



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**VIHREÄN VEDYN JA PERINTEISESTI
TUOTETUN VEDYN
TUOTANTOTEKNOLOGIOIDEN
TALOUDELLINEN VERTAILU**

Julius Jalava

PROSESSITEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Vihreän vedyn ja perinteisesti tuotetun vedyn tuotantoteknologioiden taloudellinen vertailu

Julius Jalava

Oulun yliopisto, Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 33 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Aki Sorsa ja Jari Ruuska

Kandidaatintyö käsittelee vihreän vedyn valmistuksen ja höyryreformointi-menetelmän tuotantoteknologioita. Työn tavoitteena on vertailla tuotantoteknologioiden taloudellisia näkökohtia.

Työn alussa käsitellään mitä vety itsessään on ja mihin sitä voidaan käyttää. Tämän jälkeen perehdytään vedyn eri valmistusmenetelmiin. Lopuksi vertaillaan vakiintuneen menetelmän ja veden elektrolyysin taloudellisia näkökohtia, sekä mitkä niihin vaikuttaa ja mitä tekijöitä on erityisesti otettava huomioon, jolloin vertailu olisi mahdollisimman tarkka.

Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä perehtymällä kirjallisuuteen, artikkeleihin ja muihin julkaisuihin. Selvityksen jälkeen höyryreformointi on vakiintunut ja halvin menetelmä vedyn tuottamiseen nykyään. Vihreä vety puolestaan tavoittelee kilpailukykyä markkinoilla nyt ja tulevaisuudessa monien erilaisten innovaatioiden ja kehitystöiden avulla.

Asiasanat: höyryreformointi, veden elektrolyysi, vihreä vety

ABSTRACT

Economic comparison of green hydrogen and conventional hydrogen production technologies

Julius Jalava

University of Oulu, Degree Programme in Process Engineering

Bachelor's thesis 2024, 33 p.

Supervisors at the university: Aki Sorsa and Jari Ruuska

The thesis deals with production technologies for green hydrogen production and the steam reforming process. The aim of the thesis is to compare the economic aspects of the production technologies.

Thesis starts with a discussion of what hydrogen itself is and what it can be used for. This is followed by an introduction to the different hydrogen production processes. Finally, a comparison is made between the economics of the established process and water electrolysis, what influences them and what factors need to be taken into account in order to make the comparison as accurate as possible.

The work has been carried out as a literature review by consulting the literature, articles and other publications. Following this study, steam reforming is the most established and cheapest method of producing hydrogen today. Green hydrogen, on the other hand, is pursuing competitiveness in the market now and in the future through a wide range of innovations and developments.

Keywords: steam reforming, water electrolysis, green hydrogen

Oulu, 17.04.2024

Julius Jalava

Julius Jalava

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	VETY	6
2.1	Vedyn käyttö	6
2.2	Vetytalouden tulevaisuus.....	7
2.3	Vihreä vety	9
2.3.1	Vetyelektrolyysin kustannukset	9
2.3.2	Vedyn varastointi ja siirto	10
2.3.3	Sähköstä tuotteeksi.....	10
2.4	Muut vetytyypit	11
3	VEDYN VALMISTUS.....	12
3.1	Höyryreformointi.....	12
3.1.1	Rikinpoisto	14
3.1.2	Reformointi	15
3.1.3	Vesikaasunsiirtoreaktio	15
3.1.4	Vedyn puhdistus.....	15
3.2	Veden elektrolyysi.....	16
3.2.1	Järjestelmätaso	16
3.2.2	Pinotaso	17
3.2.3	Kennotaso.....	18
3.3	Elektrolyserit	18
3.3.1	Alkalelektrolyysi.....	19
3.3.2	Polymeerielektrolyyttikalvo.....	20
3.3.3	Anioninvaihtokalvot.....	21
3.3.4	Kiinteäoksidi	22
4	TALOUDELLISET NÄKÖKOHDAT	25
4.1	Vetytuotannon kustannukset	25
4.1.1	Raaka-aineiden hinta	26
4.2	Vihreän vedyn elektrolyyserien kustannukset.....	29
4.2.1	Elektrolyyserien suunnittelussa huomioitavat asiat	30
5	ANALYYSI JA JOHTOPÄÄTÖKSET	31
6	YHTEENVETO	33
	LÄHDELUETTELO.....	34

1 JOHDANTO

Vedystä on tullut yksi keskeisimmistä puheenaiheista tulevaisuuden energia- ja ilmastokeskusteluissa. Uusiutuvista energialähteistä valmistettu vety tulee saamaan suuren potentiaalin varsinkin teollisuudessa ja liikenteessä. Vety on johtava vaihtoehto uusiutuvista energialähteistä saatavan energian varastoinniksi, ja se vaikuttaa kustannustehokkaalta ratkaisulta sähkön varastoinniksi pitkiksi ajoiksi. Vetyä voidaan käyttää mm. suoraan polttoaineena, se on tärkeä komponentti tuotantoprosesseissa ja sitä voidaan käyttää energian varastointimuotona. (Sivill et al. 2022 s. 17; IEA 2019 s. 13)

