

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2022

Milka Keuru

ALKALI- JA PEM- TEKNOLOGIOIDEN VERTAILU ELEKTROLYYSIPROSESSISSA



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2022 | 56 sivua

Milka Keuru

Alkali- ja PEM-teknologioiden vertailu elektrolyysiprosessissa

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on alkali- ja PEM-teknologioiden vertailu elektrolyysiprosessissa. Opinnäytetyö on tehty toimeksiantona teollisuuden alan suunnittelu ja konsulttiyritykselle Sweco Industryllle. Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä. Työn tavoite on saavutettu vertailemalla alkali- ja PEM-teknologiaa SWOT-analyysin avulla. SWOT-analyysimenetelmää on käytetty vertailun välineenä toimeksiantajan toiveesta. Vertailun tavoitteena on kartoittaa elektrolyysiteknologioiden vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet sekä uhat.

Elektrolyysiteknologian valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat elektrolyyserin hyötysuhde, sähkönkulutus, hintaluokka sekä vedyn käyttökohde, tuotantolaitoksen sijainti ja alueen pinta-ala. Opinnäytetyön tuottamat SWOT-analyysit kattavat nämä osa-alueet ja kiteyttää kummallekin teknologialle ominaiset piirteet.

SWOT-analyysin tulosten pohjalta tehty päätelmä on, että koska elektrolyysiteknologian valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, paremman vaihtoehdon valitseminen alkali- ja PEM-teknologian väliltä on arvioitava tapauskohtaisesti.

Asiasanat: elektrolyysi, elektrolyysitekniikka, SWOT-analyysi, vety, vedyn tuotanto

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental engineering

2022 | 56

Milka Keuru

Comparison of alkaline and PEM technologies in electrolysis process

The objective of this bachelor's thesis was the comparison of alkaline and PEM technologies in electrolysis process. The thesis was commissioned by Sweco Industry, an industrial engineering and consultancy firm. The work was carried out as a literature review. The goal of the work was achieved by comparing alkaline and PEM technologies with a SWOT analysis. The SWOT method was used as a tool for comparison based on the commissioner's wish. The aim of this comparison was to identify the strengths, weaknesses, opportunities and threats of electrolysis technologies.

Factors influencing the choice of electrolysis technology include the efficiency of the electrolyzer, electricity consumption, price range, as well as the application aim of hydrogen, location of the production plant, and surface area of the site. The SWOT analysis covers these issues and sums up the characteristic features of both technologies.

Based on the results of the SWOT analysis, the conclusion is that since the choice of electrolysis technology is influenced by several factors, choosing a better alternative between alkaline and PEM technologies should be evaluated on a case-by-case basis.

Keywords: electrolysis, electrolysis technology, hydrogen, hydrogen production, SWOT analysis

Sisältö

Käytetyt lyhenteet	7
1 Johdanto	8
2 Vety – energiatalouden puuttuva palanen?	10
2.1 Vety	11
2.2 Vedyn käyttö	12
2.3 Vedyn tuotanto	13
2.4 Elektrolyysiteknologia	16
2.5 Veden elektrolyysi	17
2.6 Vedyn värikoodit	18
3 Alkali- ja PEM-teknologioiden esittely	20
3.1 Alkaliteknologia	20
3.1.1 Elektrolyytti	22
3.1.2 Elektrodit	22
3.1.3 Välikalvo	23
3.2 Lämpötilan ja paineen vaikutukset	23
3.3 PEM-teknologia	24
3.4 PEM-elektrolyysikennon rakenne ja toiminta	25
3.4.1 Protoninvaihtomembraani	27
3.4.2 Elektrokatalyyttikerros	28
3.4.3 Virtauskanavalevyt	30
3.4.4 Virrankerääjät	30
4 Elektrolyysiteknologioiden vertailu	32
4.1 Elektrolyysiteknologian valintaan vaikuttavat tekijät	32
4.2 SWOT – analyysi	35
4.3 Päätelmät	38
5 Tulevaisuuden näkymät	41
5.1 Alkaliteknologian kehityskohtia	41

5.2 PEM-teknologian kehityskohtia	42
5.3 Alkali- & PEM-teknologian yhteiset kehitystavoitteet	44
5.4 Tulevaisuuden haastajateknologiat	45
5.4.1 Kiinteäoksidielektrolyysikennno (SOEC)	45
5.4.2 Anioninvaihtomembraanielektrolyysi (AEM)	46
6 Yhteenveto	48
Lähteet	51

Kuvat

Kuva 1. Vedyn tuotantoteknologiat lähtöaineen mukaan. Muokattu lähteestä Nikolaidis & Poullikkas 2017.	14
Kuva 2. Elektrolyysikennon toiminta yksinkertaistettuna. Mukailtu lähteistä Antila & al. 2008; Kaila & al. 2006.	17
Kuva 3. Vedyn luokittelu väreihin tuotantotavan ja lähtöaineen mukaan. Muokattu lähteestä Schaller 2021.	19
Kuva 4. Alkalielektrolyysikennon rakenne ja toiminta. Mukailtu lähteestä Godula-Jopek 2015.	21
Kuva 5. PEM-kennon rakenne sekä toiminta yksinkertaistettuna. Muokailtu lähteestä Godula-Jopek 2015.	26
Kuva 6. Teknologioiden kehityksen vaikutukset CAPEX:iin ja OPEX:iin. Muokattu lähteestä IRENA 2020.	45

Kuviot

Kuvio 1. Vedyn kolme suurinta käyttökohdetta maailmanlaajuisesti vuosien 2000–2020 välillä. Muokattu lähteestä IEA 2021.	12
---	----

Taulukot

Taulukko 1. Yhteenveto alkali- ja PEM-teknologioiden ominaisuuksista.

Muokattu lähteestä IRENA 2020 ja Valtioneuvosto 2022. 34

Taulukko 2. Alkaliteknologian SWOT-analyysi 36

Taulukko 3. PEM-teknologian SWOT-analyysi 37

Käytetyt lyhenteet

AEL	Alkalinen elektrolyysi, <i>Alkaline electrolysis</i>
AEM	Anioninvaihtomembraani, <i>Anion exchange membrane</i>
CAPEX	Käyttöomaisuusinvestointi, <i>Capital expenditure</i>
CCS	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, <i>Carbon Capture and Sequestration</i>
CH ₄	Metaani, <i>Methane</i>
CO ₂	Hiilidioksidi, <i>Carbon dioxide</i>
EU	Euroopan Unioni, <i>European Union</i>
H ₂	Vety, <i>Hydrogen</i>
H ₂ O	Vesi, <i>Water</i>
KOH	Kaliumhydroksidi, <i>Potassium hydroxide</i>
KW	Kilowatti, <i>Kilowatt</i>
MW	Megawatti, <i>Megawatt</i>
OPEX	Toiminnalliset kulut, <i>Operational expenditure</i>
PEM	Protoninvaihtomembraani, <i>Proton exchange membrane</i>
SOEC	Kiinteäoksidielektrolyysikenno, <i>Solide oxide electrolyzer cell</i>
YK	Yhdistyneet kansakunnat, <i>United nations</i>

1 Johdanto

Vuonna 2016 astui voimaan Pariisin ilmastopöytäkirja, joka on kansainvälinen ja oikeudellisesti sitova sopimus ilmastomuutoksesta. Suomen ympäristöministeriö kuvailee sopimusta seuraavasti: ”Sopimuksen tavoite on hillitä ilmastomuutosta ja pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan ja pyrkiä toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen.”. (Ympäristöministeriö n.d.)

Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteita käytetään usein suunnannäyttäjänä kansainvälisille ja kansallisille ilmasto- ja energiaskenaarioille. Näissä maailmanlaajuisissa ilmasto- ja energiaskenaarioissa vedyn on ennustettu olevan välttämätön porras energiamurroksen aikana siirryttäessä fossiilisista polttoaineista uusiutuvan energian ja muiden energialähteiden käyttöön. Vety on monikäyttöinen alkuaine, jota voidaan käyttää raaka-aineena, polttoaineena, energiantantajana ja väliaineena energian varastoinnissa. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan korvata puhtaasti tuotetulla vedyllä useissa teollisuuden prosesseissa. Puhdasta vetyä voidaan tuottaa vedestä elektrolyysillä päästöttömän sähkön avulla, tai muilla prosesseilla biopohjaisista lähtöaineista. (Valtioneuvosto 2022.)

Ilmastoaspektin lisäksi, vedyn tuotantoon ja käyttöön liittyy poliittinen näkökulma. Opinnäytetyöprosessin aikana, helmikuussa 2022, Venäjä aloitti hyökkäyssodan Ukrainaan. Venäjä on maailman kolmanneksi suurin öljyn ja maakaasun toimittaja ja arviolta noin puolet Venäjän tuottamasta öljystä ja maakaasusta tuodaan Euroopan alueelle. Suurin osa Euroopan maista, mukaan lukien myös Suomi, ovat riippuvaisia Venäjältä tuotavista fossiilisista polttoaineista. Sodan seurauksen tapahtumien summana 21. päivä toukokuuta 2022 Venäjä lopetti maakaasun tuonnin Suomeen (Hanhinen 2022). Suomi, joka on ostanut suuren osan öljystä ja maakaasusta Venäjältä, joutuu tulevan vuoden aikana tekemään painavia ja kriittisiä päätöksiä Suomen energiatalouden osalta. Kuluneen kevään tapahtumien takia vedyn asema Suomen energiasektorilla kuin myös muualla päin Eurooppaa tulee varmasti

vahvistumaan sekä vedyn laajempi käyttöönotto nopeutumaan niin maakaasun korvaajana kuin muissa energiateknisissä sovellutuksissa.

Tämän opinnäytetyön aiheena on alkaliteknologian ja protoninvaihtomembraani, eli PEM-teknologian vertailu elektrolyysiprosessissa. Työn päätavoite on vedyn yleisimpien elektrolyysituotantomenetelmien, eli alkali- ja PEM-teknologian vertailu. Työ pohjustetaan aiheeseen esittelemällä vety ja vedyn asema nykypäivän sekä tulevaisuuden energiataloudessa niin tuotannon kuin käytön kannalta. Työssä esitellään alkali- ja PEM-teknologioiden avainominaisuuksia, rakennetta sekä toimintaa. Teknologioita vertaillaan SWOT-analyysin avulla, jonka pohjalta tehdään työn johtopäätökset. Lopuksi työssä tarkastellaan teknologioiden kehityskohtia sekä tutustutaan tulevaisuuden haastajateknologioihin: kiinteäoksidi-elektrolyysikenno- (SOEC) ja anioninvaihtomembraanielektrolyysi-teknologioihin. (AEM).

Opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Sweco Industrylle. Sweco Industry on Sweco Finlandin alainen teollisuuden ja energian toimiala. Sweco Finland on osana kansainvälistä Sweco-konsernia. Sweco on Euroopan johtava suunnittelun ja konsultoinnin asiantuntijayritys. Sweco Finland työllistää Suomessa noin 3000 työntekijää ja toimii 27 paikkakunnalla. (Insight.swecogroup.com 2022.)

Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä ja työn lähteinä käytetyt materiaalit ovat peräisin Turun ammattikorkeakoulun kirjastosta ja tietokannoista sekä Turun kaupungin kirjastosta ja verkosta löytyneiltä sivustoilta. Verkosta löytyneet aineistot haettiin muun muassa seuraavilla hakusanoilla: *hydrogen, electrolysis, electrolyzer, vety, vetytalous, vedyn tuotantomenetelmät*.

Opinnäytetyön kannalta merkittävimmät verkkolähteet olivat IEA (*International Energy Agency*) sekä IRENA (*International Renewable Energy Agency*) - verkkosivut. Opinnäytetyön vertailuosio toteutettiin SWOT-analyysimenetelmän avulla. SWOT-analyysien perusteella tehdyt päätelmät avaa ja koostaa analyysin tuloksia. SWOT-analyysimenetelmää hyödynnettiin vertailussa toimeksiantajan toiveesta. Opinnäytetyön tuloksista tehdään kooste, jota tullaan hyödyntämään jatkossa Swecon omassa käytössä.

2 Vety – energiatalouden puuttuva palanen?

Maailmanlaajuisesti kasvihuonekaasupäästöjen määrä kasvaa vuosittain noin 1,5 %. Vuosien 2010–2014 aikana 72 % päästöistä syntyi energiasektorilta, eli polttoaineiden tuotannosta, jakelusta ja käytöstä (Ilmasto-opas.fi 2020).

Ilmastonmuutoksen edetessä niin julkiset kuin yksityiset tahot sekä valtiot ja kansainväliset järjestöt etsivät vaihtoehtoisia energiaratkaisuja kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemiseksi.

Uusiutuvien energiamuotojen hyödyntäminen sähköntuotannossa on lisääntynyt nopeasti, eivätkä aurinkopaneelit tai tuulivoimalat ole enää harvinainen näky. Uusiutuva energiantuotanto, kuten tuulivoima ja aurinkoenergia, on kuitenkin säästä riippuvaista. Kausiluontoinen energiantuotanto tuo haasteita sähköverkolle epäsäännöllisyyden ja säätelämättömyyden takia (Brink 2018). Kun sähköön kysyntä ja tuotanto eivät kohtaa, se myös näkyy sähkönhinnan ailahteluina (Fingrid.fi n.d.).

Sähköverkon tehotasapainoa voidaan tukea muun muassa akuilla, joihin kysynnän ylittävä sähköntuotanto voidaan varastoida. Parhaimmat akkuteknologiat tänä päivänä ylittävät jopa 99 % hyötysuhteeseen ja näin ollen tarjoavat vakaan ratkaisun sähköön varastoinnille (BatteryUniversity.com^[1] 2021). Kuten muutkin teknologian muodot, myös akku säilöntäjärjestelmät (*Battery Storage Systems, BSS*) kohtaavat haasteita. Suurien energiamäärien varastointi vaatii suuria kapasiteetteja akuilta ja akkujen valmistuksessa käytetään arvokkaita raaka-aineita, kuten litiumia, nikkeliä ja kobolttia, jotka vaikuttavat akkujen hintaan merkittävästi (BatteryUniversity.com^[2] 2021). Akku säilöntäjärjestelmien suurimmat haasteet ovatkin valmistuskustannukset sekä kookkaiden säilöntäjärjestelmien kankeus ja epäkäytännöllisyys (China Electric Power Research Institute 2016). Haasteista huolimatta, akku säilöntäjärjestelmät tulevat olemaan tukipilarina tulevaisuuden älykkäille sähköverkoille, mutta taakan jakamiseen tarvitaan myös muita rakenteita.

Sopivaa palaa energiatalouden palapeliin ei tarvitse kuitenkaan etsiä kauaa, vaan se löytyy lähempää kuin luulemmekaan. Potentiaalinen ratkaisu

energiatalouden puuttuvaan palaseen löytyy universumin yleisimmästä alkuaineesta, vedystä. (Godula-Jopek 2015.)

