

Julia Jokiranta

VETY ENERGIAVARASTONA AURIN- KOSÄHKÖSSÄ JA TUULIVOIMASSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Risto Mikkonen
Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Julia Jokiranta: Vety energiavarastona aurinkosähkössä ja tuulivoimassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Pääaine: Sähköenergiatekniikka
Joulukuu 2021

Ilmastonmuutoksen voimistumisen myötä on tarve vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tämän toteuttamiseksi on lisättävä uusiutuvia ja päästöttömiä tapoja tuottaa energiaa. Aurinko- ja tuulivoimalla voidaan tuottaa puhdasta sähköä, jota kuitenkin syntyy jaksottaisesti riippuen aurinkoisuudesta ja tuulisuudesta. Jotta saadaan ylläpidettyä kulutuksen ja tuotannon tasapaino, on pystytävä varastoimaan ylimääräinen energia. Tämä energia voidaan varastoida vetyyn. Tämän kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on selvittää aurinkosähköllä ja tuulivoimalla tuotetun vedyn mahdollisuuksia toimia energiavarastona. Työssä käsitellään aurinkosähkön ja tuulivoiman tuotantoa, sähkön muuttamista vedyksi, vedyn varastointia ja vedyn muuttamista takaisin sähköksi.

Työ jakautuu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan aurinko- ja tuulisähkön tuotannon keskeisiä periaatteita. Havaitaan, että aurinkosähkön tuotanto perustuu Auringon säteilyenergian muuttamiseen puolijohdekomponenttien avulla sähköksi. Tuulisähköä syntyy, kun ilmavirtaus pyörittää tuulivoimalan lapoja ja siten akselia sekä turbiinia.

Toinen osa keskittyy vetyyn. Vetyä voidaan valmistaa veden elektrolyysillä, jossa sähkövirran avulla vesi hajoaa hapeksi ja vedyksi hapetus-pelkistysreaktioissa. Syntynyt vetykaasu kerätään ja varastoidaan paineistamalla, nesteyttämällä tai adsorptiomalla eli imeyttämällä toisen aineen pintaan. Vetyyn varastoitu energia saadaan vapautettua polttokennojen avulla. Polttokennot toimivat käänteisellä elektrolyysireaktiolla, jolloin syntyy vettä, lämpöä ja sähkövirtaa. Vetykaasuun varastoitunutta energiaa saadaan muutettua sähköksi myös käyttämällä kaasuturbiineja.

Kolmannessa osassa perehdytään aiempien osien soveltamiseen. Aurinko- ja tuulisähköllä voidaan tuottaa vetyä elektrolyysin avulla. Vety voidaan varastoida ja vapauttaa polttokennoilla tai kaasuturbiineilla. Havaitaan, että vety toimii hyvin pitkän aikavälin energiavarastona, koska sillä ei ole akuille tyypillistä lyhyttä itsepurkautumisaikaa vaan vety säilyttää energiasisältönsä pitkälläkin ajanjaksolla. Kirjallisuusselvityksen perusteella vetyyn varastoidessa iso osa energiasta häviää konversioissa ja kustannukset ovat vielä korkeita. Kuitenkin teknologian kehittyessä ja massatuotannon avulla kustannuksia saadaan pienennettyä ja hyötysuhteita kasvatettua, jolloin vetyvarastoista tulee yhä kannattavampia.

Avainsanat: vety, uusiutuvat energialähteet, energiavarasto, aurinkosähkö, tuulivoima

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

LYHENTEET JA MERKINNÄT

e^-	Elektroni
H^-	Vetyanioni
H^+	Vetyioni
H_2	Kaksiatominen vety, vetykaasu
H_2O	Vesi
O^{2-}	Oksidi-ioni
O_2	Kaksiatominen happi, happikaasu
OH^-	Hydroksidi-ioni
Fe	Rauta
H	Vety
Ir	Iridium
KOH	Kaliumhydroksidi
LSM	Lantaanin, strontiumin ja mangaanin sekaoksidi
MgH_2	Magnesiumhydridi
n	negatiivinen
Ni	Nikkeli
p	positiivinen
Pt	Platina
Ru	Rudium
YSZ	Yttria stabilized zirconia, suom. zirkoniumilla ja yttriumilla stabiloitu seka-oksidi
C_p	Tehokerroin
A	Pinta-ala
bar	Baari
C	Celsius
GW	Gigawatti
h	tunti
kWh	Kilowattitunti
l	Litra
P	Teho
USD	US dollar, suom. Yhdysvaltain dollari
v	Nopeus
W	Watti
ρ	Tiheys
AEC	Alkaline electrolysis cell, suom. alkalinen elektrolysaattori
AFC	Alkaline fuel cell, suom. alkalinen polttokenno
CHP	Combined heat and power, suom. sähkön ja lämmön yhteistuotanto
EU	Euroopan Unioni
G2P	Gas-to-power, suom. kaasusta tehoksi
H2P	Hydrogen-to-power, suom. vedystä tehoksi
IEA	The International Energy Agency, suom. Kansainvälinen energiajärjestö
MEA	Membrane-electrode assembly, suom. kalvoelektrodi
P2G	Power-to-gas, suom. tehosta kaasuksi
P2G2P	Power-to-gas-to-power, suom. tehosta kaasuksi ja takaisin tehoksi
P2H2P	Power-to-hydrogen-to-power, suom. tehosta vedyksi ja takaisin tehoksi
P2X	Power-to-X, suom. tehosta joksikin
PAFC	Phosphoric acid fuel cell, suom. fosforihappopolttokenno
PEM-	Polymer Electrolyte Membrane, suom. kiinteäpolymeeri-
PEMEC	Polymer Electrolyte Membrane fuel cell, suom. kiinteäpolymeeriel- ektrolysaattori
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane fuel cell, suom. kiinteäpolymeeripolttokenno
PFSA	Perfluorosulfonic acid, suom. perfluorisulfonihappo
SOEC	Solid oxide electrolysis cell, suom. kiinteäoksidielektrolysaattori
SOFC	solid oxide fuel cell, suom. kiinteäoksidipolttokenno

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Aurinkokennon peruseriaate, muokattu lähteestä [5].....</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>Vaaka-akselinen tuulivoimala, muokattu lähteestä [6].....</i>	<i>4</i>
Kuva 3.	<i>Veden hajoaminen elektrolyysissä vety- ja happikaasuksi, muokattu lähteestä [12].....</i>	<i>7</i>
Kuva 4.	<i>Alkalinen elektrolyysi, muokattu lähteestä [12].....</i>	<i>8</i>
Kuva 5.	<i>Kiinteäpolymeerielektrolyysi, muokattu lähteistä [12], [20].....</i>	<i>8</i>
Kuva 6.	<i>Kiinteäoksidielektrolyysi, muokattu lähteistä [12], [20].....</i>	<i>9</i>
Kuva 7.	<i>Kiinteäpolymeeripolttokenno, muokattu lähteistä [15], [25].....</i>	<i>14</i>
Kuva 8.	<i>Alkalinen polttokenno, muokattu lähteistä [15], [25].....</i>	<i>15</i>
Kuva 9.	<i>Kiinteäoksidipolttokenno, muokattu lähteistä [15], [25].....</i>	<i>15</i>
Kuva 10.	<i>Esimerkki vetyvaraston integroimisesta sähköverkkoon, muokattu lähteestä [28]</i>	<i>18</i>
Kuva 11.	<i>Ennustus elektrolyyserien hyötysuhteen kehitykselle vuosina 2020–2050, muokattu lähteestä [22]</i>	<i>22</i>
Kuva 12.	<i>Ennustus elektrolyyserien toimintaiän kehitykselle vuosina 2020– 2050, muokattu lähteestä [22].....</i>	<i>23</i>

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖN TUOTANTO	2
2.1 Aurinkosähkön tuotanto	2
2.2 Tuulisähkön tuotanto	3
3. VETY ENERGIAVARASTONA	6
3.1 Vedyn valmistus elektrolyysillä	6
3.2 Vedyn varastointitekniikat	11
3.2.1 Paineistettu vety	11
3.2.2 Nestemäinen vety	12
3.2.3 Hydridit	12
3.2.4 Muut vetyvarastot	13
3.3 Vedyn konvertointi sähköksi	13
4. VETYVARASTON SOVELTAMINEN AURINKO- JA TUULIVOIMAAN	18
4.1 Taloudellinen tarkastelu	19
4.2 Hyötysuhdetarkastelu	20
4.3 Tulevaisuuden näkymät	22
5. YHTEENVETO	24
LÄHTEET	25

1. JOHDANTO

Fossiilisista polttoaineista luopuminen vaatii uusiutuvien energialähteiden osuuden kasvattamista, jotta tulevaisuudessa voidaan tuottaa yhä enemmän hiilidioksidipäästötöntä energiaa. Sähkön kulutuksen ja tuotannon välillä on oltava tasapaino, eikä energia saa päästä loppumaan kulutushuippujenkaan aikana. Uusiutuvien energialähteiden tuottama energia vaihtelee jaksottaisesti niin vuorokauden kuin vuodenajan mukaan, joten energian varastoinnin tarve kasvaa uusiutuvien energialähteiden osuuden kasvaessa.

Tulevaisuudessa tarvitaan hiilidioksidipäästötöntä energiaa erilaisiin tarpeisiin kuten kuluneuvoihin, sähköntuotantoon, lämmitykseen ja teollisuuteen. Akut toimivat hyvin lyhytaikaisina varastoina, mutta ne eivät kuitenkaan sovellu pitkäaikaiseen varastointiin lyhyen itsepurkautumisajan takia. Aurinko- ja tuulisähköä on pystyttävä varastoimaan niin, että voidaan ylläpitää tuotannon ja kulutuksen tasapaino. [1]

Vuonna 2020 hieman yli 4 % maailman sähköstä tuotettiin tuulivoimalla ja alle 2 % aurinkosähköllä. Kansainvälisen energijärjestön (IEA, engl. The International Energy Agency) ennustuksen mukaan vuonna 2040 koko maapallon sähköstä 23–42 % tuotetaan aurinkosähköllä ja tuulivoimalla. Euroopan unionilla on tavoitteena kasvattaa uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön osuutta yli 50 %:iin vuoteen 2030 mennessä ja vähintään 80 %:iin vuoteen 2050 mennessä. Nykyisten arvioiden mukaan sähköverkon stabiilisuuden ylläpidosta tulee haastavaa, kun uusiutuvan sähkön osuus kasvaa yli 30 %:iin. [1] Sähköverkon stabiilisuutta voidaan parantaa vetyvaraston avulla [2].