Vety voi olla ratkaisu kriittisiin energiahaasteisiin. Se tarjoaa mahdollisuuksia hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen eri aloilla, kuten pitkän matkan liikenteessä, kemikaaleissa, rauta- ja terästeollisuudessa, joissa päästöjen vähentäminen on osoittautunut vaikeaksi. Lisäksi sitä käytettäessä voidaan parantaa ilmanlaatua ja vahvistaa energiaomavaraisuutta. Kunnianhimoisista kansainvälisistä ilmastotavoitteista huolimatta maailmanlaajuiset energiaan liittyvät hiilidioksidipäästöt saavuttivat kaikkien aikojen ennätysensä vuonna 2018. Ulkoilman saastuminen on merkittävä ongelma, joka aiheuttaa vuosittain noin 3 miljoonaa ennenaikaista kuolemaa. (IEA 2019, s. 13)

Vetyä on aiemmin yritetty epäonnistuneesti vakiinnuttaa käyttökelpoiseksi energialähteeksi. Viimeaikaiset saavutukset aurinkosähkön, tuulivoiman, akkujen ja sähköajoneuvojen aloilla ovat kuitenkin osoittaneet, että politiikan ja teknologian avulla voidaan luoda menestyksekkäitä maailmanlaajuisia, puhtaan energian teollisuudenaloja. Maailmanlaajuisen energia-alan muuttuessa merkittävästi vedyn monipuolisuus on herättänyt yhä enemmän huomiota monien hallitusten ja yritysten keskuudessa. Vetyä tukevat hallitukset, jotka tuovat ja vievät energiaa. Vetyä tukevat myös uusiutuvien energialähteiden toimittajat, teollisuuskaasun tuottajat, sähkö- ja kaasulaitokset, autonvalmistajat, öljy- ja kaasuyhtiöt ja suuret insinööritoimistot. Investoinnit vetyyn voivat edistää uutta teknologista ja teollista kehitystä talouksissa maailmanlaajuisesti ja luoda monipuolisia työpaikkoja. Vetyä voidaan käyttää useammalla alalla. Nykyään vetyä käytetään pääasiassa öljynjalostuksessa ja lannoitteiden tuotannossa. Jotta vedyllä olisi merkittävä rooli puhtaaseen energiaan siirtymisessä, sitä on käytettävä myös aloilla, joilla sitä ei hyödynnetä riittävästi, kuten liikenteessä, rakentamisessa ja sähköntuotannossa. (IEA 2019, s. 13–14)

2 VETY

Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen ja kevyin alkuaine ja sen järjestysluku on 1. Vedyn kemiallinen merkki on H ja se kuuluu epämetalleihin. Vety on koko universumin yleisin alkuaine ja puhdas vety esiintyy ilmakehässä kaasuna.

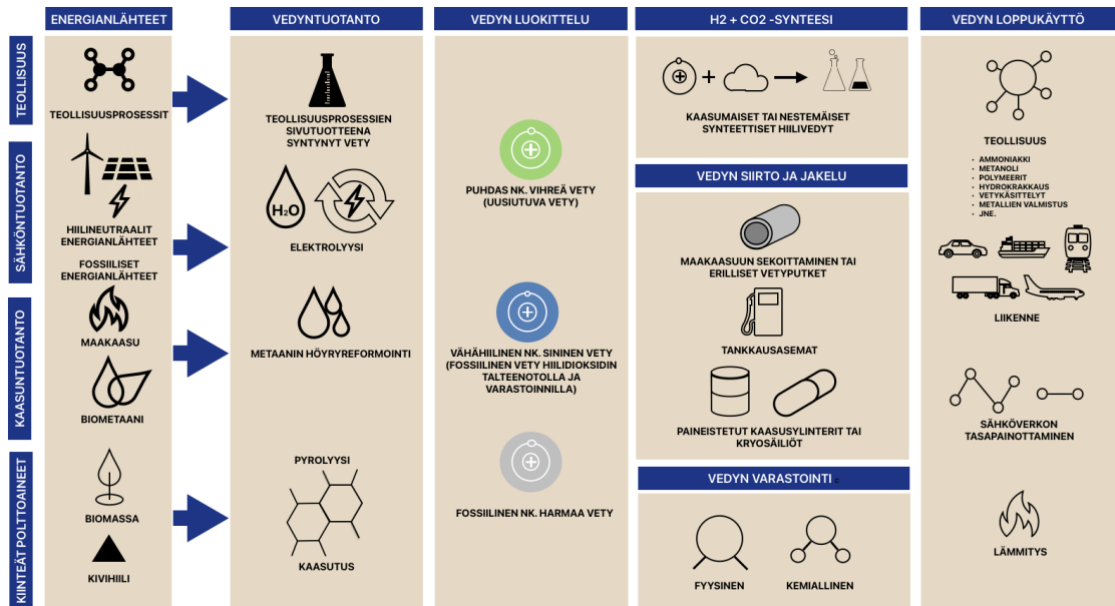
Vaikka vety on yleisin alkuaine, sen massaosuus maankuoresta on ainoastaan noin 0,14 painoprosenttia. Kuitenkin vetyä esiintyy suurina määrinä valtamerissä, järvissä, joissa ja ilmakehässä. Vetyä löytyy kaikista eläin- ja kasvikudoksista sekä maaöljystä. (Subramani et al. 2015, s. 3)