2.1 Vety

Vety on universumin yleisin alkuaine ja se esiintyy luonnossa kaksiatomisena molekyylinä (H_2). Normaalissa ilmanpaineessa ja huoneenlämmössä vety on väritön, hajuton, mauton, myrkytön, tulenarka, ilmaa kevyempi kaasu. (Godula-Jopek 2015; Lampinen 2009; Lehtonen & Lehtonen 2008.)

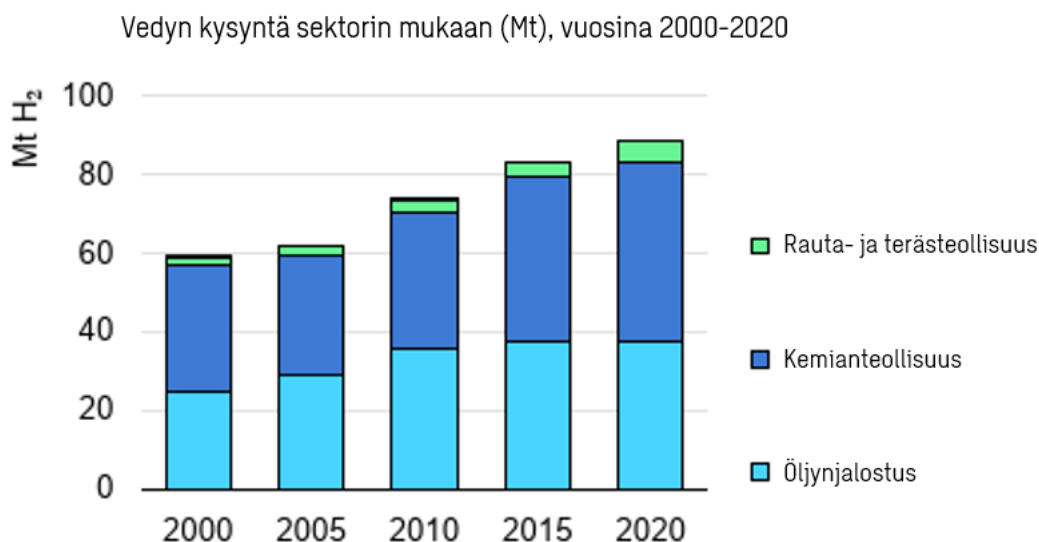
Vedyllä on korkea energiasisältö massayksikköä kohden, jonka takia sitä käytetään nesteytettynä esimerkiksi avaruusrakettien polttoaineena. Vetyä on helpompi varastoida kuin sähköä ja sitä voidaan siirtää turvallisesti putkistoissa. Vaikka vety on helposti syttyvä kaasu, se kuitenkin keveytensä takia leviää nopeasti ilmassa, joka vähentää räjähdysvaaraa. Keveytensä ansioista vedyllä on korkea energiasisältö massayksikköä kohden, mutta käänteisesti sen energiasisältö tilavuusyksikköä kohden jää alhaiseksi (90 g/m^3). Vetyä voidaan varastoida sekä kaasuna että nesteinä. Kun vety varastoidaan kaasuna, se paineistetaan ja säilötään terässäiliöihin. Standardipaine varastoinnissa on 200 baaria, jolloin vedyn tiheys on 15 kg/m^3 . Vedyn varastointi nesteinä vaatii alhaisen lämpötilan, koska vety nesteytyy 1 baarin paineessa $-252 \text{ }^\circ\text{C}$ asteessa. (Huhtinen & al. 2008; Lampinen 2009.)

Vedyn etuna on sen runsaat esiintymät maapallolla sekä korkea lämpöarvo (120 MJ/kg), joka on keskimääräisesti kolme kertaa suurempi kuin raskaalla polttoöljyllä. Vety on myös päästöpolitiikan kannalta ideaalinen polttoaine, koska puhtaan vedyn palamisreaktion tuloksena vapautuu vain lämpöä ja vesihöyryä. Toisaalta, vaikka vetyä esiintyykin runsaasti maapallolla, on se usein sidoksissa muihin aineisiin, kuten veteen (H_2O) tai maakaasun metaaniin (CH_4). Tästä syystä vetyä ei suoranaisesti pidetä energian lähteenä, vaan sen sijaan energian varastointi- ja siirtovälineenä, eli niin sanotusti energian kantajana. (Huhtinen & al. 2008; Lehtonen & Lehtonen 2008.)

2.2 Vedyn käyttö

Maailmanlaajuisella tasolla vedyn suurimmat käyttökohteet ovat ammoniakin ja metanolin valmistus, öljynjalostus sekä rauta- ja terästeollisuus. Vedyn kysynnän jakautuminen näiden kesken viimeisen 20 vuoden aikana näkyy kuviossa 1. Suomessa vedyn käyttö juontaa juurensa öljynjalostukseen sekä kemianteollisuuteen, mutta tänä päivänä vetyä hyödynnetään myös ammoniakin valmistuksessa sekä rauta- ja terästeollisuudessa.

Kemianteollisuuden sivutuotteena syntyy merkittäviä määriä vetyä, mikä tarjoaa tilaisuuden vedyn energiakäyttöön liittyvien koe- ja demonstraatiohankkeiden aloittamiselle sekä uusien teknologioiden kehittämiseksi. (IEA 2021; Suomen ilmastopaneeli 2021; VTT 2013.)



Kuvio 1. Vedyn kolme suurinta käyttökohdetta maailmanlaajuisesti vuosien 2000–2020 välillä. Muokattu lähteestä IEA 2021.

Vedyn energiateknisiä sovellutuksia ovat muun muassa liikennepolttoaine, öljynjalostus ja synteettisten biopolttoaineiden jalostus. Joustavana ja varastoivana energian kantajana vety avaa uusia mahdollisuuksia sähköverkon, liikenteen ja kotitalouskäytön kesken. Tulevaisuudessa vety voidaan mahdollisesti nähdä osana säätövoimaa tasoittamassa uusiutuvan energian aiheuttamia sähköpiikkejä sekä laskuja. Sähkön kysynnän ylimenevällä osuudella voidaan tuottaa vetyä, joka voidaan muuntaa takaisin sähköksi

polttokennoissa korkean kysynnän, tai sähköverkon häiriötilojen aikana. (Haveri & Kostamo n.d.; VTT 2013.)

Lisäksi olemassa olevien lämpövoimalaitosten (*Combined Heat and Power, CHP*) kaasuturbiineja voidaan muuntaa käyttämään vetyä, jolla on suuret vaikutukset sekä teknisesti että taloudellisesti. Tekniikka vedyn hyödyntämiselle sähkön- ja lämmöntuotannossa on jo olemassa, joten kun voimalaitokset muunnetaan vetykäyttöisiksi, vetyä käyttävään tuotantokapasiteettiin ei tarvitse tehdä suuria investointeja. (Press.Siemens.com 2020; Siemens-Energy.com 2022.)

Suurin hidaste vedyn laajalle käyttöönotolle on puuttuva jakelu- ja varastointi-infrastrukturi. Uuden infrastruktuurin rakentaminen on kallista ja vety jakelujärjestelmän integrointi osaksi nykyistä energiajärjestelmää tuo haasteita mukanaan. Tilanne voidaan ratkaista kansainvälisillä ja kansallisilla sopimuksilla sekä strategioilla, jotka kannustavat jakelu- ja varastointi-infrastruktuurin rakentamiseen. Muun muassa Euroopan komission direktiiviehdotus laajentaisi velvoitteita vety-infran rakentamiselle kaikkiin Euroopan Unionin jäsenvaltioihin. Vedyn demonstraatiohankkeet sekä infran rakentaminen tarjoaa markkinaraon viennille sekä kehitysmahdollisuuden teknologialle. Vetymarkkinoiden arvoksi Euroopassa 2050 mennessä on arvioitu olevan 100 miljardia euroa. (VTT 2013.)

Infrastruktuurin puuttuessa vedyn laajamittaisempaa käyttöönottoa voidaan kuitenkin nopeuttaa hyödyntämällä olemassa olevia maakaasuverkkoja, jotka tarjoavat mahdollisuuden vedyn jakeluun ja varastointiin. Kääntöpuolena on, että puhtaan, eli päästöttömän, vedyn hyödyt nollaantuvat, kun vety sekoitetaan metaaniin. Sillä on vaikutuksia myös polttoainetta käyttäviin ajoneuvoihin, sillä polttimia ja moottoreita joudutaan säätämään, jos vetypitoisuus maakaasussa nousee yli 5 til-%:n. (VTT 2013.)

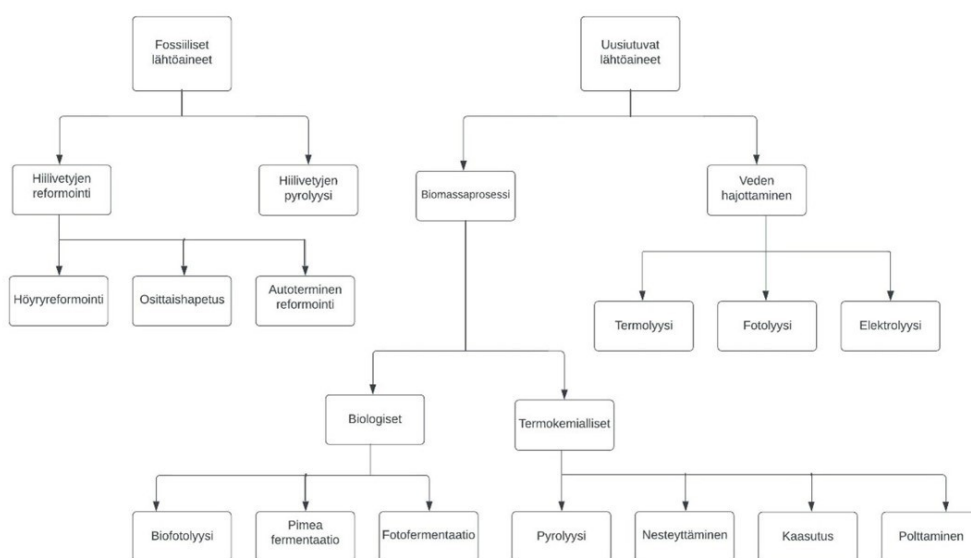
2.3 Vedyn tuotanto

Koska vetyä ei löydy luonnosta sellaisenaan sitä valmistetaan hajottamalla aineita, joihin se on sitoutunut. Vedyn tuotantoprosessit kuluttavat paljon sähköä, joten kannattavuuden nostamiseksi tuotanto voidaan yhdistää muihin

sähköntuotannon ja teollisuuden prosesseihin. (Huhtinen & al. 2008; Valtioneuvosto 2022.)

Vetyä voidaan valmistaa usealla eri menetelmällä ja usein vety luokitellaankin sen lähtöaineen ja tuotantotavan mukaan. Vety voidaan jakaa valmistuksessa käytettävän raaka-aineen mukaan fossiilisiin ja uusiutuviin lähtöaineisiin.

Fossiilista polttoaineista, eli pääsääntöisesti maakaasusta, vetyä tuotetaan joko hiilivetyjä reformoimalla tai hiilivetyjen pyrolyysillä. Uusiutuvista lähteistä vetyä tuotetaan biomassaprosesseilla tai vettä hajottamalla. Nämä yläluokat jakautuvat vielä yksityiskohtaisempiin teknologiamuotoihin, jotka näkyvät tarkemmin kuvasta 1. Käytetyimmät teknologiat vedyn tuotannossa ovat reformointi, kaasutus ja elektrolyysi. (Nikolaidis & Poullikkas 2017; Valtioneuvosto 2022.)



Kuva 1. Vedyn tuotantoteknologiat lähtöaineen mukaan. Muokattu lähteestä Nikolaidis & Poullikkas 2017.

Vuonna 2020 vetyä tuotettiin maailmanlaajuisesti 90 megatonnia (Mt), joka lähes kokonaisuudessaan valmistettiin fossiilisista polttoaineista kuten maakaasusta ja kivihiilestä. 79 % vedystä valmistettiin vedyn tuotantolaitoksilla ja 21 % syntyi muiden teollisuuden prosessien sivutuotteena. Maakaasun ja kivihiilen ollessa pääasiallisia raaka-aineita vedyn tuotannolle, prosessista

syntyvät päästöt ovat myös sen mukaiset. Vuonna 2020 vedyn tuotanto yksinään tuotti 900 Mt suoraa hiilidioksidiä, eli CO₂-päästöjä, joka vastaa 2,5 % koko maailman energia- ja teollisuussektorin päästöistä. (IEA 2021.)

Yleisin vedyn tuotantotapa on reformointi. On olemassa kolmenlaista reformointitekniikkaa: höyryreformointi, osittaishapetus sekä autoterminen reformointi, joka on kahden edellä mainitun yhdistelmä. Höyryreformoinnissa vesi toimii hapettimena sekä vedyn lähteenä, kun taas sen sijaan osittaishapetuksessa happi on prosessin hapetin. Teknologiasta riippuen vedyn lähteenä käytetään joko maakaasua, raskasta öljyä tai kivihiihtä. Käytetyin reformointitekniikka on kuitenkin höyryreformointi ja vuonna 2020 kaikesta maailmanlaajuisesti tuotetusta vedystä 59 % tuotettiin reformoimalla maakaasua. Höyryreformoinnissa maakaasu lämmitetään 900 °C asteeseen, jolloin maakaasun ja vesihöyryn seos hajoaa vedyksi ja hiilimonoksidiksi. Syntyvä kaasuseos pitää sisällään noin 80 % vetyä ja 20 % hiilimonoksidia. Prosessin lopuksi hiilimonoksidi erotetaan vedystä, jolloin lopputuotteena saadaan puhdasta vetyä. Prosessin suurin hinnan säätelijä on maakaasu, joten tuotantolaitoksen maantieteellisestä sijainnista riippuen maakaasun osuus hinnasta voi vaihdella 45–75 % välillä. Toinen merkittävä tekijä on sähkön hinta. Koska prosessista syntyvät CO₂-päästöt ovat korkeat, päästöjenhallintatekniikkaa kehitetään parhaillaan, joka toimii osana kokonaisuutta nimeltä *Carbon Capture Storage* (CCS). (Godula-Jopek 2015; Huhtinen & al. 2008; IEA 2019; Vety 2020.)

Toinen yleinen vedyn valmistuskeino on kaasuttaminen. Prosessissa kaasutetaan kivihiihtä, jonka seurauksena tapahtuu hapetusreaktio, josta syntyy reaktiotuotteena useita yhdisteitä sisältävää kaasua. Kaasusta poistetaan raskasmetallit, rikki ja hiilidioksidi. Jäljelle jäävä hiilimonoksidi muuntuu vedyksi ja hiilidioksidiksi vesikaasun siirtoreaktiossa. Lopuksi poistetaan prosessin aikana syntynyt hiilidioksidi, jolloin lopputuotteena saadaan vetyä. Samaa teknologiaa hyödynnetään myös kiinteän biomassan kaasutukseen. Biomassan kaasutuksesta syntyy pieniä määriä orgaanisia epäpuhtauksia sekä vetyä. Vedyn puhtausaste on huono biomassan sisältämien epäpuhtauksien takia,

jonka takia kaasutustekniikalla on vielä varaa kehitykselle. (Huhtinen & al. 2008; Lassi & Wikman 2011; Vety 2020.)

