saatavuuden ja alhaisen hinnan vuoksi. [17] Kuvassa 7 on esitetty ammoniakin tuotantoprosessi.



**Kuva 7.** Ammoniakin tuotantoprosessi, muokattu lähteestä [17]

Ammoniakilla on monia etuja vedyn kantajana ja polttoaineena. Ammoniakin tuotanto on hyvin pitkälle kehitettyä ja suuren kokoluokan ammoniakin tuotanto- ja jakelulaitoksia on jo olemassa. Ammoniakki, kuten vety, ei sisällä lainkaan hiiltä, joten sen käyttäminen polttoaineena tuottaa vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä. [17]

Ammoniakki voidaan varastoida ja se on aineena suhteellisen stabiili [17]. Ammoniakki on huoneenlämmössä nestemäisessä muodossa ja sen höyrynpaine on  $0.9 \text{ MPa}$ . Vety puolestaan saavuttaa saman höyrynpaineen lämpötilassa  $-242 \text{ }^\circ\text{C}$ , joten on selvää, että kryogeenisen vedyn varastoiminen ei ole tällä hetkellä järkevää. Vedyn varastoiminen ammoniakkiin puoleksi vuodeksi maksaisi  $0,54 \text{ } \$/\text{kg}_{H_2}$ , kun taas puhdas vety maksaisi  $14,95 \text{ } \$/\text{kg}_{H_2}$ . [27]

### 3.4 Vedyn hyödyntäminen sähkö- ja kaasuverkossa

PtG tarjoaa sähköverkkoon joustavuutta vähentäen energiahäviöitä. Kemialliseksi energiaksi varastoitunutta kaasua voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi sähköverkkoon polttokennojen tai kaasuturbiinien avulla. [28]

#### 3.4.1 Polttokennot

Polttokennoja voidaan käyttää pääasiallisena sähkönlähteenä sekä varasähkönlähteenä [29]. Polttokennoja voidaan luokitella eri polttokennotyyppeihin, joita ovat muun muassa PEM-kennot, kiinteäoksidikennot ja sulakarbonaattikennot. Niille on monia käyttökohteita, erityisesti hajautetuissa energian tuotannon systeemeissä, kuten kuljetus, sähkön tuotanto rakennuksille ja varasähkön sekä yhteistuotannon sovellutukset. [29]

Sen lisäksi, että polttokennojen käyttö on yksi ilmaston lämpenemistä estävä ratkaisu, niihin perustuvat kulkuneuvot parantavat ilmanlaatua. Euroopassa aiheutuu vuosittain yli miljoona ennenaikaista kuolemaa ilmassa olevista hiukkaspäästöistä. Päästöistä johtuvien haittojen hinta Euroopassa arvioidaan olevan 24 miljardia joka vuosi. [14]

#### 3.4.2 Vedyn integrointi kaasuverkkoon

Vetyä on mahdollista injektoida kaasuverkkoon, jolloin siitä saadaan vähäpäästöisempi energiavarasto. Vedyn sovellutukset kuten suuret teollisuuden prosessit vaativat jatkuvan vedyn lähteen. Tästä seuraa vaatimukset puhtaan vedyn integroinnille vedyn jakeluverkkoon joko maakaasuun sekoitettuna tai vedylle tarkoitettuihin putkistoihin. Prosessit vaatimat myös varastointisysteemejä, jotka tarjoavat turvallisesti suuria määriä vetyä jatkuvalla syötöllä. Vedyn toimitusketjun kehityksen kohteita ovat pitkille etäisyyksille tehokas kuljetussysteemi, lyhyen ja pitkän aikavälin varastointi sekä vedyn jakeluverkko. [27]