Tämä työ on kirjallisuusselvitys, jossa selvitetään aurinkosähköllä ja tuulivoimalla tuotetun energian varastoimista vetyyn. Toisessa luvussa selvitetään aurinko- ja tuulisähkötuotannon peruseräitä. Kolmannessa luvussa tutustutaan vedyn valmistamiseen, erilaisiin vedyn varastointiteknologioihin sekä vedyn konversioon takaisin sähköksi. Neljännessä luvussa sovelletaan aiempien lukujen sisältöä. Miten aurinkosähköä ja tuulivoimaa voidaan varastoida vetyyn sekä käsitellään, miten vetyvarasto voidaan integroida sähköjärjestelmään.

2. SÄHKÖN TUOTANTO

Tässä luvussa käsitellään sähkön tuotantoa aurinko- ja tuulivoimalla. Näin saadaan tuotettua hiilidioksidipäästötöntä sähköä ja edelleen puhdasta eli päästötöntä vetyä.

2.1 Aurinkosähkön tuotanto

Aurinkoenergiaa voidaan muuntaa sähköksi kahdella tavalla: joko muuttamalla Auringon säteilyenergia sähköksi tai hyödyntämällä suoraan Auringon säteilyenergiaa. Auringon säteilyenergiasta voidaan paneelien ja keräimien avulla muodostaa sähköä.

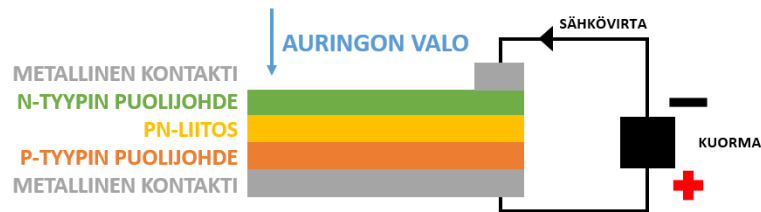
Aurinkosähkön energia on peräisin Auringossa korkeassa lämpötilassa tapahtuvista fuusioreaktioista, joissa kaksi kevyttä vetyatomia yhdistyvät yhdeksi raskaammaksi heliumatomiksi. Fuusioreaktiossa vapautuva energia säteilee Auringosta poispäin. [3] Maapallon ilmakehän kohdatessaan säteilyn intensiteettiteho pinta-alaa kohden on niin kutsutun aurinkovakion suuruinen. Aurinkovakio on lähteestä riippuen $1353\text{--}1373 \frac{W}{m^2}$ (W, watti).

[4]

Auringon säteilyteho vaihtelee vuodenajan ja vuorokauden mukaan. Säteilytehon muutokset vuorokauden aikana johtuvat maapallon pyörimisestä oman akselinsa ympäri. Maapallon akseli on $23,5^\circ$ kallellaan suhteessa Aurinkoon, mikä aiheuttaa vuodenajat. Kun sijainti maapallolla on kallellaan Aurinkoa kohti, on kesä. Eri vuodenaikoina päivänpituus vaihtelee, jolloin myös säteilyn määrä vaihtelee. Talvella kaltevuus on poispäin Auringosta, jolloin säteily jakautuu isommalle pinta-alalle. Näin ollen myös säteilyteho pinta-alaa kohden on alhaisempi talvisin. Lisäksi säteilytehoon vaikuttaa säätila. Esimerkiksi pilvet heijastavat osan säteilystä takaisin avaruuteen ja siten vähentävät maapallon pinnalle tulevan säteilyn määrää. [5]

Auringon säteilytehoa voidaan muokata suoraan sähköenergiaksi aurinkokennojen avulla. Aurinkokennot valmistetaan puolijohdeista. Puolijohdemateriaalien johtavuutta voidaan muokata douppaamalla materiaalia eli lisäämällä siihen epäpuhtauksia. Jos lisätyt atomit sisältävät enemmän valenssi- eli ulkoelektroneja kuin douppattava materiaali, niin syntyvää materiaalia kutsutaan n-typin (negatiivinen) puolijohdeeksi. Vastaavasti jos valenssielektroneja on vähemmän, niin puhutaan p-typin (positiivinen) puolijohdeesta. Yhdistämällä p- ja n-typin puolijohdeet, saadaan aikaan pn-rajapinta. N-typin puolijohdeessa on ylimääräisiä elektroneja, jotka voidaan luovuttaa p-typin aukoilta. [6]

Kuvassa 1 on esitettyä aurinkokennon peruseriaate. Kuormalta tuleva johdin on yhdistetty aurinkokennoon metallisen kontaktin kautta ja samalla tavalla aurinkokennolta lähtevä johdin on yhdistetty metalliseen kontaktiin. Aurinkokennossa auringon valon energian avulla n-tyyppin puolijohteen elektronit voivat täyttää p-tyyppin aukot. Elektronien liike synnyttää sähkövirran. [5]



Kuva 1. Aurinkokennon peruseriaate, muokattu lähteestä [5]

Yleisin puolijohdemateriaali aurinkokennoissa on pii, sillä sen avulla voidaan tuottaa sähköä kustannustehokkaasti. Aurinkokennoissa voidaan käyttää kolmentyyppistä piitä: yksikiteistä, monikiteistä tai amorfista. Yksikiteisellä piillä päästään 16–18 %:in hyötysuhteeseen, kun hyötysuhde lasketaan sisään menevän energian ja ulostulevan energian suhteena. Monikiteisen piin hyötysuhteeksi saadaan 15–17 %. Yleensä monikiteinen pii on yksikiteistä piitä 15 prosenttia halvempi materiaali. Amorfisesta piistä valmistetuilla ohutkalvokennoilla päästään parhaimmillaan 14–16 %:n hyötysuhteisiin, mutta yleensä hyötysuhteet jäävät 8–9 %:iin. [5]

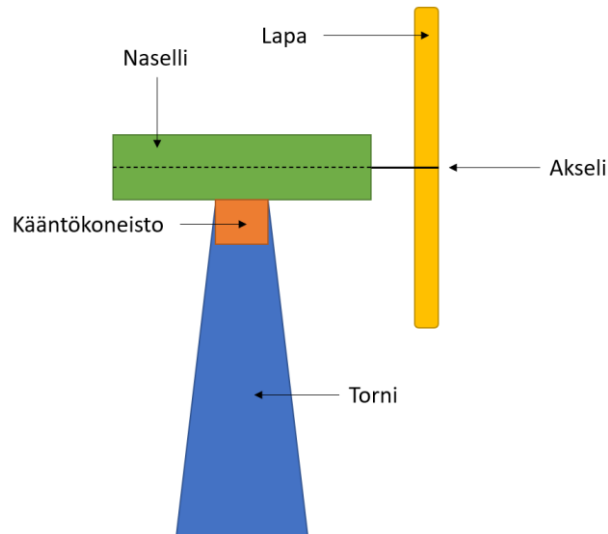
Aurinkokennoista saatavan tehon suuruutta voidaan kasvattaa keräämällä kennoille tulevaa Auringon säteilytehoa laajemmalla alueella linssien ja peilien avulla. Tällaisia aurinkokennoja kutsutaan keskittäviksi aurinkokennoiksi. Useista aurinkokennoista koostuvien aurinkokennomoduuleiden hyötysuhde on noin 2 % alhaisempi kuin yksittäisen aurinkokennon, sillä kennoja yhdistävät juotokset kasvattavat hieman resistanssia. [5]

2.2 Tuulisähkön tuotanto

Auringon säteilyn vaikutuksesta Maan ilmakehässä oleva ilma lämpenee ja maapallolle syntyy lämpötilaeroja. Kun ilman lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan, syntyy ilmavirtaus. Auringon säteilytehosta 0,5 %:a muuntautuu tuuleksi. Tämä tarkoittaa sitä, että maapallolle syntyy tuulitehoa noin $10^{15} W$, joka on 50-kertainen koko maapallon kulutukseen nähden. Tuulisuus ei ole jakautunut tasaisesti maapallolle, joten tuulen määrään vaikuttaa aika ja paikka. [6]

Tuulivoimalan avulla tuotetaan tuulesta sähköenergiaa. Tuulivoimala koostuu tornista, nasellista, käänökoneistosta sekä lavoista (kuva 2). Naselli sisältää turbiinin akselin, mahdollisen vaihteiston ja generaattorin. Käänökoneisto kääntää nasellia ja lavoja

tuulensuunnan mukaan. Lاپoja on usein 2–3 kappaletta ja ne ovat kiinnitettynä akseliin. Suurin osa tuulivoimaloista on vaaka-akselisia, joka tarkoittaa, että akseli on maapinnan suuntainen. [6]



Kuva 2. Vaaka-akselinen tuulivoimala, muokattu lähteestä [6]

Tuulivoimaloiden avulla voidaan muuttaa ilmavirtauksen energia roottorin pyörimisenergiaksi. Ilmavirtaus pyörittää lapoja, jolloin roottorin akseli saadaan pyörimään. Roottorin pyörimisenergia voidaan muuttaa edelleen sähköenergiaksi. [7] Tuulivoimalat eivät ole käytössä koko ajan, sillä pienillä nopeuksilla se ei ole kannattavaa ja suurilla nopeuksilla lapojen pyörittäminen käy vaaralliseksi. Tyypillisesti tuulivoimalat pyörivät 65–80 % ajasta. [6]

Ilmavirtauksen teho, P , on suoraan verrannollinen tuulennopeuden kuutioon ja pinta-alan tuloon

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (1)$$

jossa ρ on ilman tiheys, A pinta-ala, johon tuuli kohdistuu sekä v tuulen nopeus [6], [7]. Teoreettinen maksimiteho saadaan, kun kerrotaan ilmavirtauksen teho tehokertoimella

$$P_{\max} = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (2)$$

jossa C_p on tehokerroin. Betzin laki määrittää teoreettisen maksimihyötysuhteen, jolla ilmavirtauksen teho saadaan muutettua roottorin pyörimisenergiaksi. Sen mukaan tehokertoimen maksimi on $\frac{16}{27} \approx 59\%$. [6]

Useista tuulivoimaloista koostuvia tuulipuistoja voi olla maalla tai merellä. Maalla olevia kutsutaan onshore-puistoiksi ja merellä olevia offshore-puistoiksi. Jotta tuulipuisto olisi kannattava, maalla tuulennopeuden keskiarvon tulisi olla suurempi kuin 6,5 m/s ja

merellä noin 9 m/s. Offshore-puiston etuja ovat suuremmat tuulennopeudet, vähemmän turbulenssia, enemmän hyviä sijainteja tarjolla verrattuna onshore-puistoihin sekä vähemmän meluhaitoista kärsiviä. Huonoja puolia ovat kalliit vedenalaiset siirtolinjat, siirrossa syntyvät häviöt sekä kalliit rakennus- ja huoltokustannukset. Monet kaupungit kuitenkin sijaitsevat rannikolla, joten siirtolinjoista on mahdollista saada lyhyitä. Myös kelluvat tuulipuistot ovat kehityksessä. [6] Viimeisen 15 vuoden aikana on rakennettu useita prototyyppisiä ja koekäyttöisiä kelluvia tuulivoimaloita. Vuonna 2017 Hywind PilotParkissa Skotlannissa otettiin käyttöön viisi 6 MW:n turbiinia, jotka muodostavat ensimmäisen kelluvan tuulipuiston. [8] Kelluvien tuulipuistojen edut ja haitat ovat offshoreen kaltaisia.