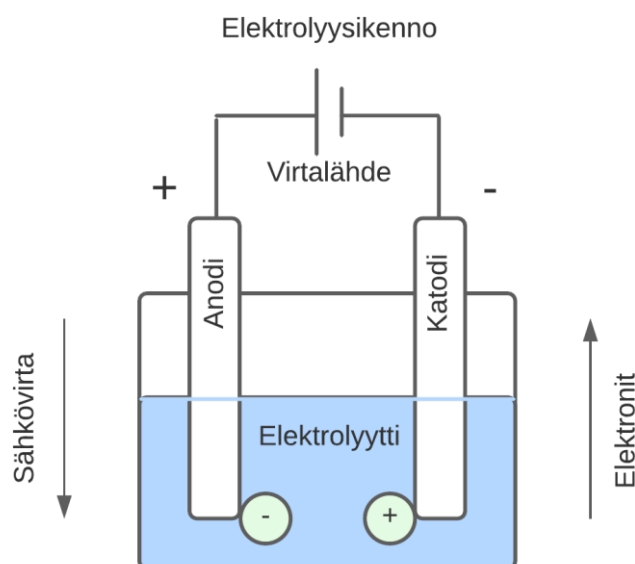
Paras keino päästöttömän ja puhtaan vedyn tuotantoon on veden hajottaminen vedyksi ja hapeksi elektrolyysin avulla. Elektrolyysiprosessin päästöt syntyvät prosessiin käytetyn sähköön tuotannosta. (Huhtinen & al. 2008; Vety 2020.) Seuraavissa kappaleissa tutustutaan elektrolyysiteknologiaan ja vedyn tuotantoon elektrolyysillä.

2.4 Elektrolyysiteknologia

Elektrolyysi on sähköön virtausta sitä johtavassa liuoksessa, joka saa aikaan kemiallisia muutoksia. Sähköä johtavaa liuosta kutsutaan elektrolyytiksi, ja se pitää sisällään vapaasti liikkuvia ioneita. Elektrolyyttiin asetetaan kaksi sähköä johtavaa levyä, joita kutsutaan elektrodeiksi. Levyt voivat olla tehty joko metallista tai grafiitista. Metallilevyjen välille kytketään ulkoinen virtalähde. Virtalähteen positiiviseen napaan kytkettyä elektrodia kutsutaan anodiksi, ja negatiiviseen napaan kytkettyä elektrodia kutsutaan katodiksi. Kun sähkövirta kulkee elektrolyytissä, ionit liikkuvat kuljettaen sähköistä varausta. Koska vastakkaiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa, negatiiviset ionit, anionit, kulkeutuvat anodille ja positiiviset ionit, kationit, kulkeutuvat katodille. Sähkö virtaa systeemin läpi jännitelähteen positiiviselta navalta negatiiviselle navalle elektronien liikkeellä vastakkaiseen suuntaan. (Antila & al. 2008; Lehtonen & Lehtonen 2008.)

Sähkökemiallista systeemiä, jossa elektrolyysi tapahtuu, kutsutaan elektrolyysikennoksi. Elektrolyysikennossa tapahtuva reaktio on epäspontaani, koska saadakseensa alkunsa, se tarvitsee ulkoisen virtalähteen. Elektrolyysikennoon kytketty virtalähde tuottaa tasavirtaa, joka saa elektronit liikkeelle. Näin syntyy hapetus-pelkistysreaktio, jolloin anodilla olevat anionit hapettuvat elektronien luovutuksen seurauksena, kun taas katodilla olevat kationit vastaanottavat elektroneja pelkistyen. Elektrolyysikennoon voidaan myös syöttää vaihtovirtaa, mutta vaihtelevat virran suunnat saavat myös reaktioiden suunnan vaihtelevaan, jonka seurauksena elektrolyysikennossa ei tapahdu tavoiteltua pysyvää yhdisteiden hapettumis- ja pelkistystilaa. Kuva 3 kuvastaa elektrolyysikennon rakennetta ja toimintaa yksinkertaistettuna. Tästä

edes työssä käytetään myös sanaa kenno, kun viitataan elektrolyysikennoon. (Antila & al. 2008; Lehtonen & Lehtonen 2008.)



Kuva 2. Elektrolyysikennon toiminta yksinkertaistettuna. Mukailtu lähteistä Antila & al. 2008; Kaila & al. 2006.

Elektrolyysiteknologiaa käytetään muun muassa metallien puhdistuksessa sekä päällystämässä, yhdisteiden ja kaasumaisten aineiden kuten kloorin valmistuksessa sekä korroosion estossa. Elektrolyysiteknologiaa voidaan hyödyntää myös kemian- ja energianteollisuudessa vedyn valmistuksessa, jolloin sähkövirran avulla vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi. (Huhtinen & al. 2008.)

2.5 Veden elektrolyysi

Kun halutaan valmistaa vetyä päästöttömästi, elektrolyysiteknologia on siihen paras vaihtoehto. Kun vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi, ainoa päästöjä tuottava prosessin vaihe on sähköntuotanto. (Lampinen 2009.)

Veden elektrolyysin reaktioyhtälön kaava, joka kuvaa veden hajoamista vedyksi ja hapeksi:



Veden hajottaminen elektrolyysillä ei tuota ympäristölle haitallisia päästöjä, mutta prosessin kääntöpuolena on elektrolyysiteknologian suuri sähköntarve. Maailmanlaajuisella tasolla arviolta vain 0,03 % vedystä tuotetaan elektrolyytisesti. Tulevaisuudessa kuitenkin määrän ennustetaan nousevan päästöttömän energiatuotannon lisääntyessä. (IEA 2019; Lampinen 2009.)

Laitteistoa, joka saa aikaan elektrolyysiprosessin kutsutaan elektrolyyseriksi. Elektrolyyseri tarvitsee paljon sähköä toimiakseen ja elektrolyysiprosessista syntyy sivutuotteena paljon lämpöä, eli hukkalämpöä. Elektrolyysiteknologian hyötysuhde vedyn tuotannossa nykyisillä teknologioilla on 60–70 %, eli noin kolmannes prosessiin käytetystä sähköstä muodostuu hukkalämmöksi. Kun vedystä tuotetaan sähköä polttokennolla, hyötysuhde on noin 40–55 %. Näin ollen, sähköstä vedyksi ja takaisin sähköksi, prosessin kokonaishyötysuhde on vain 24–38 %. Jos prosessista syntyvä hukkalämpö hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa, prosessin kokonaishyötysuhde kasvaa. Ratkaiseva tekijä hukkalämmön hyödyntämiselle on elektrolyysilaitoksen sijainti suhteutettuna kaukolämpöverkkoon. (Valtioneuvosto 2022; Vartiainen 2020.)

2.6 Vedyn värikoodit

Aikaisemmin opinnäytetyössä kappaleessa 2.3 esitelty kuva 1 on vain yksi esimerkki vedyn luokittelutavoista. Toinen yleinen vedyn luokittelutapa on vedyn lajittelu väreihin sen tuotantotavan ja lähtöaineen mukaan kuvan 3 tavoin.



Kuva 3. Vedyn luokittelu väreihin tuotantotavan ja lähtöaineen mukaan. Muokattu lähteestä Schaller 2021.

Fossiilisista polttoaineista, lähinnä kivihiiilestä, kaasuttamalla tuotettu vety luokitellaan ruskeaksi tai mustaksi, lähtötuotteesta riippuen. Pyrolyysillä metaanista tuotettu vety luokitellaan turkoosiksi ja maakaasusta reformoimalla tuotettu vety luokitellaan harmaaksi. Sininen vety on kivihiiilestä kaasuttamalla tuotettua vetyä, josta on poistettu ja säilötty tuotannon aiheuttamat CO₂-päästöt hyödyntäen esimerkiksi CCS-tekniikkaa, jonka vuoksi se luokitellaan hiilineutraaliksi tai vähäpäästöiseksi vedyn tuotantotavaksi. (H2Bulletin.com n.d.; Pyke 2021; Schaller 2021.)

Elektrolyysiteknologioilla tuotettu vety luokitellaan väreihin seuraavasti: ydinvoimasähköllä tuotettu vety luokitellaan punaiseksi, pinkiksi tai lilaksi teknologiasta riippuen. Uusiutuvilla energiamuodoilla elektrolyysistä lopputuotteena syntynyt vety luokitellaan vihreäksi. Lisäksi joidenkin lähteiden mukaan aurinkoenergialla elektrolyysissä tuotettu vety luokitellaan erikseen omaksi värikseen, keltaiseksi. Toisten lähteiden mukaan keltainen väri vastaa määrittelemättömällä sähköverkko sähköllä elektrolyysistä syntynyttä vetyä. Teollisten prosessien sivutuotteena syntyvä vety luokitellaan valkoiseksi. Koska vetytaloudelle ei vielä ole välttämättä yleisesti vakiintuneita käytäntöjä ja termistöä, myös värikoodit saattavat vaihdella lähteen mukaan. Joissain lähteissä joitain väriluokkia on saatettu yhdistää pääpiirteittäin, joten kuva 3 on vain yhden lähteen näkemys vedyn värikoodeista. (H2Bulletin.com n.d.; Pyke 2021; Schaller 2021.)

3 Alkali- ja PEM-teknologioiden esittely

Elektrolyysilaitoksissa hyödynnettävät teknologiat jaotellaan niissä käytettävien elektrolyyttimateriaalien perusteella. Yleisimmät tällä hetkellä käytössä olevat elektrolyysiteknologiat ovat alkalielektrolyysi (*Alkaline Electrolysis, AEL*) ja polymeerielektrolyysi (*Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis, PEM*), joiden toiminnan periaatteita ja rakennetta käsitellään tarkemmin tässä luvussa. (Huhtinen & al. 2008; Vety 2020.)

3.1 Alkaliteknologia

Alkalielektrolyysi (AEL) on vanhin ja yleisin käytetty elektrolyysiteknologian muoto vedyn tuotannossa. Alkaliteknologia on ollut laajasti käytössä 1920-luvulta lähtien, kun ensimmäinen kaupallinen alkalielektrolyyseri kehitettiin vuonna 1927 Norjalaisen Norsk Hydro Electorlyzersin toimesta.

Alkalielektrolyysissä perinteisen elektrolyysimenetelmän mukaisesti kaksi tasavirtalähteeseen kytkettyä elektrodia upotetaan elektrolyyttiliuokseen. Elektrodien materiaalina käytetään joko puhdasta rautaa tai nikkeliä. Elektrodit on yleensä päällystetty sinkillä, kromilla tai kuparilla korroosion estämiseksi. Alkalielektrolyysi saa nimensä siitä, että elektrolyyttiin lisätään 25–35 % kaliumhydroksidi- (KOH) tai natriumhydroksidiliuosta (NaOH), jolloin lopputuloksena saadaan erittäin emäksistä, eli alkaalista vesiliuosta. Elektrolyyttiin lisätty KOH- tai NaOH-liuos kasvattaa elektrolyysin sähkönjohtavuutta, jolloin reaktiosta saadaan hyötysuhteeltaan parempi. (Godula-Jopek 2015; Huhtinen & al. 2008; Vety 2020.)

Reaktio vaatii sähkövirtaa, jota syötetään elektrolyysikennoon elektrodien kautta. Sähkövirran vaikutuksesta elektronit hajottavat katodilla vedestä vety- (H^+) ja hydroksidi-ioneja (OH^-). Vetyionit muodostavat elektronien kanssa vetyä ja hydroksidi-ionit liikkuvat positiiviselle anodille, jossa hydroksidi-ioneista muodostuu happea ja vettä. Näin ollen vety pelkistyy katodilla ja happi hapettuu anodilla. Kun elektrodien välille kohdistuu potentiaaliero, hapetus-

pelkistysreaktiot tapahtuvat samanaikaisesti systeemin anodilla ja katodilla alla olevien kaavojen mukaisesti. (Godula-Jopek 2015.)

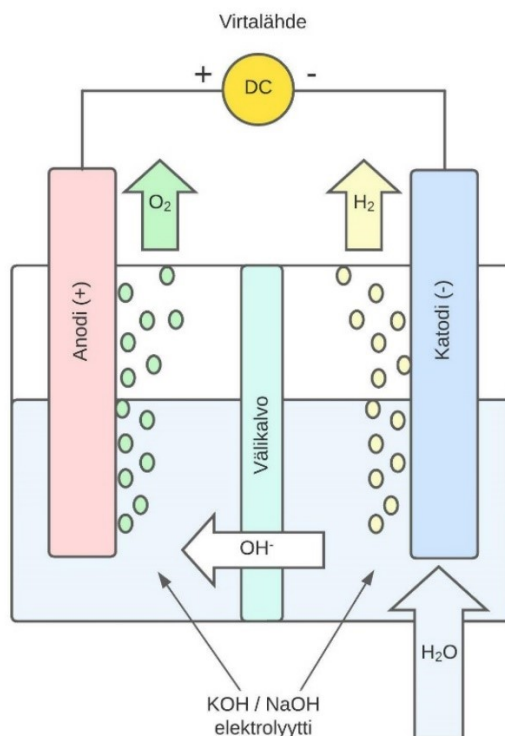
Veden pelkistymisreaktio katodilla, jolloin syntyy vetykaasua:



Samanaikaisesti anodilla tapahtuu hydroksidi-ionien hapettumisreaktio, jonka seurauksena muodostuu happea:



Elektrolyysikemno on jaettu kahtia huokoisella kalvolla, joka eristää elektrodit toisistaan. Kalvo päästää lävitseen varausta kantavat hydroksidi-ionit (OH^-) ja antaa niiden kulkea vapaasti elektrodien välillä estäen kuitenkin samalla vedyn ja hapen sekoittumisen keskenään. (Godula-Jopek 2015.) Kuvassa 4 näkyy alkalikemnon rakenne sekä toiminta yksinkertaistettuna.



Kuva 4. Alkalielektrolyysikemnon rakenne ja toiminta. Mukailtu lähteestä Godula-Jopek 2015.

3.1.1 Elektrolyytti

Kennon reaktiota tehostetaan lisäämällä NaOH- ja KOH-liuosta elektrolyyttiin. Kaliumhydroksidi kuitenkin johtaa paremmin sähköä, jonka takia sen käyttöä suositetaan enemmän. Korkein mahdollinen sähkönjohtavuus elektrolyytissä saavutetaan 30 % konsentraatiolla kaliumhydroksidia. Korkeita KOH-pitoisuuksia hyödynnetään moderneissa alkalielektrolyysereissä. Elektrodien etäisyys toisistaan määrittää tarvittavan elektrolyytin määrän kennossa. Liian alhainen määrä elektrolyyttiä aiheuttaa muutoksia elektrolyytin reaktiivisuudessa ja reaktion tehokkuudessa. Lisäksi elektrolyytin määrä tulee suhteuttaa tasapainottamaan lopputuotekaasujen häviöiden määrää (1 mg KOH/ Nm³H₂). Elektrolyytti vaihdetaan muutaman vuoden välein elektrolyyseriin kertyvien epäpuhtauksien takia, joita syntyy muun muassa metalliosien ruostumisen sekä elektrodien ja väliseinän kulumisen seurauksena. (Godula-Jopek 2015.)