Euroopassa on suunniteltu rakentaa vedynjakeluverkko EHB (European Hydrogen Backbone), joka olisi vuonna 2030 jopa 11600 km pitkä ja vuonna 2040 ainakin 40000 km. Verkon rakentaminen maksaisi 43–81 miljardia, jonka kustannuksista 75 % kuluisi maakaasuverkon putkistojen muuttamisesta vetyputkistoiksi ja loput 25 % verkon laajennukseen. Vedyn kuljetus maksaisi 0,11–0,21 €/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> tuhatta kilometriä kohden. Vetyputkiston rakentaminen maksaa 854 \$/m, 10–20 %:a enemmän kuin maakaasuverkon, joka johtuu putkiston hitsaamisen menetelmistä, vuototestauksista ja vedyn paineistamisesta. [27]

## 4. PILOTOINTIHANKKEET

Moni maa on alkanut kiinnostumaan PtG:stä ja jo 16 maalla on pilotointihankkeita Euroopassa. Vuonna 2003 aloitettiin ensimmäiset hankkeet Euroopassa, jolloin ne keskittyivät lähinnä vedyn käyttöön. Vuonna 2011 hankkeiden määrä alkoi kasvamaan ja vuonna 2015 uusia hankkeita otettiin toimintaan 16. Vuonna 2017 Saksalla oli eniten hankkeita ja vain Saksa, Ranska ja Englanti tilasivat uusia elektrolyysereitä Euroopassa. [22] Vuodesta 1993 vuoteen 2050 mennessä nykyisiä, suunniteltuja ja menneitä hankkeita on ollut yhteensä 153 maailmassa 22 eri maalla [10].

Suurin osa PtG-projekteista sijaitsee keski-Euroopassa [10]. Saksa on P2G-projektien kärkimaa, sillä Saksassa on yli kolmasosa tunnetuista P2G projekteista. Saksa oli myös ensimmäinen maa, jossa suuren kokoluokan PtG-systeemin ideasta oli julkaistua tietoa [10]. Yhdysvalloissa on paljon päättyneitä tai meneillään olevia projekteja, mutta ne ovat olleet kooltaan pieniä eikä Yhdysvalloilla ole tulevia suunniteltuja P2G-projekteja. Monella maalla Euroopassa on neljästä yhdeksään päättyneitä, toiminnassa olevaa tai suunniteltua projektia. [3]

Euroopassa projekteilla on useita eri käyttökohteita. Yli puolessa projekteista on mahdollisuutena muuttaa sähköenergiaa kaasusta takaisin sähköenergiaksi huonosta hyötysuhteesta huolimatta. Iso osa projekteista hyödyntää vetyä energiavarastona tasoittaen uusiutuvista energianlähteistä saatua energiaa. Noin viidesosa projekteista mahdollistaa myös toiminnan vedyn kuljetukseen polttoaineena, tosin pelkästään vedyn kuljetukseen perustuvia projekteja ei ole huomioitu. [3]

Maailmanlaajuisesti alkali- ja PEM-teknologioita käytetään eniten elektrolyysiprojekteissa. Ensimmäiset projektit perustuivat alkali-elektrolyysiin, nykyiset myös PEM-elektrolyysiin. Nykyään molemmat teknologiat vastaavat hyötysuhteeltaan toisiaan, ja teknologian valinta perustuukin projektin yksityiskohtiin. Kiinteäoksidielektrolyysiin perustuvia projekteja on myös olemassa, joiden tarkoitus on demonstroida niissä käytetyn teknologian toimivuutta. [3]

Noin 57 % hankkeista maailmassa keskittyy vain vedyn tuotantoon, varastointiin ja käyttöön. Loput projekteista keskittyivät tämän lisäksi tai pelkästään metanaatioon, joista puolet ovat kemiallisen metanaation hankkeita ja puolet biologisen. Nykyisistä projekteista 15 hyödyntää jätevesivoimaloiden tuottamaa biokaasua tai jätökaasua hiilidioksidinlähteenä. Kaupallisessa käytössä olevat voimalat hyödyntävät aineita, jotka ovat STP-oloissa kaasuja. [10]