Yleisen käsityksen mukaan hiilen yhdisteitä tunnetaan enemmän kuin minkään muun alkuaineen yhdisteitä. Totuus on kuitenkin se, että vetyä löytyy lähes kaikista hiiliyhdisteistä ja se muodostaa suuren määrän yhdisteitä muiden alkuaineiden kanssa, pois lukien joitain jalokaasuja. On siis todennäköistä, että vety-yhdisteitä on enemmän. (Subramani et al. 2015, s. 3)

2.1 Vedyn käyttö

Vety on monipuolinen alkuaine ja reagoi useiden alkuaineiden kanssa ja muodostaa erilaisia hyödyllisiä yhdisteitä. Esimerkiksi, kun vety sitoutuu hiileen, se muodostaa vankan perustan suurelle joukolle orgaanisia molekyyylejä, jotka tunnetaan hiilivetyinä. Samoin, kun vety sitoutuu happeen, yhdessä ne muodostavat vettä, maapallon tärkeintä yksittäistä yhdistettä. (Subramani et al. 2015, s. 3)

Kuvassa 1 on esitetty keskeisimmät vedyn käyttökohteet. Kuvasta 1 nähdään, että tänä päivänä käytettävissä olevat erilaiset teknologiat mahdollistavat vedyn tuotannon, varastoinnin, kuljetuksen ja käytön eri tavoin. Vedyn tuottamiseen voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita, kuten uusiutuvia energialähteitä, ydinvoimaa, maakaasua, hiiltä ja öljyä. Vetyä voidaan kuljettaa kaasuna putkistoissa tai nestemäisessä muodossa laivoilla nesteytetyn maakaasun (engl. liquefied natural gas, LNG) tapaan. Vety voidaan muuntaa sähköksi ja metaaniksi kotien ja teollisuuden käyttövoimaksi sekä autojen, kuorma-autojen, laivojen ja lentokoneiden polttoaineeksi. (IEA 2019, s. 13)



Kuva 1. Yleiskuva vedyn vaihtoehtoisista arvoketjuista. Mukaillen lähteestä (Sivill et al. 2022)

Vedyn suuren massaenergiatiheyden, pienen tiheyden ja helpon sähkökemiallisen muunnoksen ansiosta energian kuljettaminen on mahdollista maantieteellisten alueiden poikki putkistojen avulla tai nestemäisten polttoaineiden, kuten ammoniakkin muodossa rahtialuksissa [Kuva 1]. (Oliveira et al. 2021, s. 1)

Nykyään suurin osa vedystä saadaan maaakaasusta ja hiilestä. Vetyä tuotetaan jo teollisessa mittakaavassa maailmanlaajuisesti, mutta sen tuotannon vuotuiset CO₂-päästöt vastaavat Indonesian ja Iso-Britannian päästöjä yhteensä. Puhtaan energian tulevaisuuden saavuttaminen edellyttää hiilidioksidin talteenottoa fossiilisten polttoaineiden vedyn tuotannosta ja vedyn saannin lisäämistä puhtaasta sähköstä. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä jo olemassa olevaa mittakaavaa. (IEA 2019, s. 14)

2.2 Vetytalon tulevaisuus

Vedyn laajamittaiseen käyttöön maailmanlaajuisessa energiamurroksessa liittyy kuitenkin useita haasteita. Vedyn tuottaminen vähähiilisistä energialähteistä on nykyisin kallista. IEA:n analyysin mukaan uusiutuvasta sähköstä tuotetun vedyn tuotantokustannukset voisivat laskea 30 prosenttia vuoteen 2030 mennessä uusiutuvan energian kustannusten laskun ja vedyn tuotannon lisääntymisen ansiosta.

Massatuotannosta voivat hyötyä polttokennot, tankkauslaitteet ja elektrolyysi, jossa vetyä tuotetaan sähköstä ja vedestä. (IEA 2019, s. 14)

Vetyinfrastruktuurin kehittämisen hitaus estää laajan käyttöönoton nopeasti. Vedyn hinta kuluttajille riippuu suuresti käytettävissä olevien tankkausasemien lukumäärästä, niiden käyttötiheydestä ja päivässä toimitettavan vedyn määrästä. Tämän ongelman ratkaiseminen edellyttää suunnittelua ja koordinoitua kansallisten ja paikallisten hallitusten, teollisuuden ja sijoittajien kesken. (IEA 2019, s. 14)

Kansainvälinen energiajärjestö IEA on määritellyt neljä mahdollisuutta lähitulevaisuudessa lisätä vedyn käyttöä sen puhtaan ja laajan käyttöönoton saavuttamiseksi. Keskittyminen näihin todellisiin ponnahduslautoihin voisi auttaa vetyä saavuttamaan tarvittavan mittakaavan kustannusten alentamiseksi ja hallitusten ja yksityisen sektorin riskien vähentämiseksi. Vaikka jokainen mahdollisuus palvelee ainutlaatuisia tarkoituksia, ne myös täydentävät toisiaan. (IEA 2019, s. 15)

Esimerkkinä voidaan käyttää rakentamista olemassa olevaan infrastruktuuriin, kuten miljoonien kilometrien pituisiin maakaasuputkiin. Puhtaan vedyn ottaminen käyttöön korvaamaan vain 5 % maiden maakaasutoimituksista voisi lisätä merkittävästi vedyn kysyntää ja alentaa kustannuksia. (IEA 2019, s. 15)