3.1.2 Elektrodit

Elektrodien etäisyys toisistaan voi olla muutamista millimetreistä useisiin senttimetreihin. Mitä kauempana elektrodit ovat toisistaan, sen suuremmat ovat kennon häviöt. Elektrodien etäisyydellä on myös vaikutusta elektrolyytin määrään kennossa. Elektrolyytin aiheuttama kennon emäksinen ympäristö asettaa soveltuvuusrajoituksia elektrodeille. Elektrodien tulee olla korroosionkestäviä, sähkönjohtavia sekä katalyyttisesti aktiivisia vedyn ja hapen muodostumisen kannalta. Ennen elektrodien materiaaleina käytettiin ruostumatonta terästä ja lyijyä, mutta niiden toiminta todettiin epävakaaksi korkeajännitteisissä ja vahvasti emäksisissä olosuhteissa. Tällä hetkellä nikkelin on todettu olevan paras materiaalivaihtoehto alkalielektrolyysikennoille. Nikkelillä on hyvä vastus korroosiolle alkaliliuoksissa sekä se johtaa hyvin sähköä. Elektrodeja voidaan vahvistaa entisestään päällystämällä elektrodin pinta huokoisella kerroksella nikkeliä tai nikkelifrauta metalliseoksella. (Godula-Jopek 2015.) Vuosien 2009–2014 aikana nikkeliä oli saatavilla kohtuulliseen

hintaan (13,8 e/kg), mutta Venäjä-Ukraina sodan seurauksena nikkelin hinta on noussut ennätysmäisesti, koska Venäjä on maailman kolmanneksi suurin nikkelin tuottaja. (Autio & Törnudd 2022; Godula-Jopek 2015.) Nikkelin hinta tämän osion kirjoitushetkellä 25. päivä huhtikuuta 2022 on noin 30,48 e/kg (Metalcentergroup.fi 2022). Nikkelin hinnan nousu tulee näkymään elektrolyysereiden tuotantokustannuksissa.

3.1.3 Välikalvo

Välikalvo sijaitsee anodin ja katodin välillä jakaen elektrolyysikennon kahtia. Välikalvo valmistetaan huokoisesta ja sähköisesti eristävästä materiaalista. Välikalvon tulee toimia vakaasti anodin hapettuvissa kuin myös katodin pelkistyvissä olosuhteissa, jonka vuoksi välikalvoille on määritetty standardoidut operointiolosuhteet: 30 % konsentraatio kaliumhydroksidia 80 °C asteen lämpötilassa. (Godula-Jopek 2015.)

Välikalvo erottaa vastakkaisnapaiset elektrodit, jotta ne eivät aiheuta oikosulkua kennossa. Välikalvo pitää myös reaktiotuotteena syntyneen hapen ja vedyn erillään, jotta ne eivät sekoitu keskenään ja muuntauudu takaisin vedeksi. OH⁻ ionit pääsevät kuitenkin kulkemaan välikalvon läpi katodilta anodille. Välikalvon huokoisuus sekä johtavan elektrolyytin kyllästävät huokoiset edesauttaa ionien kulkua kennossa. Välikalvon ionista johtavuutta vahvistetaan käyttämällä valmistuksessa hydrofiilisiä, eli vesiliukoisia-aineita, jotka helpottavat ionien kulkemista kennon puolelta toiselle. Käytetyimmät aineet välikalvojen valmistuksessa ovat polysulfidit sekä zirkoniumoksidit (ZrO₂). (Godula-Jopek 2015.)

3.2 Lämpötilan ja paineen vaikutukset

Kaupallisten alkali-elektrolyysikennojen lämpötila on 45–90 °C asteen välillä. Prosessin lämpötilan nostaminen lisää KOH-elektrolyytin sähkönjohtavuutta, jonka seuraksena myös elektrolyysin teho nousee. Testiympäristöissä

kennojen toimintaa on kokeiltu korkeammilla lämpötiloilla, mutta korkea lämpötila horjuttaa komponenttien kemiallista tasapainoa, jonka takia alkalielektrolyyserin operointi yli 100 °C asteen lämpötiloissa onnistuu vain paineistetuilla elektrolyysereillä. (Godula-Jopek 2015.)

Paineistetun elektrolyyserin käyttö lisää tarvetta tuotetun vedyn puhdistamiselle. Kun kennon painetta nostetaan, kaasukuplien koko pienenee, jolloin kaasut sekoittuvat helpommin elektrolyyttiin. Suurilla kaasukuplilla sen sijaan on negatiivinen vaikutus reaktioon, koska ne nostavat systeemin resistanssia. Korkea operointipaine laskee systeemin jännitettä, jonka seurauksena elektrolyyseri vaatii vähemmän energiaa vedyn tuotantoon. Paineen nostaminen kuitenkin pienentää kaasukuplien kokoa, jolloin vety- ja happikaasu läpäisevät huokoisen välikalvon helpommin ja pääsevät sekoittumaan keskenään. Normaalisti prosessista muodostuvan vedyn puhtausaste on parhaimmillaan 99,9 %, mutta korkeassa paineessa tuotetun vedyn puhtausaste on alhaisempi. Vedyn käyttökohteesta riippuen, tämä vaatii vedyn puhdistamista, joka lisää sähkönkulutusta. Lisäksi paineistetun elektrolyyserin käyttö nostaa vedyn tuotantolaitoksen investointikustannuksia. Paineistetun elektrolyyserin käyttö ei kuitenkaan vaikuta elektrolyysiprosessin energiankulutukseen. (Godula-Jopek 2015.)

3.3 PEM-teknologia

PEM-teknologia saatetaan tuntea protoninvaihtomembraani-, polymeerielektrolyyttimembraani- sekä kiinteäpolymeerielektrolyytti-nimellä. Yhtenäistä nimille on, että kaikki viittaavat kennossa olevaan polymeerimateriaalista valmistettuun kiinteään elektrolyyttimembraaniin, eli välikalvoon, joka kuljettaa protoneita kennon puolelta toiselle.

Polymeerielektrolyysiteknologia tuli julkisuuteen ensimmäistä kertaa 1950-luvulla Yhdysvaltojen avaruushjelman perustamisen yhteydessä. Teknologia koettiin mullistavaksi kehitykseksi vetyoksidi (H_2/O_2) polttokennoille, jotka soveltuivat käytettäväksi avaruuden kaltaisissa painovoimattomissa

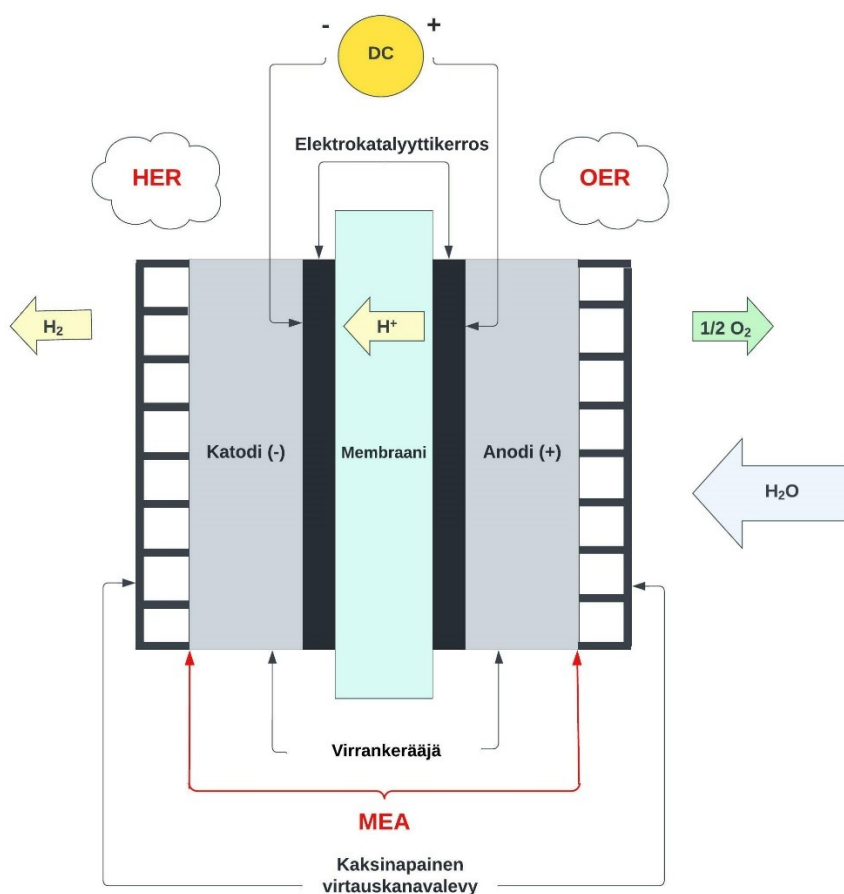
ympäristöissä. Avaruuden valloitus loi uudenlaisia kriteereitä sähkökemiallisille laitteille, koska painovoiman puutteen takia nestemäiset elektrolyytit joutuivat kieltolistalle nesteeseen syntyvien kuplien seurauksena. (Godula-Jopek 2015.)

Merkittävä saavutus oli, kun kehitettiin kiinteä kennosto, joka kyllästettiin nestemäisellä elektrolyytillä. Se toi lisähyötyjä mahdollistaen happamien väliaineiden käytön, protonien ollessa liikkuvampia kuin alkaliteknologian OH^- ionit. Tämä johti ionomeerien kehitykseen. Ionomeeri on polymeerityyppi, joka koostuu sekä neutraaleista että ionisoituneista yksiköistä, jotka ovat liitoksissa kovalenttisella sidoksella polymeerin runkoon. 1960-luvulla kalvotekniikka koki läpimurron, kun kehitettiin uusi polymeeri, joka tuli tunnetuksi Nafion brändinimen alla. Nafion materiaalit ovat kemiallisesti vakaita ja ne toimivat hajoamatta hapettavissa ympäristöissä pitkien aikojen ajan. Mekaaniset ominaisuudet rajoittavat Nafion tuotteiden käyttöä yli 100 °C asteen lämpötiloissa, mutta korkean protonin johtavuuskyvyn ansiosta ne ovat silti käytetyimpiä materiaaleja kiinteiden elektrolyyttien valmistuksessa. (Godula-Jopek 2015.)

3.4 PEM-elektrolyysikennon rakenne ja toiminta

PEM-kenno koostuu protoninvaihtomembraanista, eli kalvosta, siihen liitetystä elektrokatalyyttisestä kerroksesta, virtauskanavalevyistä sekä virrankeräimistä. Tätä kennon keskikomponenttia kutsutaan membraanielektrodikokoonpanoksi (*membrane-electrodes assembly, MEA*). PEM-kennon komponenttien tulee kestää korroosiota, joita happi, kalvomateriaalit sekä kennoon syötetty sähkövirta aiheuttavat. (Godula-Jopek 2015.)

Kennon kiinteä polymeerielektrolyytti on päällystetty molemmin puolin kahdella huokoisella katalyyttikerroksella, joista toinen on anodilla hapen tuotanto reaktiota (*oxygen evolution reaction, OER*) varten ja toinen katodilla vedyn tuotanto reaktiota (*hydrogen evolution reaction, HER*) varten. Katalyyttiset kerrokset ovat yhdistettynä tasavirtalähteeseen, jonka avulla reaktio saadaan aluilleen. (Godula-Jopek 2015.)



Kuva 5. PEM-kennon rakenne sekä toiminta yksinkertaistettuna. Muokailtu lähteestä Godula-Jopek 2015.

PEM-kennon toiminta on seuraavanlainen: kennoon johdetaan vettä anodipuolelta ja tasavirtalähteen avulla vesi hajoaa happikaasuksi ja protoneiksi anodilla. Kennossa vallitsevan sähkökentän seurauksena vetyionit, eli protonit, siirtyvät membraanin ioninsiirto-ominaisuuksien avulla katodipuolelle, missä ne hajoavat ja pelkistyvät vetymolekyyleiksi. Samanaikaisesti happi hapettuu anodipuolella. Lopuksi vety poistuu katodipuolelta ja happi anodipuolelta. Systemin virrankerääjät toimivat kaasun ja veden kierron tehostajina. Veden virtausta kennon läpi kutsutaan nimellä elektro-osmoosi. (Carmo & al. 2013.)

Alla olevat kaavat kuvaavat pelkistysreaktiota katodilla, hapetusreaktiota anodilla sekä koko kennoreaktiota.

Veden pelkistysreaktio katodilla:



Veden hapetusreaktio anodilla:



Koko kennoreaktio:



Yksi elektrolyyseri pitää sisällään kymmeniä kennoja, jotka on pinottu yhteen yhdeksi kokonaisuudeksi, englanniksi nimeltä *stacks*, jota kutsutaan tässä työssä nimellä kennopino. Kennopinon lisäksi osana PEM-elektrolyyserin perusrakenteita ovat virtalähde, vedenlähde, pumppu, lämmitys- ja kaasujentalteenottojärjestelmä sekä mahdollisesti erinäisiä turvallisuusrakenteita (Barbir 2005).

3.4.1 Protoninvaihtomembraani

PEM-kennossa ei ole nestemäistä elektrolyyttiä, vaan systeemin elektrolyyttinä toimii kiinteä ja ohut ioneja johtava kalvo nimeltä protoninvaihtomembraani. Kalvolla on merkittävä rooli kennon toiminnassa, sillä se päästää protonit kulkemaan kennossa samalla pitäen prosessista syntyvän vety- ja happikaasun erillään. (Godula-Jopek 2015.)

Yleisin kalvomerkki on Nafion, jonka kalvot valmistetaan perfluorosulfonihaposta (*Perfluorosulfonic acid, PFSA*). Kalvon ioninvaihtominaisuudet mahdollistavat ioninen nopean kulkeutumisen sekä korkean virtaustiheyden. Kalvon tulee eristää kaasuja, kestää korkeita toimintalämpötiloja sekä mekaanista kulumista. Kalvon tulisi olla vain 20–300

µm paksu, mutta silti estää reaktion seurauksena muodostuvan vedyn ja hapen sekoittumisen takaisin vedeksi. Kalvon pitää siis olla mahdollisimman ohut, mutta kestävä. Jos kalvo on liian paksu, vastukset kasvavat ja virtaustiheydet alenevat. Tämä vaikuttaa H⁺-ionien, eli protonien kykyyn läpäistä kalvo. Jos protonit eivät pääse kulkeutumaan anodipuolelta katodipuolelle normaalisti, prosessista ei myöskään synny vetyä. Liian ohuen kalvon riskinä on vedyn ja hapen sekoittuminen sekä pahimmassa tapauksessa kalvon repeytyminen mekaanisen kulumisen seurauksena. (Carmo & al. 2013.)