3. VETY ENERGIAVARASTONA

Vety, H , on maapallon yleisin alkuaine. Vetyä on 90 % koko universumin materian tilavuudesta. [9] Maapallolla vetyä esiintyy harvoin puhtaassa muodossa, sillä vedyn ainoa elektroni reagoi herkästi. Usein luonnossa vety on sitoutuneena orgaanisina ja epäorgaanisina yhdisteinä. Yleisin vetyä sisältävä yhdiste on vesi, H_2O . Koska vetyä ei käytännössä esiinny maapallolla sellaisenaan, vety tulee valmistaa muista aineista. [10] Vetyä voidaan varastoida kaikissa olomuodoissaan. Kun vetyyn varastoitu energia halutaan ottaa käyttöön, voidaan sähköenergiaa tuottaa vetypolttookennoilla. [1] Puhdasta vetyä voidaan käyttää myös polttoaineena kaasuturbiineissa [11].

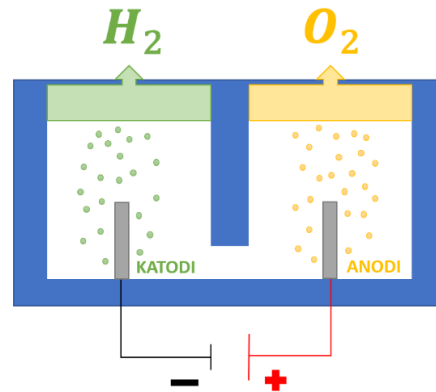
3.1 Vedyn valmistus elektrolyysillä

Vetyä voidaan valmistaa usealla eri menetelmällä. Vuonna 2020 valmistettiin melkein 70 miljoonaa tonnia vetyä, josta vain 4 % valmistettiin veden elektrolyysillä ja loput fossiiliperäisillä menetelmillä [12]. Edes kyseinen 4 % ei ole kokonaan päästötöntä vetyä, sillä elektrolyysin sähkö ei ole aina tuotettu puhtaasti [13]. Tällä hetkellä noin puolet vedystä tuotetaan maakaasun höyryreformoinnilla, mikä tuottaa huomattavasti päästöjä. Vaikka vetyä voidaan valmistaa usealla menetelmällä, niin vain elektrolyysissä käytetään sähköä ja lopputuotteeksi saadaan puhdasta vetyä. [14] Uusiutuvien energialähteiden avulla voidaan tuottaa uusiutuvaa eli vihreää vetyä. Elektrolyysi perustuu sähkökemialliseen reaktioon, jossa hapetus-pelkistysreaktio pakotetaan tapahtumaan sähkövirran avulla [10].

Tässä työssä käsitellään vain aurinko- ja tuulivoimalla toimivia menetelmiä. Tuulivoiman avulla vetyä voidaan valmistaa vedestä elektrolyysin avulla [15]. Auringosta saatua säteilyenergiaa voidaan hyödyntää vedyn valmistamisessa lämpökemiallisesti, valokemiallisesti, elektrolyysin ja fotoelektrolyysin avulla [13]. Elektrolyysi on kuitenkin ainoa vedyntuotantomuoto, jossa tarvitaan aurinkosähköä ja tuulivoimaa energialähteeksi [6]. Aurinkoenergiaa hyödyntävää vedyn tuotantoa kutsutaan solar-to-hydrogen-toimintaperiaatteeksi [13]. Tuulivoiman tapauksessa käytetään termiä wind-to-hydrogen [16].

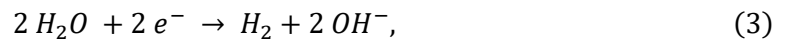
Vedyn valmistus tapahtuu elektrolyysireaktiossa, jossa vesi hajoaa hapeksi ja vedyksi. Veden hajoaminen on ei-spontaani reaktio, joten se vaatii tapahtuakseen ulkoista energiaa, kuten sähköä. Elektrolyysi tapahtuu elektrolyysilaitteistossa, jota voidaan kutsua myös elektrolyyseriksi, elektrolysaattoriksi tai elektrolyysilaitteeksi. [17] Elektrolyysilaitteistoon kuuluu ulkoinen teholähde sekä kaksi elektrodiä, anodi ja katodi (kuva 3).

Elektrodit ovat erotettuna membraanilla eli kalvolla, joka päästää lävitseen tietyt ionit. Molemmat elektrodit ovat upotettuina sähköä johtavaan elektrolyyttiin [18]. Anodi on kiinnitetty teholähteen positiiviseen napaan ja katodi negatiiviseen napaan [13]. Hapen muodostuminen tapahtuu anodilla ja vedyn katodilla [12]. Elektrolyysissä syntyvä happi voidaan päästää ilmaan tai se voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi sairaaloissa, joissa tarvitaan puhdasta happea. Vety kerätään talteen ja jatkoprosessoidaan varastoimista varten. [12]

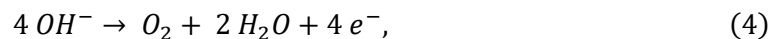


Kuva 3. Veden hajoaminen elektrolyysissä vety- ja happikaasuksi, muokattu lähteestä [12]

Vetyä voidaan valmistaa erilaisilla elektrolyysimenetelmillä kuten alkalisisella elektrolyysillä, kiinteäpolymeerielektrolyysillä ja kiinteäoksidi-elektrolyysillä [12]. Veden hapettumiseen perustuvassa elektrolyysissä katodilla tapahtuu reaktio



jossa vesi reagoi emäksisessä liuoksessa elektronien, e^- , kanssa muodostaen vetykaasua, H_2 , ja hydroksidi-ioneja, OH^- . Samanaikaisesti tapahtuu anodireaktio

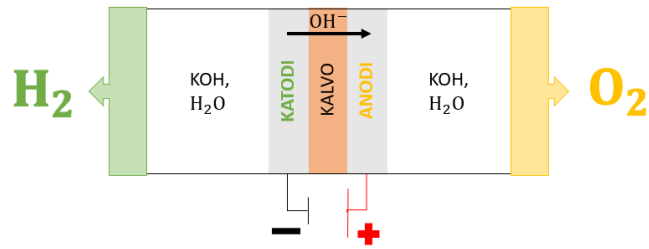


jossa hydroksidi-ioneista syntyy happikaasua, O_2 , vesimolekyylejä ja elektroneja. Reaktioiden 3 ja 4 kokonaisreaktioksi saadaan



jossa vesimolekyylit hajoavat happi- ja vetykaasuksi. [9]

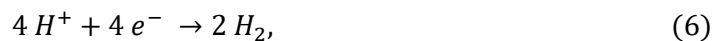
Alkalisessa elektrolyysissä vesi hapettuu emäksisessä liuoksessa muodostaen hydroksidi-ioneja reaktioiden 3, 4 ja 5 mukaisesti (kuva 4) [12]. Elektrolyyttinä alkalisisessa elektrolyysissä yleensä on 25–30-prosenttinen kaliumhydroksidiliuos (KOH) [19]. Elektroneina käytetään usein nikkeliä, Ni, tai rautaa, Fe, anodilla ja nikkelseoksia katodilla [20]. Elektrodeja erottava kalvo on huokoista materiaalia, minkä tarkoitus on päästää hydroksidi-ionit lävitseen, mutta erottaa vety hapesta [18].



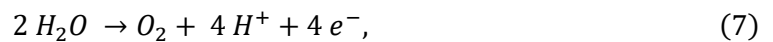
Kuva 4. Alkalinen elektrolyysi, muokattu lähteestä [12]

Alkalinen elektrolyysi on vanhin teollisesti käytetty elektrolyysimenetelmä. Alkalinen elektrolysaattori (AEC, engl. Alkaline electrolysis cell) vaatii jopa 20 minuuttia käynnistymiseen, mutta elektrolysaattorin ollessa yli 30 °C (C, celsius) lämpötilassa käynnistyminen voi olla mahdollista sekunneissa. Käyttöikään vaikuttaa etenkin laitteen koko sekä käytetäänkö laitetta jatkuva- vai osa-aikaisesti. Laitteisto kestää näin ollen 50000–90000 tuntia (h, tunti). AEC:lla on mahdollista saavuttaa jopa useiden megawattien teho. [18]

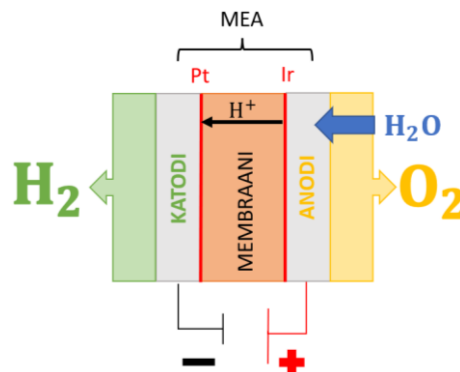
Veden pelkistymiseen perustuvassa elektrolyysissä katodilla tapahtuu reaktio



jossa vetyionit, H^+ , reagoivat happoliuoksessa elektronien kanssa muodostaen vetykaasua. Samanaikaisesti anodilla tapahtuu veden pelkistymisreaktio



jossa vesimolekyylit hajoavat happikaasuksi, vetyioneiksi ja elektroneiksi. Reaktioiden 6 ja 7 kokonaisreaktioiksi saadaan reaktio 5. [9] Kiinteäpolymeerielektrolyysi eli PEM-elektrolyysi perustuu veden pelkistymiseen reaktioiden 5, 6 ja 7 mukaisesti. Anodille tuotu vesi hajoaa vetyioneiksi ja hapeksi. Vetyionit pääsevät siirtymään membraanin läpi katodille, jossa ne reagoivat elektronien kanssa muodostaen vetykaasua. (Kuva 5) [12]



Kuva 5. Kiinteäpolymeerielektrolyysi, muokattu lähteistä [12], [20]

Kiinteäpolymeerielektrolyysissä eli PEM-elektrolyysissä (engl. Polymer Electrolyte Membrane) anodin ja katodin erottava membraani on päällystetty molemmiin puolin katalyytillä, joka on usein katodin puolella platinaa, Pt ja anodin puolella joko iridiumia Ir tai

ruteniumia, Ru. Katalyyteilla päällystettyä membraani ja elektrodien kokonaisuutta kutsutaan MEA:ksi (membrane-electrode assembly, suom. kalvoelektrodi) (Kuva 5). Vanhin käytetty membraanimateriaali on Nafion®, joka on perfluorisulfonihappolla (PFSA, Perfluorosulfonic acid) tai polytetrafluorieteenillä stabilisoitu happomuodossa oleva komposiittikopolymeeri. Vedyn tuotanto kasvaa lämpötilan noustessa, mutta PEM-elektrolyysi toimii yleensä lämpötilassa 70–90°C. PEM-elektrolysaattori (PEMEC, engl. Polymer Electrolyte Membrane fuel cell) on AEC:ia kalliimpi, koska sillä on monimutkaisempi rakenne ja komponentit ovat hyvin spesifisiä. [18]