2.3 Vihreä vety

Kuten kuvasta 1 voidaan tulkita, vihreää vetyä valmistetaan veden elektrolyysissä käyttäen kokonaan uusiutuvaa energialähdettä, kuten aurinko-, tuuli- tai vesivoimaa, veden jakamiseen hapeksi ja vedyksi ilman kasvihuonekaasupäästöjä. Vetyä voidaan käyttää monipuolisesti eri tarkoituksiin. Sitä voidaan käyttää raaka-aineena, polttoaineena, energiankantajana ja myös väliaineena energian varastointiin. Vety on hyvä vaihtoehto fossiilisten raaka-aineiden ja energianlähteiden korvaamiseksi monissa sovelluksissa tuottaessa se ympäristöystävällisesti. Vihreän vedyn tuottaminen vaatii joko elektrolyysiä, joka käyttää uusiutuvaa sähköä, tai muita prosesseja, kuten biopohjaisten raaka-aineiden hyödyntämistä. (Oliveira et al. 2021, s. 1; Sivill et al. 2022, s. 19)

Vetyä käytetään nykyään pääasiassa öljynjalostuksessa ja ammoniakkin valmistuksessa. Teollisuuden vedyntuotanto ja -käsittely ovat vakiintuneita ja tunnettuja prosesseja. Nykyään lähes kaikki vety valmistetaan fossiilisista energialähteistä. (Sivill et al. 2022, s. 20)

Lisäksi teollisuudessa ja logistiikka-alalla kehitellään uusia prosesseja ja teknologioita, joiden avulla voitaisiin korvata fossiiliset raaka-aineet ja polttoaineet vetyä hyödyntävillä ratkaisuilla. Terästeollisuudessa on jo tutkittu raudan suorapelkistystä vedyn avulla fossiilisten hiililähteiden sijaan. Vedyn avulla voidaan valmistaa synteettisiä raaka-aineita ja polttoaineita, kuten metaania, metanolia, bensiiniä, kerosiinia ja dieseliä. Tätä konseptia kutsutaan Power-to-X:ksi (P2X). (Sivill et al. 2022, s. 20)

2.3.1 Vetyelektrolyysin kustannukset

Vedyn tuottamisen kustannusten uusiutuvista energialähteistä odotetaan vähentyvän, kun elektrolyysilaitteita tulee laajemmin saataville ja yksikkökoot kasvavat. Tällä hetkellä vetyä tuotetaan maailmanlaajuisesti alle 200 MW elektrolyysikapasiteetilla, ja useimmat laitokset ovat kooltaan alle 1 MW. Ala laajenee kuitenkin nopeasti, ja useita 100 MW:n hankkeita on suunnitteilla. (Vartiainen 2020)

Optimististen ennusteiden mukaan vetyyn perustuva tuotanto voisi tulevaisuudessa kattaa jopa neljänneksen maailman energiantarpeesta. Tämä edellyttäisi kuitenkin elektrolyysikapasiteetin merkittävää lisäämistä ja elektrolyysilaitteiden hinnan

alentamista. Vedyntuotannon kustannuksia hallitsevat tällä hetkellä sähkön kustannukset, mutta aurinko- ja tuulivoiman kustannusten jatkuvan laskun odotetaan alentavan näitä kustannuksia. (Vartiainen 2020)

2.3.2 Vedyn varastointi ja siirto

Varastointi ja kuljetus ovat vedyn suurimpia haasteita sen kemiallisen luonteen vuoksi. Lupaavimmat paikat vedyn varastoinnille ovat maanalaiset suolakiviesiintymät, vaikka nyt vain kuusi tällaista luolaa on käytössä vedyn varastointiin maailmanlaajuisesti, kun taas maakaasua varastoidaan tuhansissa luolissa. Vetyä voidaan varastoida kallioluoliin ammoniakkinä, nestemäisenä vetynä tai nestemäisinä orgaanisina yhdisteinä. Paineistetut säiliöt soveltuvat parhaiten pienemmille määrille. (Vartiainen 2020)

Putkikuljetus on tehokkain menetelmä suurille vety- ja maakaasumäärille. Vaikka vetyputkistoja on jo tuhansia kilometrejä ympäri maailmaa, on tärkeää huomata, että korkeapaineisen vedyn kuljetukseen tarvittava putkisto eroaa maakaasun kuljetukseen käytettävästä putkistosta. Tulevaisuudessa komposiittimuovien odotetaan olevan vetyputkistojen ensisijainen materiaali. Vedyn kuljettaminen laivalla tai kuorma-autolla on huomattavasti kalliimpaa kuin kaasuputkistojen käyttö. (Vartiainen 2020)

2.3.3 Sähköstä tuotteeksi

Teollisuudessa ja liikenteessä kehitetään parhaillaan uusia prosesseja ja teknologioita, joilla voidaan korvata fossiilisten raaka-aineiden ja polttoaineiden käyttö vetyyn perustuvilla vaihtoehdoilla. Esimerkiksi terästeollisuus kehittää parhaillaan prosessia raudan suorapelkistämiseen vedyn avulla, mikä korvaisi fossiilisen hiilen käytön. (Sivill et al. 2022, s. 20)