Nafion-kalvoilla on kuitenkin käänttöpuolensa, sillä ne ovat kalliita, happamia ja syövyttävät ympäristöään. Lisäksi Nafion-kalvot eivät pysty operoimaan yli 100 °C asteen lämpötiloissa, koska ne tarvitsevat nestemäistä vettä toimiakseen ja liian korkea lämpötila aiheuttaa veden haihtumista. Elektrolyysiprosessi voitaisiin operoida korkeammissa lämpötiloissa, jos Nafion-kalvon ainesosat korvattaisiin lämpöä kestäväillä materiaaleilla. Nafion-kalvoja on kokeiltu vahvistaa muun muassa sinkkioksidilla ja tinaoksidilla, joka mahdollistaisi kalvon käytön korkeammissa lämpötiloissa. Toinen vaihtoehto on kalvon sisältämän veden suojaaminen lämmöltä. Lähtökohtaisesti prosessin lämpötilan nostaminen kuitenkin vaatii, että kalvona käytetyn materiaalin protoniensiirto-ominaisuudet eivät ole vedestä riippuvaisia. Kalliit Nafion-kalvot pyritään korvaamaan kehittämällä halvempia kalvoja, mutta toistaiseksi ei ole vielä löydetty mekaanisesti yhtä kestäväää ja tehokkaksiin tuloksiin yltävää vaihtoehtoa. (Carmo & al. 2013; Godula-Jopek 2015.)

3.4.2 Elektrokatalyyttikerros

Elektrokatalyyttien tehtävänä on kiihdyttää reaktion nopeutta, jolloin elektrolyysiprosessin hyötysuhde nousee ja sähköntarve laskee. Elektrokatalyytit ovat jalometalleista valmistettuja nanopartikkeleita, jotka kestävät happamia ja korrosoivia olosuhteita. Kuvasta 5 näkyy elektrokatalyyttikerroksen sijainti PEM-kalvon ja virrankerääjien välillä.

Elektrokatalyyttien merkitys korostuu kennon anodipuolella, koska hapen hapetusreaktio määrittää kennon kokonaisreaktion nopeuden. Tämän takia erityisesti hapetusprosessia halutaan kiihdyttää katalysoinnilla. Anodireaktion katalysointi on kuitenkin haastavaa, sillä vain harvat aineet kestävät kennon hapettavaa ympäristöä. Anodipuolta voidaan katalysoida iridiumdioksidilla (IrO_2) ja ruteniumoksidilla (RuO_2). Iridiumoksidi on stabiili ja korroosionkestävä aine, mutta hyvin harvinainen ja kallis, jonka takia sen käyttö nostaa kennon hintaa merkittävästi. Tämän takia iridiumdioksidia on yritetty korvata halvemmalla vaihtoehdolla, ruteniumoksidilla, joka ei kuitenkaan ole yhtä korroosionkestävä eikä vakaa yhdiste kuin iridiumoksidi. (Carmo & al. 2013; Polonský & al. 2012.)

Iridiumoksidin korkea hinta on osasyynä siihen, miksi PEM-teknologian hyödyntäminen suuremmissa teollisuuden tuotantolaitoksissa on kalliimpaa kuin alkaliteknologian. Tavoitteena kuitenkin on lopettaa jalometallien käyttö katalyytteinä ja halvempia vaihtoehtomateriaaleja tutkitaan jatkuvasti, mutta toistaiseksi varteenotettavia vaihtoehtoja ei ole löytynyt jalometallien ohelta. (Polonský & al. 2012.)

Myös katodipuolta voidaan katalysoida, mutta katalysoinnin hyödyt eivät ole yhtä korkeat mitä anodipuolella. Katodipuolella vedyn pelkistämistä katalysoidaan hiilinanokuitu-tuetuilla platinapartikkeleilla. Katalysoinnin kustannuksia on laskettu vähentämällä puhtaan platinan määrää sekoittamalla sitä halvempiin metalleihin kuten palladiumiin. (Carmo & al. 2013; Godula-Jopek 2015.)

Lähtökohtaisesti katalyyteillä on positiivinen vaikutus elektrolyysin tehoon. Toisaalta liian paksu katalyyttikerros nostaa systeemin resistanssia, joka vaikeuttaa protonien kulkeutumista katalyyttikerroksen läpi. Tällöin katalyytin tuomat hyödyt heikentyvät. Koska elektrokatalyyteillä on korkeat hinnat, niiden määrää on pyritty vähentämään sähköä johtavilla kantajamateriaaleilla. Kantajamateriaalien avulla elektrokatalyytit jakautuvat tasaisesti laajalle alueelle ja ovat näin paremmin kosketuksissa PEM-kalvon kanssa. Kantajamateriaalien ansiosta myös itse katalyyttikiteet voivat olla suurempikokoisia. Kantajamateriaalit ovat kuitenkin epävakaita hapettavissa ympäristöissä ja

niiden huono sähkönjohtavuus nostattaa katalyyttikerroksen aiheuttamaa vastusta. (Carmo & al. 2013; Polonský & al. 2014; Rozain & al. 2016.)

3.4.3 Virtauskanavalevyt

Virtauskanavalevyillä on kaksi tarkoitusta: ne ohjaavat sähkön ja lämmön virtausta elektrolyysin kennopinon läpi sekä vahvistavat kennojen rakennetta. Virtauskanavalevyt valmistetaan titaanista, jolloin ne saavat sähköä- ja lämpöjohtavia ominaisuuksia sekä kestävästä rakenteesta. Korroosionestämiseksi levyt päällystetään 1 µm kulta- tai platinakerroksella. Hintavien jalometallien käyttöä on yritetty korvata halvemmilla vaihtoehdoilla myös virtauskanavalevyjen kohdalla. Ruostumatonta terästä ja hiilipohjaisia materiaaleja on kokeiltu jalometallien korvaajina, mutta koska niiden korrosionsietokyky on alhaisempi kuin titaanilla, hyödyntäminen valmistuksessa on haastavaa. Ruostumaton teräs vaatisi suojaavan päällystemateriaalin, jottei korrosion seurauksena teräsionit sitoutuisi kalvoon ja heikentäisi ioninvaihtotoimintaa. (Carmo & al. 2013.)

3.4.4 Virrankerääjät

Virrankerääjät tukevat virtauskanavalevyjen ja elektrokatalyyttisen kerroksen välistä sähköistä kontaktia. Tämän lisäksi, virrankerääjät tehostavat kaasujen ja veden kiertoa elektrolyysissä. Virrankerääjät valmistetaan sintratusta titaanijauheesta. Sintraamalla virrankerääjälle saavutetaan huokoinen rakenne, jolle määritetään optimaalinen paksuus, huokoskoko sekä huokoisuusaste elektrolyysin toiminnan tehostamiseksi. Virrankerääjien huokosten koko on 5–30 µm välillä ja huokoisuusaste on 20–50 %. Kennon katodipuolella vesi-vety nestekaasuseos virtaa yhdensuuntaisesti elektrokatalyyttikerrokselta virrankerääjän läpi virtauskanavalevyille. Kun taas anodipuolella vesi ja happi virtaavat ristiin vastakkaisiin suuntiin, mikä vaikeuttaa virrankerääjän huokosten koon määrittämistä. Koska kaasunesteseoksen tulee päästä virtaamaan esteettömästi virrankerääjien huokosten läpi, on määritetty, että pienimpien

huokoisten tulisi olla 20–25 % todellisten kaasukuplien koosta. (Carmo & al. 2013.)

4 Elektrolyysiteknologioiden vertailu

Vetyä tuotetaan vedyn tuotantolaitoksissa sekä sitä syntyy sivutuotteena kemianteollisuuden prosesseista. Elektrolyysiteknologia on vain yksi monista vedyn tuotantotavoista, mutta ratkaisevassa asemassa päästöttömän vedyn tuotannossa. Tässä luvussa vertailemme elektrolyysiteknologian kahta käytetyintä muotoa, alkali- ja PEM-teknologiaa.

4.1 Elektrolyysiteknologian valintaan vaikuttavat tekijät

Elektrolyysilaitoksessa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi elektrolyyserillä. Elektrolyysereitä on monenlaisia ja toimintateknologioiden lisäksi ne vaihtelevat muun muassa valmistusmateriaalien, koon sekä ominaisuuksiensa puolesta. Elektrolyyserin valinnassa huomioitavia pääkriteereitä ovat hyötysuhde, sähkönkulutus ja hintaluokka. (IRENA 2022; Nelhydrogen.com n.d.)

Elektrolyyserin hyötysuhteella on suorat vaikutukset sähkönkulutukseen. Jos hyötysuhde on alhainen, elektrolyyseri kuluttaa enemmän sähköä vedyn tuotannossa, kuin korkeammalla hyötysuhteella. Korkeilla hyötysuhteilla operoivat elektrolyysereit ovat yleensä kalliita ja niillä on mittavammat investointikustannukset (*Capital expenditure*, CAPEX), mutta koska sähkönkulutus heijastuu tuotantolaitoksen käyttökustannuksiin (*Operational expenditure*, OPEX) on asiaa tarkasteltava tuotantolaitoksen kokonaiskustannuksien kannalta pidemmän ajan kuluessa. (IRENA 2022; Moseley & al. 2014.)

Tuotantolaitoksessa syntyvälle vedylle voidaan asettaa laatukriteereitä käyttökohteen mukaisesti. Käyttökohteesta ja elektrolyyseristä riippuen vetyä voidaan paineistaa tarpeen mukaan. Lähtökohtaisesti elektrolyysiteknologialla tuotetulla vedyllä on korkea puhtausaste, yli 99 % mutta prosessin paineistaminen saattaa heikentää vedyn laatua. Vedyn käyttökohteella on myös vaikutusta tuotantolaitoksen sijainnin sekä alueen pinta-alan suhteen. Vety voidaan tuottaa ja käyttää paikallisesti tuotantolaitoksen läheisyydessä, jolloin

vetyä ei tarvitse kuljettaa pitkiä matkoja sen käyttökohteeseen.

Tuotantolaitoksen käytössä olevalla pinta-alalla on vaikutusta sen puolesta, että sopiiko alueelle isokokoisempi alkalielektrolyysilaitos vai kompaktimpi PEM-tuotantolaitos. (IRENA 2022; Moseley & al. 2014; Nelhydrogen.com n.d.)

Kohteen sijainnilla ja alueella on merkitystä myös sähkönkulutuksen kannalta. Mistä prosessissa hyödynnettävä sähkö saadaan? Saako elektrolyyseri energiansa sähköverkosta, vai onko se sijoitettuna jonkin energiantuotantolaitoksen yhteyteen? Elektrolyysereitä voidaan myös yhdistää osaksi aurinko- tai tuulivoimakonaisuuksia, jolloin uusiutuvilla energiamuodoilla tuotettu sähkö käytetään vedyn tuotantoon ja energia varastoituu vedyn muodossa. (Nelhydrogen.com n.d.; Valtioneuvosto 2022.)

Elektrolyysarit kuluvat käytössä, jolla on pitkänajantähtämellä vaikutusta niiden hyötysuhteeseen. Elektrolyyserin hyötysuhteen laskiessa myös vedyntuotanto laskee. Vedyn tuotantomäärää voidaan nostaa lisäämällä laitoksen tehoja, jolloin myös prosessiin kuluvan sähkön määrä nousee. Tällä on vaikutusta tuotantolaitoksen käyttökustannuksiin. Vedyn tarpeen ja käyttökohteen mukaan voidaan määrittää, onko tuotantolaitokselle ratkaisevampaa vedyn tuotannon määrä vai kustannukset. Näin ollen hyötysuhde on elektrolyyserin avainominaisuus, koska sillä on suurin vaikutus elektrolyyserin sähkönkulutukseen ja käyttökustannuksiin. Mitä korkeampi elektrolyyserin hyötysuhde on, sen vähemmän sähköä se tarvitsee operoidakseen, jolloin tuotantolaitoksen käyttökustannukset pysyvät alhaisina. Elektrolyyserin tehokkuudella on vaikutusta muihinkin oheisparametreihin kuten käyttötunteihin, käyttöikään ja investointikustannuksiin. (IRENA 2022; Nelhydrogen.com n.d.)

Lisäksi elektrolyysarit vaativat huoltoa sekä erilaisia apulaitteita kuten pumppuja, lämmönsäätelykeskuksia sekä vedenjakelujärjestelmiä toimiakseen. Taulukkoon 1 on koottu alkali- ja PEM-elektrolyysereiden pääpiirteitä ja avainominaisuuksia, jotka auttavat hahmottamaan elektrolyysiteknologioiden eroja. (IRENA 2022; Nelhydrogen.com n.d.)

Taulukko 1. Yhteenveto alkali- ja PEM-teknologioiden ominaisuuksista.
Muokattu lähteestä IRENA 2020 ja Valtioneuvosto 2022.

	Alkalielektrolyysi	PEM-elektrolyysi
Kehitys	Laajasti teollisessa käytössä 1920-luvulta alkaen.	Kehitetty 1950-luvulta lähtien.
Käyttökohde	Soveltuu sekä suuriin että pieniin tuotantolaitoksiin.	Soveltuu pieniin tuotantolaitoksiin.
Elektrodi/katalyytti (happipuoli)	Nikkelipinnoitettu huokoinen teräs	Iridiumoksidi
Elektrodi/katalyytti (vetypuoli)	Nikkelipinnoitettu huokoinen teräs	Hiilimustalla tuetut platinananopartikkelit
Anodi (kuljetuskerros)	Nikkeliverkko	Platinapinnoitettu huokoinen titaani
Katodi (kuljetuskerros)	Nikkeliverkko	Huokoinen titaani tai hiiliverkko
Anodilevy	Nikkelipinnoitettu ruostumaton teräs	Platinapinnoitettu titaani
Katodilevy	Nikkelipinnoitettu ruostumaton teräs	Kultapinnoitettu titaani
Elektrolyytin materiaali	KOH tai NaOH	PFSA-membraani
Kalvon materiaali	ZrO ₂ stabilisoitu polyfenyleenisulfidiverkolla	PFSA-membraani
Kennon lämpötila (°C)	70–90	50–80
Käyttöpaine (Bar)	1–30	< 70
Virrantiheys (A/cm ²)	0,2–0,8	1–2
Hyötysuhde (%)	50–78	50–83
Vedyn puhtausaste (%)	99,9–99,9998	99,9–99,9999
Kustannukset	Korkeampi sähkönkulutus (OPEX) ja halvemmat materiaalit (CAPEX).	Matalampi sähkönkulutus (OPEX) ja kalliimmat materiaalit (CAPEX).
CAPEX (USD/kW _e)	500–1400	1100–1800
Kennopino CAPEX, > 1 MW (USD/kW)	270	400
Systeemi CAPEX, > 10 MW (USD/kW)	500–1000	700–1400
Kennopinon käyttöikä (h)	90 000	60 000–80 000
Systeemin käyttöikä (y)	20–30	10–20

4.2 SWOT – analyysi

Opinnäytetyön päätavoitteena on alkali- ja PEM-elektrolyysiteknologian vertailu, joka toteutetaan SWOT-analyysimenetelmän avulla. SWOT-analyysimenetelmä on Yhdysvalloissa 1960-luvulla Albert S. Humphreyn kehittämä työkalu yritysten kriisitilanteiden kartoittamiseen, mutta tänä päivänä se on laajasti käytössä myös muillakin aloilla. SWOT-analyysi saa nimensä englannin kielen sanoista Strength, Weakness, Opportunities ja Threats. Strength ja Weakness, eli vahvuudet ja heikkoudet ovat teknologioiden sisäisten ominaisuuksien tarkasteluun. Opportunities ja Threats, eli mahdollisuudet ja uhat tarkastelevat teknologioita ulkoisten tekijöiden kannalta. (Gülen 2021.) SWOT-analyysi on tehty opinnäytetyön neljännen luvun alkali- ja PEM-teknologia osioiden sekä taulukko 1. pohjalta. Kummankin teknologian osalta on tehty oma SWOT-analyysi. Taulukko 2 keskittyy alkaliteknologiaan ja taulukko 3 PEM-teknologiaan. SWOT-analyysin avulla saadaan kattava kuva teknologioiden tämänhetkisestä tilanteesta vahvuuksien ja heikkouksien avulla kuin myös mahdollisia viitteitä kehityksen suunnasta ja tulevasta mahdollisuuksien ja uhkien kautta. SWOT-analyysien pohjalta tehdyt päätelmät löytyvät kappaleesta 4.3.