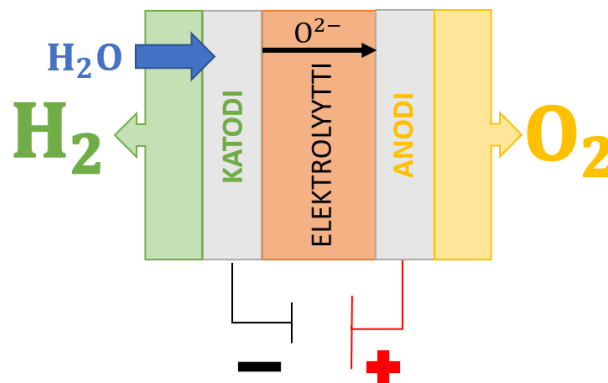
Veden hapettumiseen perustuvassa elektrolyysissä katodilla voi tapahtua myös reaktio



jossa vesi reagoi elektronien kanssa muodostaen vetykaasua ja oksidi-ioneja, O^{2-} . Samanaikaisesti tapahtuu anodireaktio



jossa oksidi-ioneista syntyy happikaasua ja elektroneja. Reaktioiden 8 ja 9 kokonaisreaktioksi saadaan reaktio 5. Reaktioiden 5, 8 ja 9 mukaisesti toimivassa kiinteäoksidi-elektrolyysissä varauksenkuljettajana on oksidi-ioni (kuva 6). Vettä tuodaan katodille, jossa se hajoaa oksidi-ioneiksi ja vedyksi. Oksidi-ionit pääsevät kiinteään elektrolyytin lävitse anodille, jossa ne luovuttavat elektroneja muodostaen happikaasua.



Kuva 6. Kiinteäoksidi-elektrolyysi, muokattu lähteistä [12], [20]

Kiinteäoksidi-elektrolysaattorissa (SOEC, engl. Solid oxide electrolysis cell) elektrolyytinä voidaan käyttää eri tavoin stabilisoituja zirkoniumoksiedeja [19]. SOEC:issa on kiinteä elektrolyytti, joka on zirkoniumilla ja yttriumilla stabiloitu sekaoksidi (YSZ, engl. yttria stabilized zirconia). Oksidi-ionit pääsevät elektrolyytin lävitse anodille, joka on lantaanin, strontiumin ja mangaanin (LSM) sekaoksidi. Katodi on YSZ:n ja nikkelin seosta. [18]

Taulukko 1 kokoaa edellä esitettyjen elektrolyysityyppien tiedot sekä vertailee niitä toisiinsa. Vertailussa on mukana elektrolysaattorien keskeiset ominaisuudet kuten

hyötysuhde, toimintaikä sekä vahvuudet ja heikkoudet. Pääomakustannukset on ilmoitettu Yhdysvaltain dollareissa (USD) kilowattiatuntia (kWh) kohden.

Taulukko 1. Elektrolyysityyppien vertailu, muokattu lähteistä [18], [21], [22]

Elektrolyysaattorityyppi	AEC	PEMEC	SOEC
Elektrolyytti	KOH	Membraani	Kiinteä
Varauksenkuljettaja	Hydroksidi-ioni	Vetyioni	Oksidi-ioni
Elektrodit	Ni/Fe	Pt, Ir, Ru	Sekaoksidit
Paine	< 30 bar	< 200 bar	< 20 bar
Vedyn puhtaus	> 99,5 %	> 99,99 %	> 99,9 %
Toimintalämpötila	40–90°C	20–100°C	600–800°C
Systeemin hyötysuhde (vuosi 2020)	63–70 %	56–63 %	74–81 %
Toimintaikä (vuosi 2020)	50000–90000 h	30000–60000 h	10000–30000 h
Pääomakustannukset	880–1650 USD/kW	1540–2550 USD/kW	> 2000 USD/kW
Vahvuudet	Matalat pääomakustannukset, vakaa toiminta	Vedyn puhtaus, nopea käynnistys, kompakti järjestelmä	Korkea hyötysuhde
Heikkoudet	Syövyttävä järjestelmä, matala vedyn puhtausaste, hidas käynnistys	Membraanin ja elektrodien korkeat kustannukset, korkea paine, hapan	Epävakaus aiheuttaa turvallisuuskongelmia

Kiinteäoksidielektrolyysissä päästään alkalista elektrolyysiä ja kiinteäpolymeerielektrolyysiä korkeampiin hyötysuhteisiin. Toisaalta SOEC vaatii korkeamman lämpötilan ja toimintaikä on matala. PEMEC kestää huomattavasti korkeampia paineita kuin muut ja sillä saadaan paras puhtausprosentti vedylle. AEC on pääomakustannuksiltaan halvin vaihtoehto. Jokaisella elektrolyysaattorityypillä on omat vahvuudet ja heikkoudet. Näin ollen on tapauskohtaista, mikä on kuhunkin kohteeseen paras elektrolyysaattori. Teknologian

kehittyessä ja mahdollisen massatuotannon alkaessa ominaisuudet kehittyvät, hyötysuhteet parantuvat sekä kustannukset laskevat. [18], [21], [22]

3.2 Vedyn varastointiteknologiat

Vaihtoehtoja energian pitkäaikaiseen varastointiin on vähän. Energian varastointia vetykaasuun ja sen vapauttamista takaisin energiaksi, kutsutaan power-to-gas-to-power-toimintaperiaatteeksi (P2G2P, suom. tehosta kaasuksi ja takaisin). Vety soveltuu energian pitkäaikaiseen varastointiin, mutta vielä tällä hetkellä vedyn P2G2P-systeemeillä on matala hyötysuhde. Hyötysuhteeksi saadaan 15–40 %, joten energian muuntamisessa muodosta toiseen energiaa häviää 60–85 %. [1]

Vetyä voidaan varastoida kaikissa kolmessa olomuodossa: paineistettuna kaasuna, nestemäisenä sekä kiinteänä sitoutuneena metalliyhdisteiden kidehilan eli metallihydriidiin. Vety pystyy sitomaan paljon energiaa massaansa nähden, mutta vähän tilavuuteensa nähden. Tätä voidaan parantaa puristamalla vety korkeaan paineeseen tai nesteyttämällä vetykaasu. Vedyn varastointiin voidaan käyttää myös fysikaalista adsorptiota eli fyysisorptiota tai kemikaalista adsorptiota eli kemisorptiota. [1]

3.2.1 Paineistettu vety

Paineistettu vety valmistetaan puristamalla elektrolyysistä saatu vetykaasu. Se on yleisin ja yksinkertaisin tapa varastoida vetyä. Kun vety puristetaan 700 baarin (bar, baari) paineeseen, energiasisältö on 1,3 kWh/l ((l, litra). Energiasisällöksi saadaan 0,8 kWh/l 350 bar paineessa. [1] Mitä suurempi paine, sitä pienempään tilaan vetykaasu pakkautuu. Esimerkiksi 200 bar paineessa 7 kg vetykaasu vie tilavuutta 500 l, mutta sama määrä vetyä 700 bar paineessa vaatii vain 194 l. Toisaalta varastointiin tarvittu säiliön massa kasvaa, jotta se kestää korkeamman paineen. Kun varastoidaan 7 kg vetykaasua 200 bar paineessa, tarvitaan 80 kg painoinen säiliö. Paineen ollessa 700 bar säiliön massa on 120 kg. [18]

Vedyn paineistamiseen voidaan käyttää mäntä-, kalvo-, ioni- tai lämpökompessoria. Mäntäkompressorilla vedyn paineistamiseen voidaan käyttää joko yhtä tai useampaa mäntää. Kalvokompressorissa mäntä liikuttaa kalvoa, joka puristaa vetykaasua. Mäntä- ja kalvokompressoireilla voidaan saavuttaa jopa 1000 bar paine. Ionikompressorin perustuu kaasun puristamiseen puristumattomalla ioninesteellä. Viiden vaiheen ionikompressorilla voidaan saavuttaa 900 bar paine. Ionikompressorin etu on sen pieni koko. Lämpökompessorin paineistaa kaasua ensin matalassa ja sen jälkeen korkeassa lämpötilassa. Lämpökompressorissa on huomattavasti vähemmän liikkuvia osia venttiilien

ulkopuolella verrattuna muihin kompressoreihin. Lämpökompessorissa on hiljainen ääni ja niistä on tulossa yhä pienempiä. [18]

Paineistettu vety on melko halpa tapa varastoida vetyä. Energiatiheys tilavuutta kohden on kuitenkin matala verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. [1] Esimerkiksi nestemäisen maakaasun energiatiheys on 5,8 kWh/l ja bensiinin 8,8 kWh/l [10]. Paineistetulla vedyllä se taas on 0,8–1,3 kWh/l. Lisäksi turvallisuus tulee ottaa huomioon korkeissa paineissa. [1] Paineistettua vetyä voidaan varastoida erilaisten säiliöiden lisäksi esimerkiksi luoliin [18].

3.2.2 Nestemäinen vety

Vedyn saaminen nestemäiseksi vaatii usean vaiheen prosessin. Yksinkertaisin tapa saada vety nesteytettyä on Joule-Thompsonin-menetelmä, jossa vedyn nesteyttäminen alkaa vedyn paineistamisella. Tämän jälkeen se jäähdytetään -196°C lämpötilassa nestemäisten typenvaihtimien avulla. Seuraavaksi vety kuristetaan paisuntaventtiilien läpi, jolloin osa vedystä nesteytyy. Kaasumuotoon jäänyt vety palautetaan takaisin paineistukseen ja vaiheet toistetaan. Nestemäisessä muodossa oleva vety varastoidaan lämpöeristettyyn säiliöön. [18]

Vuonna 2020 vedyn nesteyttämisen energian kulutus on ollut 10 kWh jokaista vedyn kilogrammaa kohden. Jos tuotanto on laajamittaista, on mahdollista saada kulutukseksi vain 6 kWh. [23] Nestemäinen vety sisältää huomattavasti enemmän energiaa tilavuutta kohti kuin paineistettu vety [18]. Nestemäisen vedyn energiasisältö on 2.2. kWh/l 2 bar paineessa [10]. Silti nestemäinen vety on kaukana fossiilisten polttoaineiden energiatiheydestä. Nestemäisen vedyn kustannukset ovat korkeat ja se ei ole hyvä pitkäaikainen energiavarasto. [1] Lisäksi häviöitä syntyy haihtumisessa ja kryogeeninen vety vaatii eristetyt säiliöt matalan lämpötilan takia [18].