Myös projektien keskimääräinen koko on jatkuvassa kasvussa. Saksalla on suurin elektrolyysereillä tuotetun vedyn tuotantokapasiteetti (40 MW) ja Tanskalla toiseksi suurin (20 MW) [10]. Suurin elektrolyysiin perustuva toiminnassa oleva voimala on Audin e-gas voimala, jossa on kolme elektrolyyseriä ja jonka kokonaiskapasiteetti 6,3 MW. Voimalassa elektrolyysit saa energiansa tuulivoimalasta, ja tuotettu vety käytetään metaanin tuottamiseen. Ranskaan suunniteltu H2V Productin voimala olisi elektrolyysikapasiteetiltaan 100 MW ja se tuottaisi vetyä kaasuverkkoon. [3]

#### **4.1 Audi e-gas voimala**

Audi AG:n audi e-gas voimala on suurin teollisuuden power-to-SNG (sähköenergiaa synteettiseksi maakaasuksi) voimala maailmassa. Voimala otettiin käyttöön vuonna 2013 ja se sijaitsee Wertessä, Saksassa. Voimala rakennettiin Audi AG:n, ETOGAS GmbH:n, ZSW:n, Fraunhofer IWES:in ja EWE Biogas GmbH:n välisenä yhteistyönä. [30]

Vetyä tuotetaan kolmella 2 MW elektrolyyserillä, jotka saavat energiansa off-shore tuulipuistosta Pohjanmerellä. Hiilidioksidi metanaatioon saadaan sen vieressä olevasta biometaanivoimalasta kemiallisella absorptiolla amiineja käyttäen. Voimalan tehokkuus on 54 %, ottamatta huomioon tuotettua lämpöä, jota voidaan hyödyntää. Tuotettu synteettinen maakaasu on energiatiheydeltään 13,85 kWh/kg. [30]

Voimalan tuotanto ei ole tasaista, vaan se riippuu sähkön saatavuudesta. Voimalalla on mahdollista tuottaa 325 Nm<sup>3</sup>/h metaania, mutta arvioitu tuotanto on noin 1000 tonnia vuodessa, sillä vedyn tuotantoon energiaa on saatavilla vuotuisesti 4000 tuntia. [30]

#### **4.2 BioPower2Gas**

MicrobEnergy:n rakentama BioPower2Gas voimala on ensimmäinen biologiseen metanaatioon perustuva voimala, joka on kaupallisessa käytössä. Voimala otettiin käyttöön vuonna 2015 ja se sijaitsee Allendorf:issa, Saksassa. Voimala koostuu laitteistoista, jotka Viessmann Group:in tytäryhtiöt ovat toimittaneet. [30]

Voimalan tuotantokapasiteetti on 1,2 MW PEM-elektrolyysereillä [22.]. PEM-elektrolyysereiden lisäksi voimala koostuu Carbotechin tarjoamasta vetypuskurista, biologisesta reaktorista ja Schrank Biogas GmbH:n tarjoamasta biokaasusta. Biokaasua saadaan myös kahdesta biokaasuvoimalasta, jotka Viessman Group omistaa. Elektrolyyserin potentiaalinen synteettisen maakaasun tuotanto on 60 Nm<sup>3</sup>/h. [30]

## 5. YHTEENVETO

Power-to-Gas on yksi merkittävimpiä teknologioita ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Tällä teknologialla saadaan hyödynnettyä mahdollisimman monta eri uusiutuvan energian lähdettä eri energiasektoreilla. Power-to-Gas on ainoa kausittaisen energianvarastoinnin vaihtoehto esimerkiksi vähäpäästöisen lämmityssektorin saavuttamiseksi. Teknologiaa voidaan soveltaa myös teollisuuteen ja liikenteeseen vähäpäästöisen energian tuottajana ja varastoijana.