Vetyä voidaan käyttää synteettisten raaka-aineiden ja polttoaineiden, kuten metaanin, metanolin, bensiinin, petrolin tai dieselin, tuottamiseen Power-to-X-prosessissa. Synteettisten hiilivetyjen tuotantoon tarvitaan hiilidioksidia, jota saadaan hiilidioksidin talteenotolla ja hyödyntämisellä (engl. carbon capture and utilisation, CCU). CCU ei vaikuta hiilidioksiditasoihin ilmaston kannalta, sillä talteen otettu hiilidioksidi vapautuu lyhyellä aikavälillä takaisin ilmakehään. (Sivill et al. 2022, s. 20)

2.4 Muut vetytyypit

Fossiilinen vety eli harmaa vety tuotetaan maakaasusta, ja sen valmistuksen aikana syntyy hiilidioksidipäästöjä (CO₂). Vähähiilistä vetyä tuotetaan prosesseilla, jotka aiheuttavat vähemmän hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi tuottamalla se fossiilisista energialähteistä ja samalla otetaan talteen syntyvä hiilidioksidi, joka varastoidaan. Puhdasta vetyä, joka on päästötöntä vetyä, tuotetaan muista päästöttömistä lähteistä, kuten ydinenergiasta. Uusiutuvaa vetyä (ts. vihreää vetyä) tuotetaan uusiutuvista energialähteistä, kuten aurinko-, tuuli- tai vesivoimasta. (Sivill et al. 2022, s. 14)

3 VEDYN VALMISTUS

Vetyä tuotetaan maakaasusta yleensä reformoimalla. Maakaasun höyryreformoinnin (engl. steam methane reforming, SMR) endotermisen luonteen vuoksi prosessi vaatii lämmöntuottoa. Sen vuoksi vedyn tuotantoon on kehitetty muita prosesseja, kuten osittainen hapetus ja itselämmitteinen reformointi (engl. autothermal reforming, ATR). (Subramani et al. 2015)

Vuosittain tuotetaan noin 70 miljoonaa tonnia vetyä, josta noin 76 prosenttia on peräisin maakaasusta ja loput noin 23 prosenttia hiilestä. Vedyn tuotantoon kuluu noin 205 miljardia kuutiometriä maakaasua (vastaa 6 prosenttia maakaasun maailmanlaajuisesta kulutuksesta) ja 107 miljoonaa tonnia hiiltä (vastaa 2 prosenttia hiilen maailmanlaajuisesta kulutuksesta). Tällä hetkellä maailmanlaajuinen vedyntuotanto aiheuttaa 830 MtCO₂/vuosi (miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttonnia vuodessa), joka vastaa Indonesian ja Yhdistyneen kuningaskunnan vuotuisia hiilidioksidipäästöjä yhteensä. (IEA 2019, s. 17)

Uusia prosesseja kehitetään, koska vedyn tuotanto höyryreformoinnilla on suurta ja koska prosessit ovat monimutkaisia, kuten vaiheiden suuri lukumäärä, termodynaamiset rajoitukset ja alhaiset energiatehokkuudet, aiheuttavat haittoja. (Subramani et al. 2015, s. 83)

3.1 Höyryreformointi

IEA (2019) mukaan vedyn valmistukseen on olemassa kolme eri menetelmää: höyryreformointi, jossa käytetään vettä hapettimena ja vedyn lähteenä; osittainen hapetus ja ATR. Osittaishapetuksessa happi reagoi maakaasun kanssa eksotermisessä reaktiossa stoikiometrisessä palamissuhteessa. Näin ollen ulkoista lämpöä ei tarvita. ATR on höyryreformoinnin ja osittaishapetuksen yhdistelmä. Tässä prosessissa reformointiin tarvittava energia tuotetaan hiilivetyjen osittaisella hapettumisella. (Subramani et al. 2015, s. 84)

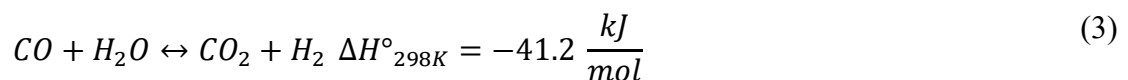
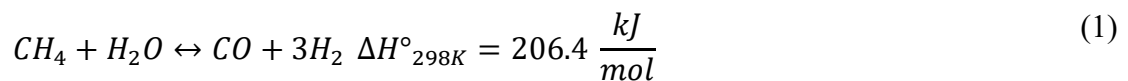
Höyryreformointi on vakiintunut tekniikka vedyn tuotannossa. Nykyään vetyä tuotetaan ensisijaisesti maakaasun höyryreformoinnilla. Muita uusiutumattomia raaka-aineita vedyn tuottamiseksi höyryreformoinnilla ovat metanoli, nestekaasu (engl. liquefied

petroleum gas, LPG) (lähinnä propaani ja butaani), teollisuusbenssiini, lentopetroli ja diesel. Parhaan raaka-aineen valinnassa olisi otettava huomioon prosessin kokonaistaloudellisuus. Raaka-aineen kustannukset ja riittävä tuotantomäärä ovat olennaisia. (Subramani et al. 2015, s. 83)

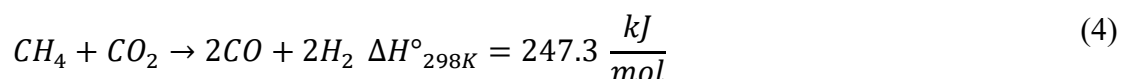
Öljylähteistä peräisin olevan maakaasun käsittelyn jälkeen se sisältää pääasiassa yhtä kemiallista yhdistettä, metaania. Maakaasun tyypillinen koostumus on seuraava (tilavuusprosentteina ilmaistuna): 95 % CH₄, 3,5 % C₂₊, 1 % N₂, 0,5 % CO₂ ja pieniä määriä rikkiyhdisteitä. (Subramani et al. 2015, s. 83)