3.2.3 Hybridit

Vedyn adsorptio perustuu siihen, että vety hajoaa kidehilan rakenteeseen, jolloin syntyy hydridi. Hydridi tarkoittaa kemiallista yhdistettä, jossa vety on anionina H^- . Vedyn adsorptiota voi tapahtua metallin tai seoksen pinnalla. Näin ollen erilaiset hybridit voivat varastoida vetyä ja vety saadaan vapautettua kuumentamalla. [18]

Fysisorptiossa vetykaasumolekyylit adsorptoidaan kiinteä materiaalin pinnalle. Kiinteä materiaali on yleensä hiilipohjainen tai orgaaninen metalli. Fysisorptiota käytettäessä hyviä puolia ovat systeemin yksinkertaisuus, matala paine ja materiaalien matala hinta.

Kuitenkin vedyn tiheys hiilessä on matala ja lisäksi systeemiltä vaaditaan alhaista lämpötilaa. [1]

Vety voidaan myös varastoida kemisorptiolla metallihydrideihin. Vetykaasu adsorptoidaan metallipulveriin, joka on puhdasta metallia tai metalliseosta. Kemisorptiossa vapautuu lämpöä ja vetykaasun vapauttamiseen metallihydridistä tarvitaan lämpöä. [1] Metallihydridin voi muodostaa esimerkiksi magnesium ja vety, jolloin syntyy magnesiumhydridi, MgH_2 [18]. Metallihydrideissä vedyn osuus painosta on matala. [1] Esimerkiksi magnesiumhydridin tapauksessa vetyä voi olla 7,6 % massasta [18].

3.2.4 Muut vetyvarastot

Yllä esitettyjen menetelmien lisäksi vetyä voidaan varastoida erilaisiin maanalaisiin luoliin esimerkiksi suolaluoliin, kallioluoliin sekä köyhdytettyihin kaasukenttiin [24]. Suolaluolia on jo tänä päivänä käytössä, mutta kaksi muuta menetelmää ovat tulevaisuuden mahdollisuuksia [22].

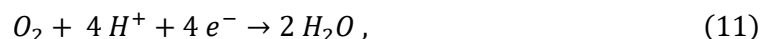
3.3 Vedyn konvertointi sähköksi

Vedyn muuttamisesta takaisin energiaksi voidaan käyttää termiä hydrogen-to-power (H2P, suom. vedystä tehoksi). Vedyn konvertointiin voidaan käyttää polttokennoja tai lämmön ja sähkön yhteistuotantoyksiköitä (CHP, engl. combined heat and power). [18]

Polttokenno toimii vastakkaisella tavalla kuin elektrolysaattori [6]. Kemiallisessa reaktiossa vapautuu lämpöenergiaa, kun happi- ja vetymolekyylit muodostavat vettä spontaanissa reaktiossa. Vetypolttokennoja on useanlaisia samaan tapaan kuin elektrolysaattoreitakin. Polttokennoissa anodilla ja katodilla voi tapahtua hapetus- ja pelkistysreaktioita. Usein käytetään polttokennoja, joissa H^+ -ionit ovat varauksenkuljettajina. Tällöin anodilla tapahtuu reaktio



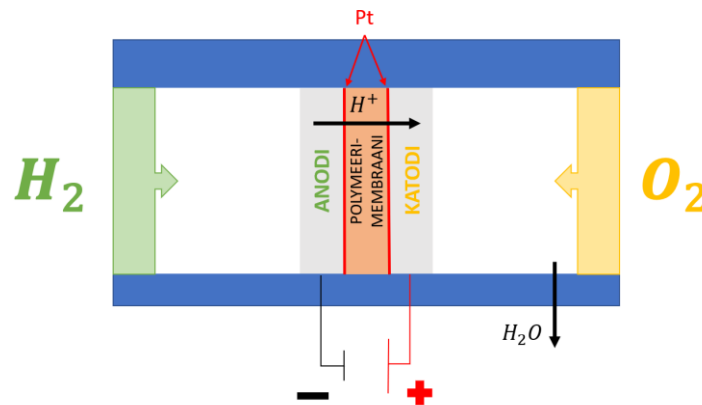
jossa vetykaasu hapettuu vapauttaen elektroneja, H^+ -ioneja sekä lämpöenergiaa. Samanaikaisesti tapahtuu katodireaktio



jossa happikaasu reagoi vetyionien ja elektronien kanssa muodostaen vettä. Reaktioiden 10 ja 11 kokonaisreaktioksi saadaan

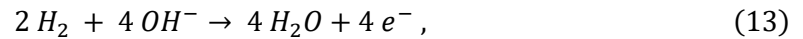


jossa happi- ja vetykaasusta syntyy vesimolekyyliä ja lämpöä. PEM-polttokenno eli kiinteäpolymeerikemmo (PEMFC, engl. Polymer Electrolyte Membrane fuel cell) toimii reaktioiden 10, 11 ja 12 mukaisesti. [15] Myös fosforihappopolttokemmo (PAFC, engl. Phosphoric acid fuel cell) toimii samojen yhtälöiden mukaisesti. PEMFC:ssä elektrodien, katalyyttien ja membraanin kokonaisuutta kutsutaan MEA:ksi kuten PEMEC:ssäkin (kuva 7). PEMFC koostuu hiilielektrodeista, jotka on päällystetty katalyyttina toimivalla platinaseoksella. Vetykaasua syötetään anodille, jossa se hajoaa vetyioneiksi ja elektroneiksi. Kiinteäpolymeerielektrolyytti mahdollistaa vetyionien kulkeutumisen katodille, jossa vetyionit reagoivat happikaasun kanssa muodostaen vettä. [25]

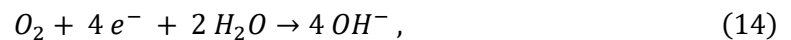


Kuva 7. Kiinteäpolymeeripolttokemmo, muokattu lähteistä [15], [25]

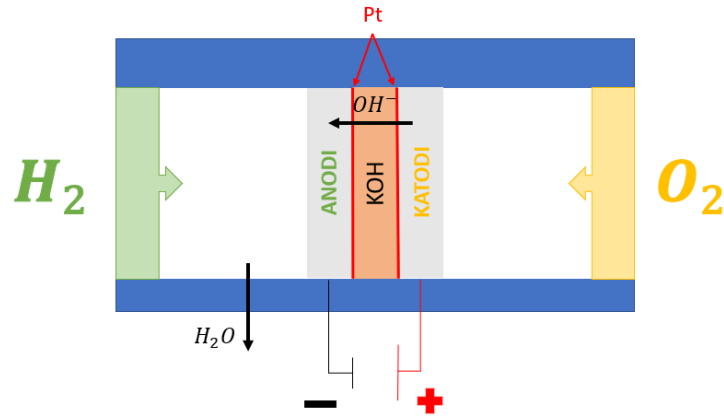
Varauksenkuljettajina voivat toimia myös OH^- -ionit. Tällöin anodireaktioksi saadaan



jossa hydroksidi-ionit reagoivat vetykaasun kanssa muodostaen vesimolekyyliä ja samalla vapautuu elektroneja ja lämpöenergiaa. Yhtäaikaista katodilla tapahtuvaksi reaktioksi saadaan

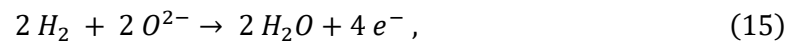


jossa happikaasu reagoi elektronien kanssa veden läsnä ollessa, jolloin syntyy hydroksidi-ioneja. Reaktioiden 13 ja 14 kokonaisreaktioksi saadaan sama reaktioyhtälö kuin kaavassa 12 vetyionien ollessa varauksenkuljettajina. Tällä tavalla toimii esimerkiksi alkalinen polttokemmo (AFC, engl. Alkaline fuel cell). [15] AFC koostuu nikkeli- tai hiilielektrodeista ja katalyyttinä käytetään joko platinaa tai epäjalometallia (kuva 8). Elektrolyytinä reaktiossa toimii kaliumhydroksidin vesiliuosta. AFC:n toimintalämpötila riippuu kaliumhydroksidin konsentraatiosta. [25]



Kuva 8. Alkalinen polttokenno, muokattu lähteistä [15], [25]

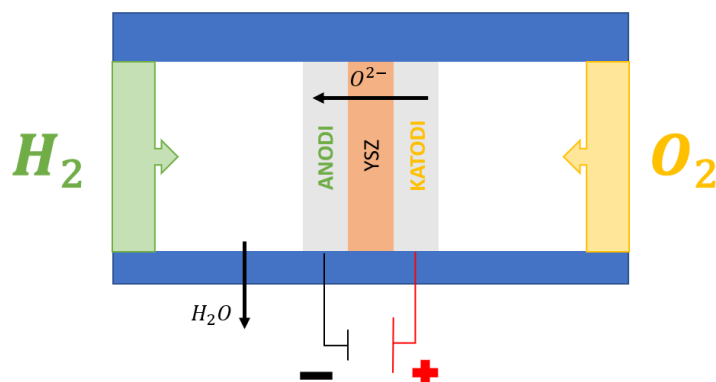
Kolmantena polttokennotyyppinä ovat polttokennot, joissa O^{2-} -ionit ovat varauksenkuljettajina, anodireaktioksi saadaan



jossa oksidi-ionit reagoivat vetykaasun kanssa muodostaen vesimolekyylejä ja samalla vapautuu elektroneja ja lämpöenergiaa. Yhtäaikaaisesti katodilla tapahtuvaksi reaktioksi saadaan



jossa happikaasu reagoi elektronien kanssa, jolloin syntyy oksidi-ioneja. Reaktioiden 15 ja 16 kokonaisreaktioksi saadaan sama reaktioyhtälö kuin kaavassa 12. Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC, engl. solid-oxide fuel cell) toimii reaktioiden 12, 15 ja 16 mukaisesti (kuva 9). [15] SOFC:n elektrolyyttimateriaalina käytetään kiinteää keraamista materiaalia, joka on usein YSZ. Se kuljettaa hyvin oksidi-ioneja. Anodi on nikkelin ja YSZ:n seosta, kun taas katodi on oksidiseosta. [25]



Kuva 9. Kiinteäoksidipolttokenno, muokattu lähteistä [15], [25]

Kehityksessä ovat kiinteäoksidikennot, jotka voisivat toimia sekä elektrolyysiaattoreina että polttokennoina. Näiden reversiibelien eli molempiin suuntiin toimivien kennojen

hyötysuhteeksi saadaan 55 %. [18] Molempiin suuntiin toimiminen olisi todennäköisesti taloudellisesti hyvin kannattavaa, sillä kahden laitteiston sijaan tarvittaisiin vain yhtä. Tällaista reversiibeliä laitteistoa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi energian ylijäämävarastoissa, koska niissä ei olisi tarvetta varastoida ja vapauttaa energiaa yhtä aikaa.