Taulukko 2. Alkaliteknologian SWOT-analyysi

<p>S: Vahvuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vankka ja yksinkertainen rakenne • Vakaa toiminta • Pitkäaikainen käyttöikä • Laajat käyttökohteet • Vedyn puhtausaste 99,9 % • Hinta • Ei tarvetta jalometalleille 	<p>W: Heikkoudet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hyötysuhde • Suuri sähkön tarve • Matala virrantiheys • Matala käyttöpaine • Korrosoiva nestemäinen elektrolyytti <ul style="list-style-type: none"> ➔ Huolto & ylläpito • Välikalvon mekaaninen rasitus ja vaurioitumisen riski <ul style="list-style-type: none"> ➔ Kaasujen sekoittuminen ➔ Vedyn laadun heikentyminen ja turvallisuusriskit
<p>O: Mahdollisuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nikkelin korvaaminen osittain muilla materiaaleilla • Elektrodien kehittäminen vedyn tuotannon optimoimiseksi • Elektrolyysilaitokset osana muita teollisuuden kohteita • Uusiutuvat energiamuodot sähkön tuotannossa 	<p>T: Uhat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yhteiskunnan kasvava sähköntarve <ul style="list-style-type: none"> ➔ Sähkön hinnan nousu • Vety infrastruktuurin puute • Nikkelin hinnan nousu • PEM-teknologia

Taulukko 3. PEM-teknologian SWOT-analyysi

<p>S: Vahvuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Korkea virrantiheys • Korkea hyötysuhde • Kompakti muotoilu • Matala ylläpidon tarve • Vedyn puhtausaste 99,99 % 	<p>W: Heikkoudet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hapan korrosoiva ympäristö (Nafion) <ul style="list-style-type: none"> ➔ Käyttökomponentteja rajoittavat tekijät ➔ Heikompi kestävyys • Hinta <ul style="list-style-type: none"> ➔ Jalometallien tarve • Kaupallisuus • Soveltuu vain pieniin tuotantolaitoksiin
<p>O: Mahdollisuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ohuempi välikalvo <ul style="list-style-type: none"> ➔ Korkeampi virrantiheys ➔ Tehon nousu • Jalometallien korvaaminen muilla materiaaleilla <ul style="list-style-type: none"> ➔ Halvemmat tuotantokustannukset • Huokoisen kuljetuskerroksen kehitys <ul style="list-style-type: none"> ➔ Prosessin tehostus • Käyttöiän ja stabiiliuden kasvaminen • Elektrolyysilaitokset osana muita teollisuuden kohteita • Uusiutuvat energiamuodot sähköön tuotannossa 	<p>T: Uhat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Yhteiskunnan kasvava sähköntarve <ul style="list-style-type: none"> ➔ Sähkön hinnan nousu • Pula jalometalleista <ul style="list-style-type: none"> ➔ Jalometallien hinnan nousu ➔ Nikkelin hinnan nousu • Vety infrastruktuurin puute • Muut kehittyvät elektrolyysiteknologiat

4.3 Päätelmät

Alkaliteknologia on ollut laajasti käytössä 1920-luvulta lähtien, kun ensimmäinen kaupallinen alkalielektrolyyseri kehitettiin vuonna 1927 Norjalaisen Norsk Hydro Electorlyzersin toimesta. Ensimmäiset PEM-elektrolyysarit näkivät päivän valon 1950-luvulla Yhdysvaltojen avaruushjelman perustamisen yhteydessä ja tulivat markkinoille 1960-luvulla Nafion-kalvon kehityksen seurauksena. Näin ollen alkaliteknologia sai etumatkaa kehitykselle sekä vakiinnutti asemansa perinteisenä elektrolyysiteknologian muotona.

SWOT-analyysin perusteella voimme todeta, että alkalielektrolyysarit ovat rakenteiltaan yksinkertaisia ja kestäviä, jonka ansiosta niiden toiminta on vakaata ja niillä on pitkä käyttöikä. Alkaliteknologian etu on sen soveltuvuus kaiken kokoisiin vedyn tuotantolaitoksiin ja se takaa tuotetulle vedylle korkean 99,9 % puhtausasteen. Alkalielektrolyysarit eivät käytä kalliita jalometalleja, jonka takia teknologialla on kohtuulliset tuotantokustannukset. Tosin alkaliteknologian hyödyntämisen nikkelin hinta on noussut Venäjä-Ukraina sodan seurauksena, joka tulee varmasti näkymään alkalielektrolyysereiden tuotantokustannuksissa lähiaikoina.

PEM-teknologian vahvuutena on, että elektrolyyseri pystyy operoimaan korkeilla virrantiheyksillä, jonka myötä myös vedyn tuotanto on tehokasta ja vähän energiaa kuluttavaa. PEM-teknologian virrantiheyksiä voidaan jopa nostaa ohuemmillä protoninvaihtokalvoilla, jolloin myös elektrolyserin teho nousee. Kääntöpuolena on, että ohut kalvo saattaa vaurioitua helpommin, jolloin voi tapahtua tahatonta kaasujen sekoittumista. Muita PEM-teknologian kehitysmahdollisuuksia on huokoisen kuljetuskerroksen kehittäminen elektrolyysiprosessin tehostamiseksi. PEM-elektrolyysereiden tulisi myös tulevaisuudessa yltää yhtä stabiiliin toimintaan ja pitkään käyttöikään kuin alkaliteknologia.

Toistaiseksi PEM-elektrolyysereiden käyttöä suuremman kokoluokan tuotantolaitoksissa jarruttaa PEM-teknologian pienemmät moduulikoot. PEM-elektrolyysarit käyttävät harvinaisia jalometalleja protoninvaihtokalvon

aiheuttaman happaman ympäristön takia, jossa vain tietyt materiaalit pystyvät operoimaan heikentymättä. Tämän takia erityisesti suurten tuotantolaitosten operoiminen PEM-teknologialla on vielä toistaiseksi epäkannattavaa jalometalleista syntyvien korkeiden kustannusten takia. PEM-elektrolyysereillä on kuitenkin mahdollisuudet kehitykselle korvaavilla materiaaleilla, joiden avulla myös elektrolyysereiden tuotantokustannukset saadaan alas sekä laitteistojen tuotanto saadaan taattua ilman harvinaisista raaka-aineista aiheutuvista riskitekijöistä. Kalleista raaka-aineista luopuminen myös edesauttaa teknologian kaupallistumista. Tällä hetkellä kuitenkin PEM-elektrolyysereiden kompakti muotoilu soveltuu käytettäväksi pienemmän luokan tuotantolaitoksissa.

Alkaliteknologian heikkous on sen korkea sähkönkulutus. Elektrolyyserin korkea sähkönkulutus johtuu matalista virrantiheyksistä, matalasta käyttöpaineesta ja PEM-teknologiaan verrattuna heikommasta hyötysuhteesta. Lisäksi alkalielektrolyysarit tarvitsevat säännöllistä ylläpitoa ja huoltoa vaihdettavan elektrolyytin takia. Nestemäinen elektrolyytti saattaa myös aiheuttaa kaasujen karkaamista välikalvon läpi, jonka seurauksena on kaasujen sekoittuminen ja vedyn laadun heikentyminen ja siitä syntyvät turvallisuusriskit. Tulevaisuudessa alkaliteknologian perinteistä rakennetta voidaan uudelleen suunnitella elektrolyyserin hyötysuhteen nostamiseksi.

Yhteisenä uhkana molemmille teknologioille on sähköistyvä yhteiskunta, joka lisää sähkön kysyntää sekä kilpailua sähkömarkkinoilla. Samanaikaisesti se kuitenkin myös lisää entistä enemmän tarvetta elektrolyysiteknologioille energian varastoimisen tarpeen myötä. Mahdollisuutena molemmille teknologiamuodoille on niiden hyödyntäminen osana muita teollisuuden kohteita ja uusiutuvan energian kokonaisuuksia. Vetyä voidaan käyttää tasaamaan sähkön kysynnän ja tarjonnan huippuja. Kun vetytuotantolaitos hyödyntää kysynnän ylimenevää sähköä ja energiaa säilötään vedyn muodossa, tuotantoprosessille saadaan korkea hyötysuhde. Vedyn muodossa säilötty energia voidaan muuntaa takaisin sähköksi polttokennoissa korkean sähkön kysynnän aikoina.

Toinen ulkoinen uhka molemmille teknologioille on vety infrastruktuurin puute, joka saattaa hidastaa vedyn laajaa käyttöönottoa ja investointeja elektrolyysiteknologioihin. Molemmissa teknologioissa hyödynnetään jossain määrin joko nikkeliä tai jalometalleja. Metallien tuotantoon liittyy monia aspektoja kuten eettisyys, päästöt sekä maailman tilanteen vaikutus hintaan. Kevät 2022 on ollut erinomainen esimerkki sodan vaikutuksista raaka-aineiden kustannuksiin. Tämänhetkiset alkalielektrolyysit pystyvät turvaamaan stabiilin ja pitkäikäisen tuotantolaitoksen jopa 30 vuoden käyttöiällä ja 90 000 operointitunnilla, kun taas PEM-elektrolyysereillä vastaavat luvut jäävät 20 vuoden ja 50 000–80 000 käyttötunnin paikkeille. Molemmille teknologioille yhteinen vahvuus on vedyn laadun korkea 99,9 % puhtausaste.

Elektrolyysin valitseminen tuotantolaitokselle on sidonnainen useisiin tekijöihin kuten vedyn käyttökohteeseen, laitoksen sijaintiin sekä kustannuksiin. Molempien teknologioiden haasteena on vielä korkea kustannushinta, joka alkaliteknologialla syntyy sähkönkulutuksesta ja PEM-teknologialla kalliista raaka-aineista. SWOT-analyysien perusteella tehty johtopäätös on, että koska elektrolyysiteknologian valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, paremman vaihtoehdon valitseminen alkali- ja PEM-teknologian väliltä on arvioitava tapauskohtaisesti. Molemmilla teknologioilla on vielä tilaa kehitykselle, jota luultavasti tulemme myös näkemään tulevien vuosien aikana. Lisäksi tulevaisuudessa perinteisten teknologioiden rinnalle tulee nousemaan myös muita haastajateknologioita, jotka lisäävät kilpailua elektrolyysimarkkinoilla, mutta antaa myös tuotantolaitoksille valinnan varaa tarpeisiin vastaavan teknologian löytämisessä.

5 Tulevaisuuden näkymät

Elektrolyysiteknologian on tunnustettu olevan ratkaisevassa asemassa energiamurroksen aikana, muun muassa uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetun sähkön varastoinnissa sekä fossiilisten polttoaineiden korvaamisessa. Kuitenkin suurin osa vedystä tuotetaan vielä tänä päivänä fossiilisista polttoaineista reformoimalla tai pyrolyysillä, sillä elektrolyysiteknologiasta ei vielä ole haastajaksi korkeiden investointi- ja käyttökustannuksien takia. Jotta kuitenkin päästään asetettuihin ilmastotavoitteisiin, tulee yhteiskuntien siirtyä päästöttömään energiatalouteen, jonka takia elektrolyysiteknologia on otettu suurennuslasin alle tarkasteltavaksi. Muun muassa Euroopan komission rahoittamien puiteohjelmien avulla elektrolyysiteknologiaa voidaan kehittää kannattavammaksi niin teknisesti kuin taloudellisesti. (IEA 2020; Valtioneuvosto 2022.) Tässä luvussa otetaan katsaus tulevaisuuteen, alkali- ja PEM-teknologioiden pääkehityskohtiin sekä haastajateknologioihin: kiinteäoksidielektrolyysikennon sekä anioninvaihtomembraanielektrolyysiin.

5.1 Alkaliteknologian kehityskohtia

Alkaliteknologialle potentiaalisia kehityskohtia ovat operointilämpötilan nostaminen, paksujen välikalvojen korvaaminen ohuemmilla kalvoilla, katalyyttimateriaalien uudistaminen, elektrodien uudelleensuunnittelu sekä huokoisen kuljetuskerros-konseptin (*Porous-transport-layer, PTL*) kehitys. (IRENA 2020.)

Alkalielektrolyysin operointilämpötilan nostaminen vaatisi kalvomateriaalien kehitystä, niin että lämpötilan nousulla ei olisi vaikutusta välikalvoon tai muihin kennon sisäisiin komponentteihin. Samalla kun kennon lämpötila nousee, myös kennon teho kasvaa. Paksujen välikalvojen korvaaminen ohuemmilla kalvoilla, nostaa elektrolyysin tehoa ja laskee sähkönkulutusta. Mitä ohuempi välikalvo on, sitä matalampi resistanssi vallitsee OH^- ionien yli niiden kulkiessa katodilta anodille. Tehojen nousu mahdollistaa virrantiheyksien nostamisen nykyisestä

0,5 A/cm² -tasosta 2–3 A/cm² -tasoon. Uusien välikalvojen rakenteen tulee kuitenkin noudattaa kaasun läpäisylle määritettyjä kynnysarvoja. Ohuempien välikalvojen riskit piilevät mekaanisen kestävyysheikentymisenä, joka voi johtaa kalvon rikkoutumiseen. Myös turvallisuusriskejä aiheuttavat kaasuvuodot happi- ja vetypuolien välillä ovat mahdollisia. (IRENA 2020.)

Toinen kehityskeino elektrolyserin tehon nostamiseksi on katalyyttimateriaalien uudistaminen ja samankaltaisten katalyyteilla päällystettyjen välikalvojen kehittäminen kuin PEM-teknologiassa. Elektrodien kehityksessä on keskitytty kolmiulotteisen pinta-alan laajentamiseen, jolloin prosessia kiihdyttävä KOH-elektrolyytti pääsee vaikuttamaan laajemmilla pinta-aloilla ja kiihdyttämään reaktiota entisestään. Lisäksi elektrodien etäisyyden suunnittelulla voidaan vaikuttaa vedyn tuotantoreaktioon ja siten vedyn tuotannon määrään. (Gambou & al. 2022; IRENA 2020.)