Höyryreformointi on hiilivetyjen ja höyryn välinen reaktio, jossa syntyy vetyä, hiilimonoksidia, hiilidioksidia ja muuntumattomia reaktioaineita. Höyry voidaan korvata hiilidioksidilla reaktioaineena. (Rostrup-Nielsen et al. 2011, s. 14)

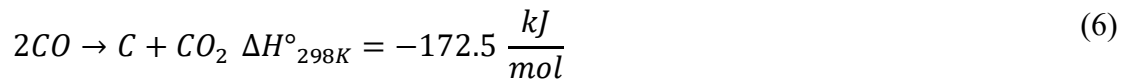
Maakaasu on höyryreformoinnin ensisijainen raaka-aine. Maakaasun höyryreformointiin liittyvät tärkeimmät reaktiot ovat seuraavat (Subramani et al. 2015, s. 83–84):



C_nH_{2n+2} yhtälössä (2) edustaa maakaasun sisältämiä metaania suurempia hiilivetyjä. Yhtälö (3) tunnetaan nimellä vesikaasunsiirtoreaktio (engl. water-gas shift reaction, WGS). Yhtälöt (1) ja (2) ovat endotermisiä reaktioita, kun taas yhtälössä (3) reaktio on hieman eksotermisen. Yleisesti ottaen prosessi on endotermisen. Yhtälössä (4) tapahtuva reaktio on mahdollinen, ja sitä kutsutaan CO₂-reformoinniksi tai kuivareformoinniksi.



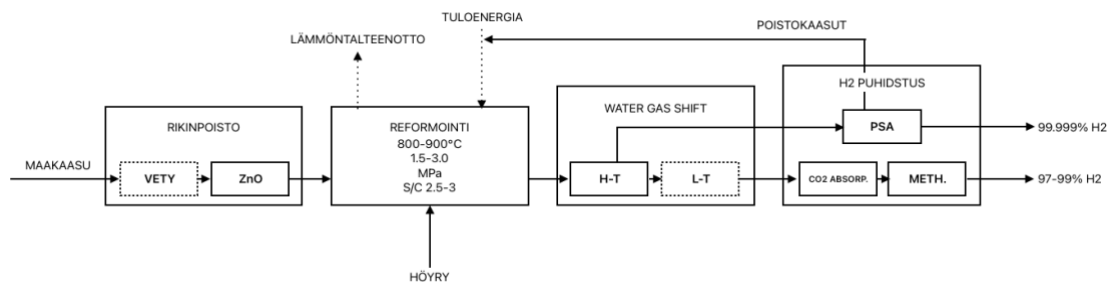
Muita maakaasun höyryreformointiin liittyviä toissijaisia reaktioita ovat:



Yhtälö (5) on metaanin hajoamisreaktio ja yhtälö (6) on Boudouard-reaktio. Nämä reaktiot tuottavat hiilikerrostumia. (Subramani et al. 2015, s 84)

$\Delta H^\circ_{298\text{K}}$ on reaktioentalpia, eli tuotteiden ja lähtöaineiden entalpioiden erotus, joka kertoo, onko reaktio eksoterminen vai endoterminen. Kun se on negatiivinen, kyseessä on eksoterminen reaktio ja kun positiivinen, on kyseessä endoterminen reaktio.

Kuvassa 2 on esitelty maakaasun höyryreformointiprosessi. Tärkeimmät maakaasun höyryreformointiin vaikuttavat muuttujat ovat lämpötila, paine ja höyryn ja hiilen moolisuhde, jotka nähdään kuvasta 2. Muuttujien valinnassa tulee huomioida termodynamiikan lisäksi kinetiikka, talous ja kaasun käyttö. Maakaasun höyryreformointi tapahtuu reaktiopedissä, joka sisältää tyypillisesti nikkeliin pohjautuvaa katalyyttiä, joka helpottaa kineettisiä reaktioita (1) ja (2) ja alentaa siten reformointilämpötilaa. (Subramani et al. 2015, s. 84)



Kuva 2. Lohkokaavio tavanomaisesta vedyn tuotantolaitoksesta, jossa käytetään maakaasun höyryreformointia. Mukailten lähteestä (Subramani et al. 2015)

3.1.1 Rikinpoisto

Rikinpoisto suoritetaan kuvan 2 mukaisesti ennen höyryreformointia ja on välttämätön vaihe, koska reformoinnin ja matalalämpötilaisen siirtoreaktorin katalyytit ovat erittäin herkkiä rikille. Maakaasu sisältää yleensä pieniä määriä rikkiyhdisteitä, yleensä rikkivedyn muodossa, mutta se voi sisältää myös karbonyylisulfidia ja korkeampia orgaanisia rikkiyhdisteitä, kuten merkaptaneja ja tiofeenia. (Subramani et al. 2015, s. 86)