Polttokennoissa päästään samoihin hyötysuhteisiin polttokennojärjestelmän koosta riippumatta. Tämä mahdollistaa tulevaisuudessa pienet polttokennosysteemit. [15] Polttokennon hyötysuhdetta voidaan parantaa hyödyntämällä kemiallisessa reaktiossa syntyvän sähkön lisäksi lämpö. Tällaista tuotantoa kutsutaan sähkön ja lämmön yhteistuotannoksi. [6] Vety-polttokennon yhteistuotannon hyötysuhteeksi voidaan saada jopa 90 % [26]. Pelkästään polttokennoja käytettäessä hyötysuhde on parhaimmillaan 60 % [18].

Polttokennojen hyötysuhteita sekä yhteistuotannon hyötysuhteita on vertailtu taulukossa 2. Taulukossa on myös esiteltyä eri polttokennojen toimintalämpötilat. Polttokennot voidaan jakaa matalan ja korkean toimintalämpötilan polttokennoihin. Sulakarbonaatti- ja kiinteäoksidipolttokennot kuuluvat korkean lämpötilan polttokennoihin. Alkalinen, protoninvaihto- ja suorametanolipolttokennot ovat matalan lämpötilan polttokennoja. [26]

Taulukko 2. Tärkeimpiä polttokennotyyppejä, muokattu lähteestä [26]

Polttokennotyyppi	Toimintalämpötila (°C)	Hyötysuhde (%)	Yhteistuotannon hyötysuhde (%)
AFC	90–100	60	> 80
PEMFC	50–100	53–58	70–90
SOFC	600–1000	35–43	< 90

Polttokennojen hyviä puolia ovat luotettavuus, päästöttömyys ja matala äänitaso. Luotettavuus ja pitkäikäisyys perustuvat polttokennon yksinkertaisuuteen, sillä polttokennoissa on hyvin vähän tai ei ollenkaan liikkuvia osia. [6], [15] Matalan toimintalämpötilan polttokennoissa on nopeat käynnistymisaajat [18]. Puhdasta vetyä poltettaessa ei synny hiilidioksidipäästöjä, sillä ainoa sivutuote on vesi [6]. Kuitenkin lähes aina vedyn tuottamisessa esiintyy vähintään hieman hiilidioksidipäästöjä, joten harvoin vetypolttokennot ovat täysin päästöttömiä [15]. Haasteina polttokennoissa on hitaat reaktionopeudet etenkin hapen pelkistysreaktioissa, jolloin virtakin jää matalaksi [15].

Eri polttokennotyypeillä on omat vahvuudet ja haasteet. AFC:llä vahvuuksia ovat nopea katodireaktio ja mahdollisuus käyttää erilaisia katalyytteja. SOFC voi käyttää useampia katalyytteja ja kiinteää elektrolyyttiä on helpompi hallita. PEMFC:n kiinteä elektrolyytti vähentää korroosiota ja elektrolyytin hallintaongelmia. Lisäksi PEMFC:llä on matala toimintalämpötila ja nopea käynnistymisaika, jolloin se soveltuu hyvin esimerkiksi varavoiaksi. [26] Jokaisella polttokennotyypillä on lisäksi omat haasteensa. PEMFC käyttämä

platinakatalyytti ja kiinteäpolymeerimembraani ovat kalliita materiaaleja. AFC vaatii puh-
taat happi- ja vetykaasut. Lisäksi AFC saattaa tarvita KOH-elektrolyytin täydennystä.
SOFC:n tapauksessa vaikeuksia tuottavat kalliit komponentit. [25]

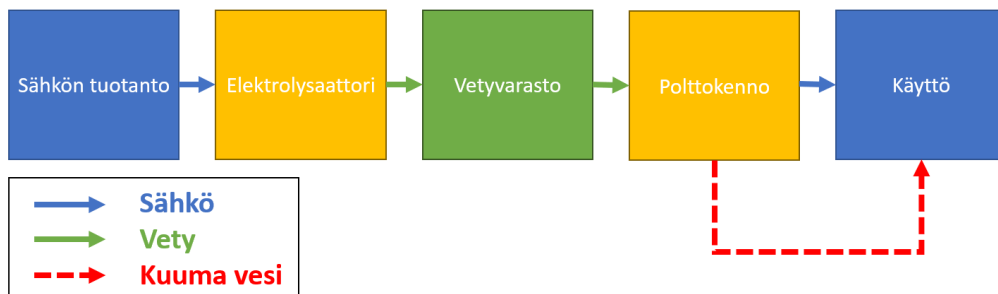
Konversioon voidaan käyttää myös kaasuturbiineja. Tällöin tulee käyttää puhdasta ve-
tyä, jolloin kaasuturbiineista polttokennojen tapaan ei synny hiilidioksidipäästöjä. [11]
Kaasuturbiinit toimivat samaan tapaan kuin ilmavirtauksesta saadaan tuulivoimalalla
sähköä. Vetykaasu pyörittää kaasuturbiinin siipiä saaden generaattorin pyörimään, jol-
loin turbiinin pyörimisenergia saadaan muutettua sähköenergiaksi. Mitä korkeampi paine
on vetykaasun paine sitä halvempaa kilowattituntia kohden tuottaa sähköä. [11] Yhdis-
tämällä polttokennot ja kaasuturbiinit voidaan saavuttaa korkeampia hyötysuhteita kuin
käyttämällä vain toista [27].

Sopivin polttokenno riippuu kohteesta. Polttokennoa valittaessa tulee huomioida eri ken-
noja vahvuudet ja heikkoudet sekä toimintalämpötila ja hyötysuhde. Tulevaisuudessa on
todennäköistä niin polttokennojen kuin kaasuturbiinienkin osalta, että hyötysuhteet nou-
sevat ja kustannukset laskevat teknologian kehittymisestä ja massatuotannosta johtuen.

4. VETYVARASTON SOVELTAMINEN AURINKO- JA TUULIVOIMAAN

Kasvihuonekaasujen vähentämiseksi tarvitaan dekarbonisaatio eli hiilestä irtautuminen. Jotta tähän pystytään, on uusiutuvilla tuotetun sähkön osuutta kasvatettava. Esimerkiksi Suomessa energiavarastoille on suuri tarve, kun aurinkosähkön osuus kasvaa. Aurinkoisimmat päivät ovat kesäisin, kun taas sähkötulutus on suurimmillaan talvisin. Jotta tämä epätasapaino saadaan korjattua, tarvitaan menetelmä energian pitkäaikaiseen varastointiin. Energian kulutuksen ja tuotannon tulee olla tasapainossa. Kun tuotanto ylittää kulutuksen, ylijäämäenergialla voidaan tuottaa vetyä [18]. Vetyä voidaan valmistaa aurinkosähkön tai tuulivoiman avulla käyttämällä elektrolyysiä [6].

Power-to-X-toimintatapa (P2X, suom. tehosta joksikin) tarkoittaa, että energia muutetaan johonkin toiseen muotoon. Aurinkosähköllä ja tuulivoimalla tuotetulla sähköllä voidaan elektrolyysissä hajottaa vettä vedyksi ja hapeksi. Tämän jälkeen vety voidaan varastoida ja käyttää myöhemmin. Jos vety muutetaan vielä takaisin sähköksi, puhutaan power-to-hydrogen-to-power-mallista (P2H2P, suom. tehosta vedyksi ja takaisin tehoksi). Tämän toteutuksesta on esimerkki kuvassa 10. Siinä uusiutuvilla tuotettu sähkö kuljetetaan sähköverkkoa pitkin elektrolysaattorille, jossa sähkön avulla vesi hajotetaan vety- ja happikaasuksi. Vetykaasu voidaan varastoida erilaisin varastointiteknologioiden avulla vetyvarastoon. Vetyvarastosta energia saadaan palautettua käyttöön polttokennon avulla. Polttokennossa vetykaasu reagoi ilmassa olevan hapen kanssa muodostaen vettä. Tässä prosessissa lopputuotteena saadaan kuumaa vettä ja sähköä. Kuumaa vettä voidaan hyödyntää esimerkiksi lämmityksessä ja sähkö voidaan syöttää takaisin sähköverkkoon.



Kuva 10. Esimerkki vetyvaraston integroimisesta sähköverkkoon, muokattu lähteestä [28]

4.1 Taloudellinen tarkastelu

Koska uusiutuvan vedyn käyttö energiavarastona on päästötöntä, mahdollistaa se varastoinnin osalta fossiilisista polttoaineista pois siirtymisen ja ilmastonmuutoksen minimoinnin [29]. Vedyn varastoimiseen liittyy myös taloudellinen puoli, kuinka energian varastoimisesta vetyyn saadaan kannattavaa. Kannattavuuteen liittyy eri vaiheiden hyötysuhteet ja erilaiset kustannukset, joita syntyy investoinneista, tarvikkeista, tuotannosta, logistiikasta ja huolloista.

Jotta vedyn P2G2P-yksikkö voidaan toteuttaa, tarvitaan elektrolysaattori, mahdollinen kompressori, vetyvarasto, mahdollinen vedyn kuljetuskalusto sekä infrastruktuuri kuten rakennukset, putket ja kaapelit. Lähtöaineiksi tarvitaan vettä ja sähköä. [18] Vedyn konversioon takaisin sähköksi tarvitaan polttokenno.