Huokoisen kuljetuskerroksen, eli PTL:n kehitys on vielä kesken. PTL:n tarkoituksena on vahvistaa elektrolyysikennon katalyyttistä kerrosta. Se päästää veden anodin ja katodin katalyyttisille kerroksille poistaen tuotetun happikaasun ja takaamalla hyvän sähkönjohtavuuden ionien liikkumista varten. Sen optimoitu mikrostrukturi takaa vakaan elektrokemiallisen suorituksen elektrolyserissä. (IRENA 2020; Zhao & al. 2021.)

5.2 PEM-teknologian kehityskohtia

PEM-teknologian potentiaalisia kehityskohtia ovat anodi- ja katodilevyt sekä aikaisemmassa kappaleessa esitelty huokoinen kuljetuskerros (PTL). PEM-elektrolyysereiden investointikustannuksia saadaan laskettua poistamalla kennon komponenttien kalliit pinnoitukset ja uudelleensuunnittelemalla kaksinapaiset levyt sekä PTL. (IRENA 2020.)

Paksummat kalvot ovat mekaanisesti kestävämpiä, ne estävät kaasujen sekoittumisen keskenään sekä nostavat systeemien käyttöikä. Niiden käytön kääntöpuolena on kuitenkin resistanssin nousu, joka laskee sähkönjohtavuutta ja virrantiheyksiä. Systeemin pidempi käyttöikä laskee investointikustannuksia,

mutta samalla se myös laskee käyttötehoa, joka johtaa sähköntarpeen kasvuun ja täten käyttökustannuksien nousuun. (IRENA 2020.)

PEM-kennon välikalvoa ohentamalla pystytään laskemaan elektrolyysin sähköntarvetta, jolla on suora vaikutus tehon nousuun. Tämänhetkiset 180 µm paksuiset välikalvot ovat vastuussa 25 % häviöistä. Markkinoilla on jo 20 µm paksuisia välikalvoja, mutta nämä eivät vielä sovellu käyttöön kennon haastavassa toimintaympäristössä. Tulevaisuudessa siirtyminen 180 µm välikalvoista 20 µm välikalvoihin laskee välikalvoista aiheutuvat häviöt 6 %: in. Samalla systeemin virrantiheyksiä voitaisiin nostaa nykyisestä 2 A/cm² -tasosta jopa 6 A/cm² asti. Tulevaisuudessa myös elektrodien pinta-alaa voidaan kasvattaa 1500 cm²:stä jopa 10 000 cm². Korkeammilla virrantiheyksillä ja laajempialaisilla elektrodeilla kennopinot saavuttavat 10 MW teholuokan. Välikalvojen ohentamisen riskinä on kuitenkin ohuiden kalvojen alttius vaurioille sekä huokosreikien muodostumiselle. (IRENA 2020.)

Elektrolyysin tehoa voidaan myös nostaa päivittämällä katalyytit aktiivisempiin materiaaleihin, jolla voi kuitenkin olla negatiiviset vaikutukset kestävyys. Hyvänä esimerkkinä toimii rutenium katalyytti, joka on aktiivisempi kuin PEM-teknologiassa yleisesti hyödynnettävä iridium. Rutenium ei kuitenkaan pysty tarjoamaan yhtä vakaata ja pitkäaikaista toimintaa kennolle kuin iridium. Katalyyttien korvaaminen muilla raaka-aineilla on vaikeaa, sillä tyypillisesti ei kriittisten raaka-aineiden käyttö johtaa vähemmän kestäviin ja helposti liukeneviin katalyytteihin. (IRENA 2020.)

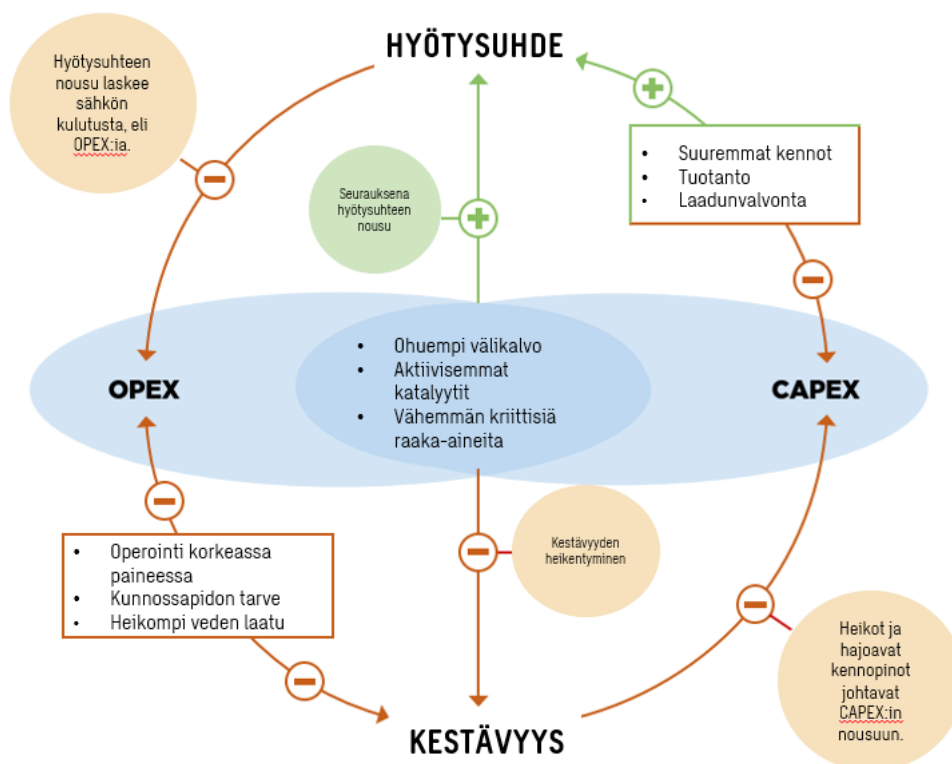
Yleisesti ottaen, paras keino investointikustannusten laskemiseen on jalometallien käytöstä luopuminen. Kennojen anodipuolen kuljetuskerroksessa käytetään platinalla pinnoitettua titaania, joka suojaa kennoa hyvin korroosiolta sekä ympäristön kuormitukselta, mutta nostaa systeemin hintatasoa. Myös kennon kaksinapaiset levyt valmistetaan titaanista ja suojataan platinalla sekä kullalla. Titaanilevyt tulisi korvata vaihtoehtoisilla materiaaleilla ja välttää kalliiden jalometallien käyttöä pinnoituksessa. Myös membraanit, jotka ovat pinnoitettu katalyyteillä tulisi uudelleen suunnitella halvempia raaka-aineita hyödyntäen. (IRENA 2020.)

5.3 Alkali- & PEM-teknologian yhteiset kehitystavoitteet

Yhteisiä molemmille teknologioille kohdistuvia kehitystavoitteita ovat:

- Elektrolyyserin tehon nostaminen
 - ➔ Johtaa käyttökustannuksien laskemiseen
- Kennopinon kapasiteetin nostaminen ja virransyötön lisääminen.
 - ➔ Suorat vaikutukset vedyn tuotantoon
- Jokaisen elektrolyyserin käyttöikä ja kestävyys yli 100 000 tuntiin.
- Investointikulujen laskeminen
 - ➔ Sekä kennopinon että koko systeemin osalta.

Nämä neljä osa-aluetta ovat liitoksissa toisiinsa ja yleensä yhden osa-alueen suorituskyvyn parantuminen johtaa toisen heikentymiseen. Molemmille elektrolyysiteknologioille yhteisiä kehityskohteita ja tavoitteita ovat esimerkiksi harvinaisten raaka-aineiden käytön lopettaminen, välikalvojen kehitys sekä aktiivisempien katalyyttien käyttö. Kuva 6 kuvastaa näiden osa-alueiden suhdetta ja niiden kehityksen vaikutusta toisiinsa, sekä systeemin investointikustannuksiin (CAPEX) ja käyttökustannuksiin (OPEX). Lähtökohtaisesti kehityksen ei tulisi aiheuttaa takapakkia toiselle osa-alueelle, jonka takia voidaan sanoa, että alkali- ja PEM-teknologioiden kehitysprosessit ovat vielä kesken. Elektrolyyserien kehitys ja uudelleensuunnittelu tulee olemaan tulevaisuudessa keskeisessä asemassa elektrolyysilaitosten kannattavuuden ja käytön lisäämisen kannalta. (IRENA 2020.)



Kuva 6. Teknologioiden kehityksen vaikutukset CAPEX:iin ja OPEX:iin. Muokattu lähteestä IRENA 2020.

5.4 Tulevaisuuden haastajateknologiat

Elektrolyysereiden kehittyessä ja käytön yleistyessä alkali- ja PEM-teknologioiden rinnalle nousee myös uusia haastajateknologioita. Seuraavaksi esitellään kaksi kehitysvaiheessa olevaa elektrolyysiteknologiaa, joilla voi olla potentiaalista jalansijaa tulevaisuuden vetymarkkinoilla. (IRENA 2020.)

5.4.1 Kiinteäoksidi-elektrolyysikennon (SOEC)

Kiinteäoksidi-elektrolyysikennot (*Solid oxide electrolyzer cell, SOEC*) ovat niin sanotusti uuden sukupolven elektrolyysereitä. Ne operoivat korkeissa lämpötiloissa 700–850 °C asteessa ja operoivat höyryn avulla. Nämä olosuhteet ovat suotuisia nikkelistä valmistettujen elektrodien käytölle. Sähkön tarve laskee

ja osa energiasta, jota käytetään veden hajottamiseen, saadaan lämmöstä. Reaktio on endoterminen, eli se sitoo lämpöä samalla lämpötilan noustessa. Tällöin hukkalämpöä voidaan hyödyntää prosessissa, jolloin prosessin näennäisteho voi nousta yli 100 %. SOEC:in etuna on, että se tarjoaa mahdollisuuden laitteiston operointiin myös käänteisesti, eli sekä elektrolyyserinä vedyn tuotannossa, että polttokennona sähkön tuotannossa. SOEC-teknologiaa voidaan myös hyödyntää synteettisen kaasun valmistuksessa hiilidioksidista ja vedestä, joka on kemianteollisuuden peruspilari. Toisaalta prosessin kääntöpuolena on termokemiallinen sykli, joka erityisesti sammutus ajanjaksoina johtaa nopeaan hajoamiseen ja lyhyeen käyttöikänsä. Muita kennojen hajoamiseen liittyviä ongelmia ovat tiivistämisen haasteet korkeilla paine-eroilla, elektrodien kontaminoituminen piioksidia käytettäessä tiivisteaineena, sekä muut epäpuhtauksien lähteet putkistosta, liitännöistä ja tiivistyksestä. SOEC-teknologiaa on yleisesti kehitetty vasta kW-tasolla, vaikkakin demonstraatioprojekteissa on päästy 1 MW kokoluokkiin. (IRENA 2020.)

5.4.2 Anioninvaihtomembraanielektrolyysi (AEM)

Anioninvaihtomembraani (*Anion Exchange Membranes, AEM*) on viimeisin elektrolyysiteknologian muoto. Vain muutama yritys on lähtenyt kaupallistamaan ja kehittämään kyseistä teknologian muotoa. AEM on yhdistelmä alkalielektrolyysereiden vähemmän ankaraa ympäristöä yhdistettynä PEM-elektrolyysereiden yksinkertaisuuteen ja tehokkuuteen. AEM-teknologia hyödyntää epäjalojametalleja katalyytteinä sekä on vapaa titaanista valmistetuista komponenteista. Lisäksi AEM-elektrolyyseri pystyy operoimaan PEM-elektrolyyserin tavoin vaihtelevilla paine-eroilla. Teknologian haasteena on kuitenkin kemialliset ja mekaaniset vakaus ongelmat, jotka johtavat epävakaisiin eliniän odotuksiin. Lisäksi suoriutuminen ei ole yhtä hyvää kuin on odotettu, johtuen AEM:in alhaisesta sähkönjohtavuudesta, heikoista elektrodi rakenteista sekä katalyyttien hitaasta kinetiikasta. Suorituskykyä parannetaan muokkaamalla välikalvon johtavuusominaisuuksia, tai vaihtoehtoisesti

lisäämällä prosessia tehostavaa elektrolyyttiä (KOH tai natriumkarbonaattia, NaHCO_3). Johtavuusominaisuuksien muokkaus voi kuitenkin johtaa kestävyiden laskemiseen. OH^- ioni on luonnostaan kolme kertaa hitaampi, eli sillä on matalampi johtuvuus, kuin PEM:in H^+ protoneilla, mikä pakottaa AEM-teknologian kehittäjät joko tekemään ohuempia kalvoja tai korkeampia lataustiheyksiä. (IRENA 2020.)

6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli alkali- ja PEM-teknologioiden vertailu elektrolyysiprosesseissa. Johdatus aiheeseen kävi vedyn ja sen yleisimpien käyttö- ja tuotantotapojen kautta. Ennen teknologioiden vertailun tekemistä aihetta pohjustettiin esittelemällä alkali- ja PEM-teknologioiden rakennetta, toimintaa ja ominaisuuksia. Opinnäytetyön tavoitteena ollut vertailuosio toteutettiin SWOT-analyysien avulla, joiden tuloksia ja niiden pohjalta tehtyjä päätelmiä esiteltiin päätelmät kappaleessa. Lopuksi tehtiin katsaus alkali- ja PEM-teknologioiden potentiaalsiin kehityskohtiin sekä tulevaisuuden kilpakumppaneihin, SOEC- ja AEM-teknologioihin.

SWOT-analyysin tulosten pohjalta tehty päätelmä on, että koska elektrolyysiteknologian valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, paremman vaihtoehdon valitseminen alkali- ja PEM-teknologian väliltä on arvioitava tapauskohtaisesti. Jokainen teknologia kohtaa omat haasteensa kriittisistä materiaaleista, kestäväyyteen sekä teknologian kehittymättömyyteen asti, jonka takia ei ole yhtä selvää voittajaa teknologioiden välillä. Tämä kuitenkin myös jättää oven auki kilpailulle ja innovaatioille sekä antaa mahdollisuuden teknologioiden kehitykselle.

Työssä käytetyt materiaalit ovat lähtöisin Turun ammattikorkeakoulun kirjastosta sekä tietokannasta, Turun kaupungin kirjastosta sekä verkosta löytyneiltä sivustoilta. Koska elektrolyysiteknologia on nopeasti kehittyvää teknologiaa, kirjalliset lähteet voivat vanhentua nopeasti, joka on huomioitava työn ajankohtaisuudessa. Lisäksi teknologioiden tämänhetkisiä todellisia teknisiä tietoja on vaikea saada käsiin, koska ne ovat yritysten välisten kilpailun takia yleensä salattua tietoa ja normaalin kuluttajan käsien ulottamattomissa. Kirjastoista peräisin olevat painetut materiaalit ovat vanhimpia julkaisupäivän mukaan, mutta ne sopivat hyvin elektrolyysin perusperiaatteiden kuvailuun.