Vetyreaktiossa tarvittava vety otetaan tuotevirrasta, ja sitä käytetään noin 5 prosenttia maakaasun osalta. Vetykäsittely vähentää olefiinien määrää reformoinnin syötteessä, joka vähentää katalyytin, kaksin, aiheuttamaa deaktivoitumista. Rikinpoisto-vaiheesta kaasu poistuu lämpötilan ollessa välillä 350–400 °C ja rikkipitoisuus on alle 1ppm. (Subramani et al. 2015, s. 86)

3.1.2 Reformointi

Reformointivaiheessa tapahtuu maakaasun höyryreformointireaktioita. Reformointi prosessin toimintaolosuhteet kuvan 2 mukaan, vaihtelevat 800–900 °C välillä, ja prosessipaine vaihtelee 1,5–3,0 MPa:n välillä. Maakaasun molaarinen höyryn ja hiilen suhde on yleensä 2,5–3. (Subramani et al. 2015, s. 86)

3.1.3 Vesikaasunsiirtoreaktio

Tässä vaiheessa on yleensä kaksi WGS-reaktoria kuvan 2 mukaisesti. Korkean lämpötilan siirtymämuunnoksessa 350 °C:een jäähdytetty kaasu, jonka CO-pitoisuus on suuri, muunnetaan vedyksi WGS-reaktiolla yhtälö (3) käyttämällä rautaoksidipohjaisia katalyyttejä. Kaasu jäähdytetään noin 220 °C:een ja johdetaan sitten matalan lämpötilan siirtoreaktoriin. (Subramani et al. 2015, s. 88)

3.1.4 Vedyn puhdistus

Vedyn puhdistamiseen on kaksi päävaihtoehtoa kuvan 2 mukaisesti. Ensimmäisessä vaihtoehdossa käytetään paine-heilahdusadsorptiota (engl. pressure-swing adsorption, PSA). Korkean lämpötilan siirtymämuunnoksen jälkeen kaasu jäähdytetään ympäristön lämpötilaan, ja vesi lauhdutetaan ja poistetaan ennen kuin kaasu johdetaan adsorptiovaiheeseen. Puhdistusprosessin tuloksena syntyvän vetytuotteen puhtausaste on jopa 99,999 %. PSA:n poistokaasun vetyhäviöt poltetaan reformerissa, jolloin saadaan nostettua syöttölämpöä ja vähennetään polttoainetarvetta. (Subramani et al. 2015, s. 89)

Toisessa vaihtoehdossa käytetään korkean lämpötilan siirtymämuunninta ja matalan lämpötilan siirtymäreaktoria kuvan 2 mukaan. Tuotekaasu jäähdytetään ympäristön lämpötilaan ja johdetaan hiilidioksidipesuriin, jossa käytetään monoetanoliamiinia tai kuumaa potaskaa (kaliumkarbonaattia). Vedyn jäljellä olevat epäpuhtaudet,

hiilimonoksidin ja hiilidioksidin jäämät, poistetaan katalyyttisessä metanointivaiheessa. Tällä prosessilla voidaan saavuttaa 97–99 % vedyn puhtausaste (ilman inerttejä kaasuja). Klassista reittiä käytetään vain erityistapauksissa, kuten:

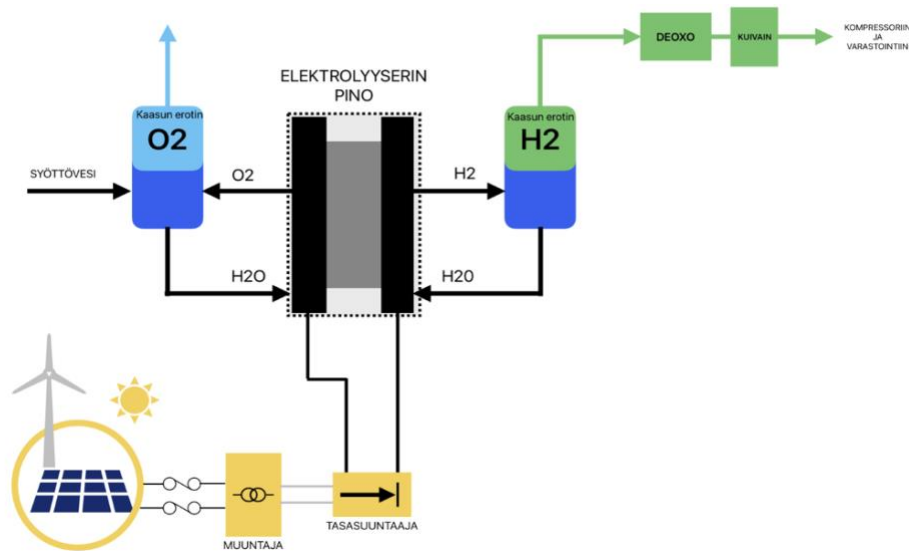
1. Kallis maakaasu
2. Reformerin polttoaine on halpaa.
3. Hiilidioksidi on haluttu tuote
4. Vetyä voidaan sietää puhtaudeltaan alle 99,9 %. (Subramani et al. 2015, s. 89)