Aurinkosähköteknologia on tuulivoimateknologiaa halvempaa, mutta systeemin kokonaiskustannukset ovat lähellä toisiaan [30]. Tärkeä ominaisuus on myös vuotuinen tuotantoaika. Polttoainekustannuksia ei synny aurinko- ja tuulivoimassa, kun taas esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden tapauksessa itse polttoainekustannukset ovat merkittävä kuluerä. [18] IEA:n mukaan vedyn valmistaminen uusiutuvalla sähköllä maksaa tällä hetkellä keskimäärin 3,5–7,5 USD/kg. He ovat arvioineet, että vuonna 2030 luku on 1,3–3,5 USD/kg ja vuonna 2050 1–2,5 USD/kg. [31]

Vedyn varastoimiseen liittyy lukuisia erilaisia kustannuksia kuten tuotanto-, hankinta-, varastointi-, jakelu- ja investointikustannukset sekä markkinahinta. Suurimmat kustannukset aiheuttaa vedyn tuotanto. [29] Vuonna 2017 tehdyn arvion mukaan P2G-yksikön (Power-to-gas, suom. tehosta kaasuksi) kustannuksista puolet aiheutuu elektrolyyseristä. P2G-teknologioiden yleistyessä elektrolyyserien hinnan odotetaan laskevan huomattavasti. On arvioitu, että 1 MW PEM-elektrolyyserin hinta putoaisi vuodesta 2017 vuoteen 2030 mennessä 1,5 miljoonasta eurosta 0,55 miljoonaan euroon. [18] Vetyvaraston vahvuudet ovat nopea ja joustava energian muuntaminen. Vetyvarastoa verrattaessa akkuteknologiaan vety on taloudellisesti houkuttelevampi. [30]

Taulukossa 3 on esitetty vedyn varastointisysteemien arvioitua kehitystä vuodesta 2015 vuoteen 2050. AEC/PEMFC-sarakkeessa elektrolyysi tapahtuu AEC:lla, varastointi maanalaisessa luolassa ja vedyn konversio takaisin sähköksi PEMFC:llä. PEMEC/PEMFC-sarakkeessa ainoa muutos on, että elektrolyysissä käytössä on PEMEC. Taulukossa on huomioitu hyötysuhteiden, toimintaiän ja investointikustannuksien arvioitua kehitystä. Investointikustannukset on eritelty konversioihin tarvittaviin kustannuksiin ja varastointikustannuksiin. [24]

Taulukko 3. Vedyn varastointisysteemin arvioitu kehitys vuodesta 2015 vuoteen 2050, muokattu lähteestä [24]

Vuosi		AEC/PEMFC	PEMEC/PEMFC
2015	Hyötysuhde	29 %	29 %
	Toimintaikä (tunti)	40 000	60 000
	Investointikustannukset, konversio (USD/kW)	5800	4350
	Investointikustannukset, varasto (USD/kW)	9	9
2030	Hyötysuhde	42 %	38 %
	Toimintaikä (tunti)	75000	75000
	Investointikustannukset, konversio (USD/kW)	1620	1700
	Investointikustannukset, varasto (USD/kW)	1	1
2050	Hyötysuhde	44 %	40 %
	Toimintaikä (tunti)	75000	75000
	Investointikustannukset, konversio (USD/kW)	1300	1360
	Investointikustannukset, varasto (USD/kW)	1	1

Suurien vetymäärien kuljetukseen soveltuvat putket, painesäiliöt ja kaasupullot. Lisäksi vetyä voidaan kuljettaa nestemäisessä muodossa. On esitetty, että vety voitaisiin syöttää olemassa olevaan maakaasuverkostoon maakaasun sekaan. [18] Tämä ei kuitenkaan tee maakaasusta päästötöntä.

4.2 Hyötysuhdetarkastelu

Vedyn P2G2P-systeemeillä on edelleen matalat kokonaishyötysuhteet. Ne vaihtelevat 15–40 % välillä eli energiaa häviää 60–85 %. Tällä hetkellä on hyvin vähän muita pitkäaikaiseen varastointiin soveltuvia menetelmiä. Uusiutuvien energialähteiden osuus energian tuotannossa odotetaan kasvavan, joten myös pitkäaikaisen varastoinnin tarve tulee lisääntymään. Tämä voi mahdollistaa vetyteknologian kehittymisen sekä massatuotannon ja siten kustannusten laskun. Uusiutuvien energialähteiden tuottama vaihteleva energian saanti ja kustannusten korkeus aiheuttavat kuitenkin isoja haasteita vedyn P2G2P-systeemeille. [32]

Tyypillisesti elektrolysaattorien hyötysuhde on 60–80 % ja polttokennojen 40–60 % välillä [1]. Vetyenergiavarastosysteemin kokonaishyötysuhde riippuu käytettävästä varastointimenetelmästä. Jos vety varastoidaan kaasuna, jonka paine on matala, päästään 32 %:in kokonaishyötysuhteeseen. Kun taas paineen ollessa korkea, hyötysuhteeksi saadaan 17 %. Metallihydridivarastosysteemin hyötysuhteeksi saadaan 26 %. Systeemi käsittelee vedyn tuotannon, vetyvaraston ja polttokennon. [33] Vedyn varastointisysteemin kehitystä vuosien 2015–2050 välillä on esitetty aiemmin taulukossa 3.

Elektrolyysierissa tehokkuutta voidaan parantaa nopealla käynnistymisajalla ja mahdollisimman laajalla tehon vaihteluvälillä. Näin ollen myös pienimmätkin tehomäärät saataisiin otettua talteen. Vertailtaessa G2P-konversiotapoja (Gas-to-power, suom. kaasusta tehoksi) huomataan, että vain harva valmistaja pystyy valmistamaan korkean tehon omaavia polttokennoja. Kun polttokennoissa syntyvä lämpö otetaan talteen, saadaan kokonaishyötysuhdetta nostettua. [18]

Paineistettuun vetykaasuun varastoiminen on tällä hetkellä yleisin tapa, sillä se on teknologisesti toteutukseltaan yksinkertainen ja kustannukset ovat matalat. Haittapuolina on matala energiasisältö verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin ja lisäksi korkeisiin paineisiin liittyy myös turvallisuuskysymyksiä. Vetyä voidaan myös varastoida nestemäisessä muodossa, mikä on tilavuuteen suhteutettuna tehokkaampi tapa varastoida vetyä kuin paineistettu kaasu. [32]

Vetyvarastosysteemien kokonaishyötysuhteissa ei päästä akkujen hyötysuhteisiin. Esimerkiksi litiumioniakkujen hyötysuhteet ovat yli 90 %. Akkujen kohdalla haittapuolena on niiden itsepurkautumisajat. Tästä johtuen akut eivät sovellu hyvin pitkäaikaisiksi energia-varastoiksi. Vetyvarastot mahdollistavat energian pitkäaikaisen varastoinnin, sillä niissä ei tapahdu lähes ollenkaan vedyn menetystä. Usein kuitenkin parhaisiin tuloksiin päästää hybridivarastoilla, joissa käytetään sekä vetyä että akkuja. [1] Kun muodostetaan hybridisysteemi akuista ja vetyvarastosta, saadaan mahdollisuus hyödyntää akkujen hyvää hyötysuhde ja vedyn kyky säilyttää energiasisältö pitkään [32].

Vedyn varastoimisessa tulee ottaa huomioon useampi hyötysuhde: millä hyötysuhteella vety on tuotettu, mikä on varaston hyötysuhde ja millä hyötysuhteella vety saadaan muutettua. Tuottamalla vetyä elektrolyysillä ja muuntamalla polttokennon avulla vety takaisin sähköksi, kokonaishyötysuhteeksi saadaan noin 25 %. Tämä on saatu yhdistämällä menetelmien hyötysuhteet: elektrolyysi noin 70 %, vedyn paineistus ja kuljetus 80 % ja polttokennon toiminta 45 %. Lukuja voidaan verrata esimerkiksi sähköautojen akkuihin. Kokonaishyötysuhteeksi saadaan noin 70 %, kun sähkönsiirron hyötysuhde on 90 %, akkujen lataaminen 85 % ja itse autolla ajaminen 90 %. [6] Sähkön varastoiminen vetyyn on hyvin kaukana kannattavuudesta verrattaessa sähköautoihin. Kuitenkin kun tulevaisuudessa saadaan parannettua konversioprosesseja eli elektrolyysiä ja polttokennoja, saadaan vetyvarastojen kokonaishyötysuhde nostettua kannattavalle tasolle.

Teoriassa ihanteellisin vaihtoehto olisi, että kaikki ylijäämäenergia saataisiin varastoitua. P2G2P-konseptissa tehokkainta ei välttämättä ole löytää laitteita ja menetelmiä, joilla on parhaat hyötysuhteet. Kannattavinta on löytää ratkaisut, joiden avulla voidaan maksimoida ylijäämäenergian talteenotto ja minimoida konversioissa syntyvät häviöt. Lisäksi

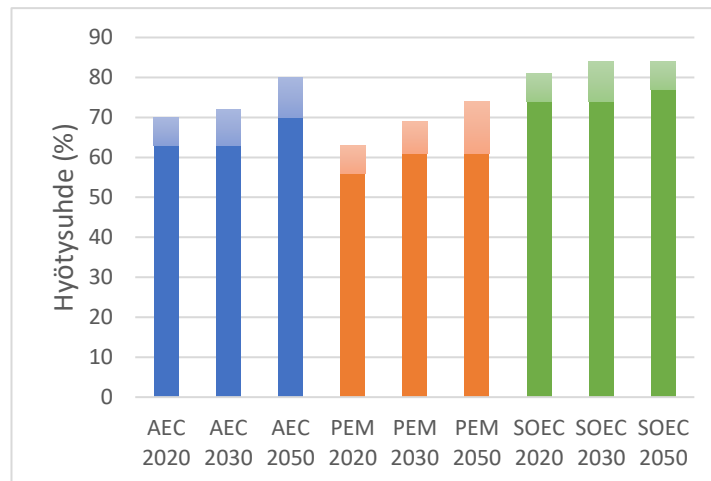
optimoinnissa on otettava huomioon taloudelliset tekijät, kuten investoinnit ja sähkön hinta. [18]

4.3 Tulevaisuuden näkymät

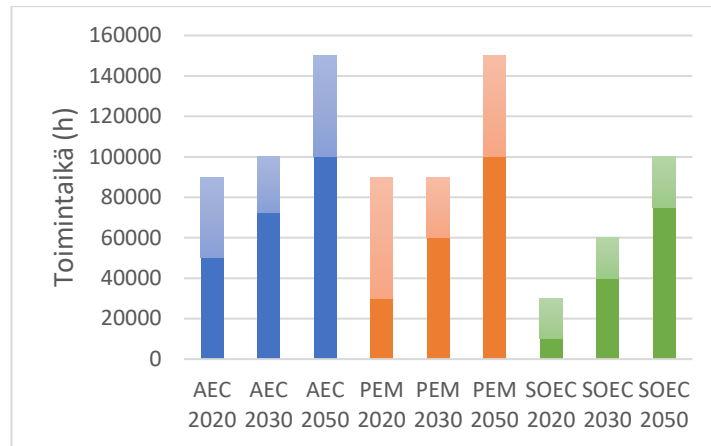
Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön osuuden kasvaessa yli 30 %:iin, sähköverkon stabiilisuus kärsii [1]. Tämän takia energiavarastoiden integroiminen sähköverkkoon olisi tärkeää, jotta sähköverkon stabiilisuus saadaan pidettyä vakaana huolimatta aurinkosähkön ja tuulivoiman osuuksien kasvusta [28].

Euroopan komissio julkaisi vuonna 2020 ilmastoneutraalin Euroopan vetystrategian. Tavoitteena on asentaa vähintään 6 GW (gigawatti) uusiutuvan vedyn elektrolysaattoria vuoteen 2024 mennessä ja 40 GW vuoteen 2030 mennessä. [22]

Kuva 11 esittää aiemmin esitetyille elektrolyysereille odotetun hyötysuhteen parantumisen vuosien 2020–2050 välillä. Kuva 12 esittää elektrolyyserien toimintaiän samalla aikavälillä. Molemmissa taulukoissa on vaaleammalla värillä ilmaistuna vaihteluväli, jolla toimintaiän ja hyötysuhteen odotetaan olevan.