Power-to-Gas-teknologialla uusiutuvaa sähköenergiaa muunnetaan kemiallista energiaa sisältäväksi kaasuksi, aluksi vedyksi, ja muunnos tapahtuu veden elektrolyysillä. Veden elektrolyysissä vesi hajotetaan sähköenergian avulla vedyksi ja hapeksi. Merkittävimmät elektrolyysiteknologiat ovat alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja kiinteäoksidielektrolyysi.

Elektrolyysiteknologiat eroavat toisistaan monella eri tavalla, joita ovat esimerkiksi käytetty elektrolyytti, hinta, toimintalämpötila sekä -paine ja nimellishyötysuhde. Kehitetyin ja halvin elektrolyysiteknologia tällä hetkellä on alkalielektrolyysi, mutta PEM-elektrolyysi soveltuu paremmin muuttuviin olosuhteisiin ja kiinteäoksidielektrolyysiteknologian kehitys taas perustuu sen korkeaan potentiaaliseen hyötysuhteeseen. Elektrolyysereihin liittyvien kustannusten arvioidaan laskevan merkittävästi vuoteen 2050 mennessä.

Vetyä on mahdollista jatkojalostaa metaaniksi metanaation avulla. Metanaatiossa vedystä ja hiilidioksidista tuotetaan sähköenergian avulla metaania. Metanaatiota tapahtuu joko biologisesti tai kemiallisesti. Biologisessa metanaatiossa katalyyttinä käytetään bakteereja, kun taas kemiallisessa metanaatiossa nikkelpohjaisia katalyytteja. Kemiallinen metanaatio on nykyään yleisin tapa tuottaa metaania.

Metanaation lähtötuotteena olevaa hiilidioksidia ei kuitenkaan esiinny yleensä puhtaana kaasuna, vaan sitä täytyy talteenottaa esimerkiksi teollisuuden tai sähköntuotannon voimalasta. Hiilidioksidin talteenottomenetelmiä ovat absorptio, adsorptio, kalvomenetelmä ja kryogeeninen erotus, joista kehitetyin on absorptio. Hiilidioksidin talteenottoa voidaan luokitella myös sen perusteella, missä pisteessä palamisprosessia talteenotto tapahtuu. Talteenottopisteitä ovat polttoa edeltävä sekä polton jälkeinen talteenotto ja happipolttu. Jos metaani on talteen otetulla hiilidioksidilla tuotettua, se tuottaa palaessaan yhtä paljon hiilidioksidia mitä sen sitomiseen on kulunut.

Ensimmäiset Power-to-Gas-konseptia hyödyntävät projektit syntyivät 1990-luvulla. Hankkeiden määrä ja niissä käytettävien elektrolyysereiden koko ovat jatkuvassa kasvussa. Saksa on hankkeiden kärkimaa ja siellä on yli kolmasosa kaikista hankkeista Euroopassa. Lähes kaikissa hankkeissa käytetään joko alkali- tai PEM-elektrolyysereitä, mutta myös muutamia kiinteäoksidgelektrolyysin toimintaa demonstroivia pilotointihankkeita on olemassa. Yli puolet kaikista projekteista keskittyy pelkästään vedyn hyödyntämiseen ja varastointiin, ja loput näiden lisäksi metaanin tuotantoon.