Opinnäytetyön kannalta merkittävimmät verkosta löytyneet lähteet olivat IEA (*International Energy Agency*) sekä IRENA (*International Renewable Energy Agency*). Muita verkosta löytyneitä lähteitä olivat muun muassa tieteelliset

tutkimukset, verkkolehdet, energia- ja teknologiayritysten julkiset verkkomateriaalit sekä valtioiden ja kansainvälisten järjestöjen julkaisemat raportit. Verkosta löytyy paljon aiheeseen liittyvää materiaalia, mutta nimensä mukaisesti *WorldWideWeb* (WWW) on kaikkien käytettävissä ja kuka vaan voi tuottaa sieltä löytyviä materiaaleja. Tämä on huomioitava lähteiden luotettavuutta ja paikkansapitävyyttä arvioitaessa, etenkin jos julkaisun kirjoittajan taustat eivät ole tarkistettavissa. On myös muistettava, että kaupallisilla sivuilla saattaa olla oma motiivinsa julkaistun materiaalin tuotannolle. Lähtökohtaisesti kuitenkin painetut kirjat, varmennetut tieteelliset julkaisut sekä valtioiden tai kansainvälisten järjestöjen tuottamat raportit ovat luotettavaa lähdemateriaalia. Merkittävä osa käytetyistä lähteistä oli englanninkielisiä ja niitä kääntäessä suomen kielelle voi syntyä käännösvirheitä. Osa työn suorista englanti-suomi käännöksistä voi ajan kuluessa myös vakiintua muilla suomen kielen termeillä.

Työ menee ajoittain hyvin yksityiskohtaiselle tasolle teknologioiden esittelyssä. Kaikilla esitellyillä teknologian yksittäisillä piirteillä ja ominaisuuksilla ei ole merkitystä työn lopputuleman kannalta, jonka takia teknologioiden esittelyosuus olisi voinut jäädä yleisemmälle tasolle. Toisaalta niiden sisältyminen työhön ei suoranaisesti heikonna työn laatua, mutta ajankäytön suhteen osuuden supistaminen olisi ollut varteen otettava vaihtoehto. Lopuksi, SWOT-analyysille oli haastavaa löytää tuoretta ja puhtaasti puolueetonta lähdettä. Suuri osa SWOT-analyysissä käytetyistä tiedoista oli vuodelta 2020 ja vuonna 2022 osa näistäkin saattaa olla jo vanhentuneita, joka on huomioitava työn ajankohtaisuutta arvioidessa.

Työtä voisi jatkaa analysoimalla elektrolyysituotantolaitosten yksityiskohtaisempia piirteitä, tai päinvastaisesti ottamalla entistä laajemman näkökulman aiheen tarkasteluun. Esiteltyjä teknologioita ja niiden ominaisuuksia voisi tutkia vielä tarkemmin materiaalien ja ominaisuuksien osalta. Jos vertailuosio oltaisiin tehty vertailemalla kahta kaupallista elektrolyyseriä, vertailu perustuisi konkreettisiin esimerkkeihin, jolloin tulokset olisivat tarkempia ja todenmukaisempia. Muutaman vuoden päästä tehtävällä

SWOT-analyysillä voi olla hyvinkin erilaiset tulokset teknologioiden kehittyessä ja kaupallistuessa, ja sen myötä kustannusten laskiessa. Teknologioiden kehityssuunnista voidaan tehdä arvioita, mutta vain aika näyttää mikä on teknologioiden todellinen tilanne esimerkiksi vuosikymmenen päästä.

Vedyn on tunnustettu olevan ratkaisevassa asemassa energiantuotannon siirtyessä fossiilisten polttoaineiden käytöstä uusiutuviin energiamuotoihin. Vety on monikäyttöinen alkuaine, jota voidaan hyödyntää raaka-aineena, polttoaineena, energiankantajana ja väliaineena energian varastointiin. Jatkuvasti kehittyvän elektrolyysiteknologian ansiosta vetyä voidaan tuottaa täysin päästöttömästi Pariisin ilmastotavoitteiden mukaisesti. Tämän takia, moneen muottiin menevä vety on tulevaisuuden energiatalouden puuttuva palanen.

Lähteet

Antila, A., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H. & Pohjakallio, M. 2008. Tekniikan kemia: painos 10. Helsinki: Edita Prima Oy, s.196-198.

Autio, A. & Törnudd, N. 2022. Nikkelin hinta hurjassa nousussa – lähes tuplaantui yhdessä päivässä. Suomenmaa verkkouutiset. Osoitteessa: <<https://www.suomenmaa.fi/uutiset/nikkelin-hinta-hurjassa-nousussa-lahes-tuplaantui-yhdessa-paivassa/>> [Viitattu 31.05.2022].

BatteryUniversity.com[1] 2021. BU-808c: Coulombic and Energy Efficiency with the Battery. Battery University verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://batteryuniversity.com/article/bu-808c-coulombic-and-energy-efficiency-with-the-battery>> [Viitattu 22.05.2022].

BatteryUniversity.com[2] 2021. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery University verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>> [Viitattu 22.05.2022].

Barbir, F. 2005. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. Solar Energy verkkolehti: julkaisu 78(5), s.661-669. Osoitteessa: <https://www.academia.edu/49705282/PEM_electrolysis_for_production_of_hydrogen_from_renewable_energy_sources>.

Brink, P. 2018. Reservimarkkinat turvaavat sähkönsaannin. Fingrid-lehti. Osoitteessa: <<https://www.fingridlehti.fi/reservimarkkinat-turvaavat/>> [Viitattu 22.05.2022].

Carmo, M., Fritz, D., Mergel, J. and Stolten D. 2013. A comprehensive review on PEM water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy verkkolehti: julkaisu 38(12), s.4901-4934. Osoitteessa: <https://www.researchgate.net/publication/236902272_A_comprehensive_review_on_PEM_electrolysis>.

China Electric Power Research Institute 2016. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. Jiangsu: verkkojulkaisu Springer. Osoitteessa: <https://www.researchgate.net/publication/309305832_Challenges_and_progresses_of_energy_storage_technology_and_its_application_in_power_systems>.

sses_of_energy_storage_technology_and_its_application_in_power_systems> [Viitattu 26.05.2022].

Fingrid.fi n.d. Johdanto sähkömarkkinoihin. Fingrid verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#taseselvitys>> [Viitattu 22.05.2022].

Gambou, F., Guilbert, D., Zasadzinski, M. and Rafaralahy, H. 2022. A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling: Electrical Domain and Specific Electrolyte Conductivity. Energies verkkojulkaisu, julkaisu 15(9), s.3452. Osoitteessa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3452?type=check_update&version=1>.

García-Valverde, R., Espinosa, N. and Urbina, A. 2012. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. International Journal of Hydrogen Energy verkkolehti, julkaisu 37(2). Osoitteessa: <https://www.academia.edu/22740054/Simple_PEM_water_electrolyser_model_and_experimental_validation>.

Godula-Jopek, A 2015. Hydrogen Production: By Electrolysis, John Wiley & Sons, Incorporated, s.1-27, 63-113, 117-161 Berlin. Saatavilla: ProQuest Ebook Central. [Viitattu 11.02.2022].

Gülen, K. 2021. Mikä on SWOT-analyysi: Määritelmä, historia ja komponentit. TechBriefly verkkojulkaisu. Osoitteessa: <<https://fi.techbriefly.com/mika-on-swot-analyysi-maaritelma-historia-ja-komponentit-articles-53666/>> [Viitattu 04.05.2022].

Hanhinen, H. 2022. Maakaasun tulo Venäjältä Suomeen loppui. Yle verkkouutiset. Osoitteessa: <<https://yle.fi/uutiset/3-12456020>> [Viitattu 30.05.2022].

Haveri, P. and Kostamo, J., n.d. Säättövoima - Energiateollisuus. Energia verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima>> [Viitattu 18.04.2022].

Hoogers, G. 2003. Fuel Cell Technology Handbook. CRC Press LLC, s.1.3-1.5, 5.1-5.2.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus, s.292-296.

H2Bulletin.com n.d. Hydrogen colours codes. H2 Bulletin verkkojulkaisu. Osoitteessa: <<https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>> [Viitattu 12.04.2022].

Siemens-energy.com 2022. Hydrogen Power Plants. Siemens-energy verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/power-plants/hydrogen-power-plants.html>> [Viitattu 26.05.2022].

IEA 2021. Global Hydrogen Review 2021. International Energy Agency raportti, s.5-20, 40-49, 108-134. Osoitteessa: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>> [Viitattu 20.04.2022].

IEA 2019. The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities. International Energy Agency raportti, s.13-16, 22-29, 31-35, 37-45. Osoitteessa: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>> [Viitattu 20.04.2022].

Ilmasto-opas.fi 2020. Hillintä. Ilmasto-opas verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/42433dde-827f-485e-9fa9-45b49fbfa317/maailman-kasvihuonekaasupaastot-kasvavat-yha.html>> [Viitattu 12.04.2022].

IRENA 2020. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency raportti. Osoitteessa: <<https://irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>> [Viitattu 20.05.2022].

Kaila, L., Meriläinen, P., Ojala, P. and Pihko, P. 2006. Reaktio; 4, Metallit ja materiaalit / lukio kemia. Hämeenlinna: Kaila, Meriläinen, Ojala, Pihko ja Kustannusosakeyhtiö Tammi, painos 1, s.47-49.

Lampinen, A. 2009. Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta. Joensuu: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, s.228-233, 302-303.

Larminie, J. and Dicks, A. 2000. Fuell Cell Systems Explained. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, s.1-12, 109-121.

Lassi, U. and Wikman, B. 2011. Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi, HighBio-projektijulkaisu. Kokkola: Jyväskylän yliopisto,

Kokkolan yliopistokeskus Chydenius, s.68-78 (71). Osoitteessa:
<https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/27058/978-951-39-4313-4.pdf?sequence=1> [Viitattu 23.02.2022].

Lehtonen, P. & Lehtonen, P. 2008. Teknisten alojen kemia. 1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy, s.150,158-159.

Motiva 2020. Vety. Motiva verkkomateriaali. Osoitteessa:
https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_vii_saasti/energialahteet/vety [Viitattu 17.02.2022].

Metalcentergroup.fi 2022. Nikkeli. Metalcentergroup verkkomateriaali. Osoitteessa: <https://www.metalcentergroup.fi/metallihinnat/nikkeli> [Viitattu 23.05.2022].

Moseley, P, Garche, J, & Moseley, PT 2014 Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, Elsevier, Oxford s. 3-11, 33-52, 53-60, 103-127 Saatavilla: ProQuest Ebook Central. [04.06.2022].

Nelhydrogen.com n.d. Hydrogen Production. Nel Hydrogen verkkojulkaisu. Osoitteessa: <https://nelhydrogen.com/market/hydrogen-production/> [Viitattu 04.06.2022].

Polonský, J., Mazúr, P., Paidar, M., Christensen, E. and Bouzek, K. 2014. Performance of a PEM water electrolyser using a TaC-supported iridium oxide electrocatalyst. International Journal of Hydrogen Energy verkkolehti, julkaisu 39(7), s.3072-3078. Osoitteessa:
<https://findit.dtu.dk/en/catalog/537f109974bed2fd2100edf7> [Viitattu 04.06.2022].

Polonský, J., Petrushina, I., Christensen, E., Bouzek, K., Prag, C., Andersen, J. and Bjerrum, N. 2012. Tantalum carbide as a novel support material for anode electrocatalysts in polymer electrolyte membrane water electrolyzers. International Journal of Hydrogen Energy verkkolehti, julkaisu 37(3), s.2173-2181. Osoitteessa:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031991102533X?via%3Dihub> [Viitattu 04.06.2022].

Press.siemens.com 2020. Siemens Gas and Power GmbH & Co. KG, Engie Solutions and Centrax Ltd., 2020. HYFLEXPOWER: The world's first integrated power-to-X-to-power hydrogen gas turbine demonstrator. Press Siemens

lehdistötiedote. Osoitteessa:

<<https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/hyflexpower-worlds-first-integrated-power-x-power-hydrogen-gas-turbine-demonstrator>> [Viitattu 26.05.2022].

Pyke, D. 2021. Opinion: Decoding the Hydrogen T-Rainbow. Rail Ricardo verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://rail.ricardo.com/news/opinion-decoding-the-hydrogen-t-rainbow>> [Viitattu 12.04.2022].

Rozain, C., Mayousse, E., Guillet, N. and Millet, P. 2016. Influence of iridium oxide loadings on the performance of PEM water electrolysis cells: Part I–Pure IrO₂ -based anodes. Applied Catalysis B: Environmental verkkojulkaisu, 182, s.153-160.

Schaller, D. 2021. Commercial Freight Trucking Electrification. Cmap.illinois.gov verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://www.cmap.illinois.gov/documents/10180/1316713/NACFE+CMAP+Electrification+Overview+May+2021.pdf/98df2782-49a9-de24-050d-f30c9b701fd9?t=1621262098113>> [Viitattu 12.04.2022].

Suomen ilmastopaneeli 2021. Katsaus Suomen teollisuuden sähköistämisen teknologisiin ratkaisuihin. Suomen ilmastopaneeli raportti, s.21-26, 53-55. Osoitteessa: <<https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/12/ilmastopaneelin-raportti-4-2021-katsaus-teollisuuden-sahkoistamisen-ratkaisuihin.pdf>> [Viitattu 18.04.2022].

Insight.swecogroup.com 2022. Toimialaesittelyt ja referenssit – Sweco Suomessa - Sweco Industry. Insight Sweco Group sisäinen verkkomateriaali. [Viitattu 04.06.2022].

Valtioneuvosto 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:21. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia, s.18-22, 31, 34, 38-39, 131-140, 194-199. Osoitteessa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Viitattu 21.04.2022].

Vartiainen, E. 2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. Fortum blogi. Osoitteessa: <<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin#:~:text=Kun%20vety%C3%A4%20tuotetaan%20elektrolyysill%C3>>

%A4%2C%20hy%C3%B6tysuhde,hy%C3%B6tysuhde%20on%2040%E2%80%9355%20prosenttia.> [Viitattu 21.04.2022].

VTT 2013. Vetytiekartta – Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle.
Tampere/Espoo: VTT raportti, s. 6-12, 14-18, 20-23, 38-46,51,54,59,66-68.

Zhao, B., Lee, C., Lee, J., Jacobson, D., Hussey, D. and Bazylak, A.
2021. Superhydrophilic porous transport layer enhances efficiency of polymer electrolyte membrane electrolyzers. Cell Report Physical Science 2. Elsevier verkkojulkaisu. Osoitteessa:
<<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2666386421002952?token=01CD4652B487E5165D0A9D84DD6EE2F6BFFA03DD778F13DCD2CE1D27B33CA7199D65E40519B5A021334DFA467AD485D5&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220530191056>> [Viitattu 30.05.2022].