Kuva 11. Ennustus elektrolyyserien hyötysuhteen kehitykselle vuosina 2020–2050, muokattu lähteestä [22]



Kuva 12. Ennustus elektrolyyserien toimintaiän kehitykselle vuosina 2020–2050, muokattu lähteestä [22]

Kuvista 11 ja 12 nähdään, että tulevien vuosien aikana elektrolyserit kehittyvät yhä kannattavimmiksi ja nämä mahdollistavat elektrolyysereillä tuotetun vedyn hinnan laskun. Elektrolysaattorien kehittyessä myös polttokennot kehittyvät. Kustannuksia voi pienentää myös kehityksessä olevat reversiibelit kennot, jotka voisivat toimia elektrolysaattorina ja polttokennona. Myös tuuli- ja aurinkovoiman aiheuttamien kulujen suhteessa tuotettuun energiamäärään odotetaan pienentyvän vuosien 2020–2050 välillä [22]. Näin ollen energian varastoisesta vetyyn tulee yhä kannattavampaa. Aiemmin oleva taulukko 3 esittelee arvioitua vedyn varastointisysteemien kehitystä vuosien 2015–2050 välillä. Myös taulukko 3 tukee kannattavuuden kasvua ajan myötä.

5. YHTEENVETO

Tulevaisuudessa tullaan tarvitsemaan erilaisia energian varastointimenetelmiä, jotta uusiutuviin energialähteisiin siirtyminen on mahdollista. Uusiutuviin energialähteisiin liittyvät vuorokauden ja vuodenajan sekä sääolojen vaihteluiden aiheuttamat ongelmat voidaan ratkaista varastoinnilla. Vedyn käyttäminen varastoinnin väliaineena on yksi varteenotettava vaihtoehto. Tämä kirjallisuusselvitys tarkastelee aurinko- ja tuulisähköllä tuotettua vetyä ja sen muuttamista takaisin sähköksi.

Aurinkosähkön tuottaminen perustuu epäpuhtaista puolijohdekomponenteista koostuvien aurinkokennojen toimintaan. Auringon valo luovuttaa energiaa n-tyyppin puolijohteiden elektroneille, jotka täyttävät p-tyyppin aukot. Elektronien liike havaitaan sähkövirtana, kun puolijohdekomponentit on kytketty osaksi virtapiiriä. Tuulisähköä tuottaessa ilmavirtaus pyörittää tuulivoimalan lapoja, jotka edelleen pyörittävät akselia ja roottoria, jolloin syntyy sähköä.

Vetyä voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä, mutta aurinko- ja tuulisähkön avulla vetyä valmistetaan elektrolyysillä. Elektrolyysissä vesi hajoaa hapeksi ja vedyksi sähkövirran vaikutuksesta hapetus-pelkistysreaktioissa. Tämä voi tapahtua alkalisisella elektrolyysillä, kiinteäpolymeerielektrolyysillä tai kiinteäoksidielektrolyysillä.

Vetyä voidaan varastoida nestemäisenä, paineistettuna kaasuna tai kiinteänä hydrideihin. Nestemäisenä varastointi vaatii 20 K lämpötilaa, kun taas paineistettuna kaasuna paineeksi halutaan jopa 700 bar. Vetyvarastot toimivat hyvin pitkäaikaisina energiavarastoina, sillä häviöt ovat yleensä hyvin pienet.

Vedyn konversio takaisin sähköksi tapahtuu polttokennojen avulla. Polttokennot toimivat päinvastaisella tavalla kuin elektrolyysilaitteisto. Polttokennoihin syötetään vetyä ja happea ja lopputuotteiksi saadaan puhdasta vettä ja sähkövirtaa. Sivutuotteena saadaan lämpöä, joka voidaan myös hyödyntää, jolloin puhutaan yhteistuotannosta. Syntynyt sähkövirta voidaan hyödyntää esimerkiksi kulkuneuvoissa tai se voidaan syöttää sähköverkkoon.

P2G2P-teknologioiden kehittyminen on isossa roolissa pyrittäessä pois hiilidioksidipäästöjä aiheuttavista fossiilisista energialähteistä. Energian konversiosta vedyksi ja takaisin tulee yhtä halvempaa, kun elektrolyysit ja polttokennot yleistyvät. Energiavarastoja tarvitaan tasaamaan uusiutuvien jaksottaista tuotantoa sekä mahdollistamaan sen, että energia ei lopu kulutushuippujen aikaan.

LÄHTEET

- [1] T. Egeland-Eriksen, A. Hajizadeh, and S. Sartori, “Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 46, no. 63, pp. 31963–31983, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.218.
- [2] S. Bennoua, A. le Duigou, M.-M. Quéméré, and S. Dautremont, “Role of hydrogen in resolving electricity grid issues,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 40, no. 23, pp. 7231–7245, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.137.
- [3] M. E. Mackay, “Solar Energy An Introduction.” OUP Oxford, Oxford, 2015.
- [4] H. Li, Y. Lian, X. Wang, W. Ma, and L. Zhao, “Solar constant values for estimating solar radiation,” *Energy (Oxford)*, vol. 36, no. 3, pp. 1785–1789, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.12.050.
- [5] D. D. Chiras, “Power from the sun : a practical guide to solar electricity.” New Society Publishers, Gabriola Island, BC, 2017.
- [6] J. Andrews, “Energy science : principles, technologies, and impacts.” Oxford University Press, New York, NY, United States of America, 2017.
- [7] Vaughn. Nelson, “Introduction to renewable energy.” Taylor & Francis, Boca Raton, 2011.
- [8] A. Mathern, C. von der Haar, and S. Marx, “Concrete support structures for offshore wind turbines: Current status, challenges, and future trends,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 7, p. 1995, 2021, doi: 10.3390/en14071995.
- [9] A. Godula-Jopek, D. Stolten, and C. Bourasseau, “Hydrogen production : by electrolysis.” WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2015.
- [10] M. Hirscher, *Handbook of Hydrogen Storage*, 1. Aufl. Wiley-VCH, 2010.
- [11] Y. Koc, H. Yagli, A. Goerguelue, and A. Koc, “Analysing the performance, fuel cost and emission parameters of the 50 MW simple and recuperative gas turbine cycles using natural gas and hydrogen as fuel,” *International journal of hydrogen energy*, vol. 45, no. 41, pp. 22138–22147, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.267.
- [12] E. Karatairi and S. Sartori, “Reviving hydrogen as an energy carrier,” *MRS bulletin*, vol. 45, no. 6, pp. 424–426, 2020, doi: 10.1557/mrs.2020.157.
- [13] Z. Wang, R. R. Roberts, G. F. Naterer, and K. S. Gabriel, “Comparison of thermochemical, electrolytic, photoelectrolytic and photochemical solar-to-hydrogen production technologies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 21, pp. 16287–16301, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2012.03.057.
- [14] S. Li, Q. Kang, J. Baeyens, H. L. Zhang, and Y. M. Deng, “Hydrogen Production: State of Technology,” in *IOP conference series. Earth and environmental science*, 2020, vol. 544, no. 1, p. 12011. doi: 10.1088/1755-1315/544/1/012011.
- [15] A. L. Dicks, “Fuel cell systems explained.” Wiley, Hoboken, New Jersey ;, 2018.
- [16] T. Abbasi and S. A. Abbasi, “‘Renewable’ hydrogen: Prospects and challenges,” *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 6, pp. 3034–3040, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.02.026.
- [17] A. Godula-Jopek, D. Stolten, and C. Bourasseau, “Hydrogen production : by electrolysis.” WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2015.
- [18] M. Boudellal, “Power-to-gas : renewable hydrogen economy.” De Gruyter, Berlin, [Germany] ;, 2018. doi: 10.1515/9783110559811.
- [19] L. M. Gandia, Gurutze. Arzamendi, and P. M. Diéguez, “Renewable hydrogen technologies production, purification, storage, applications and safety.” Elsevier, Amsterdam, 2013.
- [20] F. M. Sapountzi, J. M. Gracia, C. J. (Kees-J. Weststrate, H. O. A. Fredriksson, and J. W. (Hans) Niemantsverdriet, “Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas,” *Progress in energy and combustion science*, vol. 58, pp. 1–35, 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2016.09.001.
- [21] N. A. Burton, R. V. Padilla, A. Rose, and H. Habibullah, “Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis,” *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 135, p. 110255, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110255.
- [22] J. Cihlar et al., *Hydrogen generation in Europe*. Luxembourg: Publications Office, 2021.

- [23] A. Peschel, "Industrial Perspective on Hydrogen Purification, Compression, Storage, and Distribution," *Fuel cells (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*, vol. 20, no. 4, pp. 385–393, 2020, doi: 10.1002/fuce.201900235.
- [24] International Energy Agency, "Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells," 2015. Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e669e0b6-148c-4d5c-816b-a7661301fa96/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>
- [25] R. P. O'Hayre, "Fuel cell fundamentals." Wiley, Hoboken, New Jersey, 2016.
- [26] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, "Comparative study of different fuel cell technologies," *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 981–989, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.020.
- [27] T. Kwaśniewski and M. Piwowarski, "Design Analysis of Hybrid Gas Turbine–Fuel Cell Power Plant in Stationary and Marine Applications," *Polish maritime research*, vol. 27, no. 2, pp. 107–119, 2020, doi: 10.2478/pomr-2020-0032.
- [28] S. P. S. Badwal, S. S. Giddey, C. Munnings, A. I. Bhatt, and A. F. Hollenkamp, "Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies," *Frontiers in chemistry*, vol. 2, pp. 79–79, 2014, doi: 10.3389/fchem.2014.00079.
- [29] B. C. Tashie-Lewis and S. G. Nnabuife, "Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 8, p. 100172, 2021, doi: 10.1016/j.ceja.2021.100172.
- [30] C. Chen, Y. Lu, and L. Xing, "Levelling renewable power output using hydrogen-based storage systems: A techno-economic analysis," *Journal of energy storage*, vol. 37, p. 102413, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102413.
- [31] International Energy Agency, "Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector," 2021. Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- [32] T. Egeland-Eriksen, A. Hajizadeh, and S. Sartori, "Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives," *International journal of hydrogen energy*, vol. 46, no. 63, pp. 31963–31983, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.218.
- [33] E. López González, F. Isorna Llerena, M. Silva Pérez, F. Rosa Iglesias, and J. Guerra Macho, "Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: Comparison with other electrical energy storage technologies," *International journal of hydrogen energy*, vol. 40, no. 15, pp. 5518–5525, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.181.