## LÄHTEET

- [1] Euroopan komissio, Pitkän aikavälin strategia, verkkosivu. Viitattu 28.10.2021, saatavissa: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy\\_fi](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_fi)
- [2] Götz M, Lefebvre J, Mörs F, McDaniel Koch A, Graf F, Bajohr S, et al. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable energy*. 2016,85:1371–90.
- [3] Sankir, Mehmet Sankir, Nurdan Demirci. Hydrogen Production Technologies - 6.3.2 Alkaline Water Electrolysis, John Wiley & Sons, 2017
- [4] Lamb, Jacob J. Pollet, Bruno G. Hydrogen, Biomass, and Bioenergy - Integration Pathways for Renewable Energy Applications - 2.1.1.1 Hydrogen, 2020
- [5] Buttler A, Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2018,82:2440–54.
- [6] Sankir, Mehmet Sankir, Nurdan Demirci, Hydrogen Production Technologies - 6.2 Fundamentals of Electrolysis, John Wiley & Sons, 2017
- [7] Godula-Jopek A. Hydrogen Production: By Electrolysis. Berlin: John Wiley & Sons, Incorporated; 2015. (pp. 63-192)
- [8] Carriveau, Rupp Ting, David S-K. Methane and Hydrogen for Energy Storage - 3.3.1.3 Solid Oxide Electrolysis, 2016, (pp. 56,57). Institution of Engineering and Technology.
- [9] Tucker MC. Progress in metal-supported solid oxide electrolysis cells: A review. *International journal of hydrogen energy*. 2020,45(46):24203–18.
- [10] Thema M, Bauer F, Sterner M. Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2019,112:775–87.
- [11] Ghaib K, Ben-Fares F-Z. Power-to-Methane: A state-of-the-art review. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2018,81:433–46.
- [12] Ferrari, Joseph. Electric Utility Resource Planning - Past, Present and Future - 4.4.3.3 Water Consumption for Hydrogen Production from Electrolysis, 2021
- [13] Energy Information Administrationin verkkosivu. Viitattu 29.11.2021, saatavissa: <https://ir.eia.gov/ngs/ngs.html>
- [14] International Energy Agencyyn verkkosivu. Viitattu 29.11.2021, Saatavissa: <https://www.iea.org>
- [15] Rönsch S, Schneider J, Matthischke S, Schlüter M, Götz M, Lefebvre J, et al. Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel* (Guildford). 2016,166:276–96.

- [16] Hidalgo D, Martín-Marroquín J. Power-to-methane, coupling CO<sub>2</sub> capture with fuel production: An overview. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2020,132:110057–.
- [17] Castellani B, Rinaldi S, Morini E, Nastasi B, Rossi F. Flue gas treatment by power-to-gas integration for methane and ammonia synthesis – Energy and environmental analysis. *Energy conversion and management*. 2018,171:626–34.
- [18] IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005
- [19] Michael Sterner, Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy systems, 2009, pp.184-185
- [20] International Energy Agency. *World Energy Outlook*. 2016 ed. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 2016
- [21] Soubeyran A, Rouabhi A, Coquelet C. Thermodynamic analysis of carbon dioxide storage in salt caverns to improve the Power-to-Gas process. *Applied energy*, 2019,242:1090–107.
- [22] Wulf C, Linßen J, Zapp P. Review of Power-to-Gas Projects in Europe. *Energy procedia*. 2018;155:367–78.
- [23] Blanco H, Faaij A. A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2018;81(P1):1049–86.
- [24] Lamb, Jacob J. Pollet, Bruno G.. *Hydrogen, Biomass, and Bioenergy - Integration Pathways for Renewable Energy Applications - 2.1.1.1 Hydrogen, 2020*
- [25] Liu W, Zuo H, Wang J, Xue Q, Ren B, Yang F. The production and application of hydrogen in steel industry. *International journal of hydrogen energy*. 2021,46(17):10548–69.
- [26] SSAB, HYBRITIN ja fossiilivapaan teräksen aikataulu, verkkosivu. Viitattu 2.12.2021, saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hybrit-phases>
- [27] Capurso T, Stefanizzi M, Torresi M, Camporeale S. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy conversion and management*. 2022,251:114898–.
- [28] Carriveau, Rupp Ting, David S-K. *Methane and Hydrogen for Energy Storage - 2.1 Summary of Concept*. Institution of Engineering and Technology, 2016
- [29] Sallam, Abdelhay A. Malik, Om P. *Power Grids with Renewable Energy - Storage, Integration and Digitalization - 9.1 Introduction*. (pp. 217). Institution of Engineering and Technology, 2021
- [30] Bailera M, Lisbona P, Romeo LM, Espatolero S. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO<sub>2</sub>. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2017,69:292–312.