3.2 Veden elektrolyysi

Veden elektrolyysin periaate on yksinkertainen, ja sen avulla voidaan luoda erilaisia teknologisia muunnelmia, jotka perustuvat fysikaaliskemiallisiin ja sähkökemiallisiin näkökohtiin. Veden elektrolyysiprosessissa vesi jaetaan vedyksi ja hapeksi sähkövirran avulla. Tämä saavutetaan käyttämällä elektrolyysilaitteita, joita kutsutaan elektrolyysereiksi. Elektrolyyseri koostuu kahdesta pääkomponentista: pinosta, jossa vesi jaetaan vedyksi ja hapeksi, ja järjestelmätasosta, johon kuuluvat sähkönsyöttö, veden syöttö ja puhdistus, puristus sekä mahdollisesti sähkön ja vedyn puskurit ja vedyn käsittely. Vesielektrolyysit voidaan jakaa kolmeen tasoon. (IRENA 2020, s. 31)

3.2.1 Järjestelmätaso

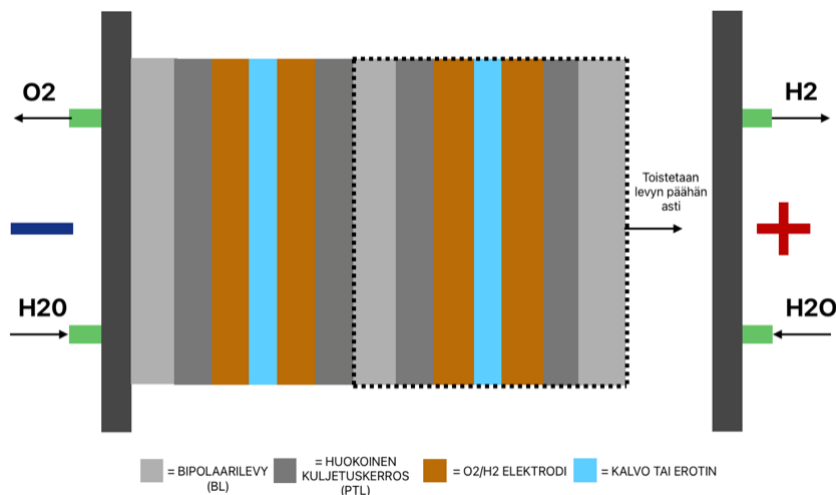
Järjestelmätasoon sisältyy laitteet jäähdytykseen, vedyn käsittelyyn (esim. puhtaus ja puristus) ja sähkön muuntamiseen (esim. muuntaja ja tasasuuntaaja). Lisäksi järjestelmätasoon kuuluu vedensyötön käsittely (esim. deionisointi) ja kaasun tuottaminen (esim. happi) (IRENA 2020, s.27). Vesielektrolyyserin järjestelmätaso on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Vesielektrolyysin järjestelmätaso. Mukailen lähteestä (IRENA 2020)

3.2.2 Pinotaso

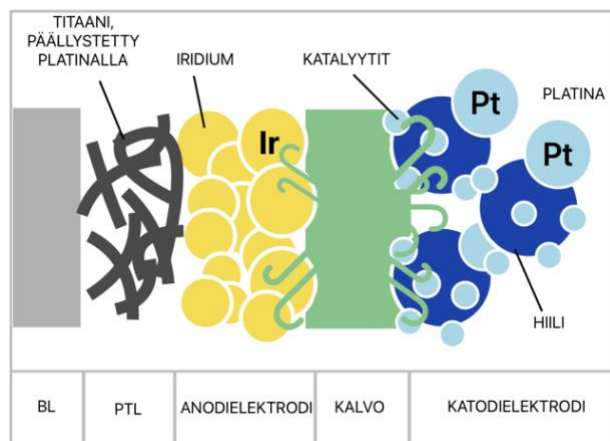
Pino voidaan jakaa laajempaan skaalaan. Laajaan skaalaan kuuluu useita sarjaan kytkettyjä kennoja ja välilevyjä (eristävää materiaalia kahden vastakkaisen elektrodin välissä). Lisäksi pinossa tarvitaan tiivisteitä, kehyksiä (mekaaninen tuki) ja päätylevyjä (vuotojen välttämiseksi ja nesteiden keräämiseksi) (IRENA 2020, s. 27). Kuvassa 4 on esitetty vesielektrolyysin pinotaso.



Kuva 4. Vesielektrolyysin pinotaso. Mukailen lähteestä (IRENA 2020)

3.2.3 Kennotaso

Kennotaso on elektrolyserin ydin, jossa sähkökemiallinen prosessi tapahtuu. Se koostuu kahdesta elektrodista (anodi ja katodi), jotka on upotettu nestemäiseen elektrolyyttiin tai jotka ovat kiinteän elektrolyyttikalvon vieressä, kahdesta huokoisesta kuljetuskerroksesta (jotka helpottavat reagoivien aineiden kulkeutumista ja tuotteiden poistumista) sekä kaksinapaisista levyistä, jotka tarjoavat mekaanisen tuen ja jakavat virtauksen. (IRENA 2020, s-27) Vesielektrolyserin kennotaso on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Vesielektrolyserin kennotaso. Mukailten lähteestä (IRENA 2020)

Veden elektrolyysikennon peruseriaatteeseen kuuluu kaksi elektrodia, jotka on erotettu toisistaan elektrolyytillä. Elektrolyytti kuljettaa syntyneet kemialliset varaukset (anionit (-) tai kationit (+)) toisesta elektrodista toiseen. Emäksisen tyypin tapauksessa OH⁻-anionien kuljettamiseen käytetään yleensä erittäin väkevää kaliumhydroksidiliuosta (KOH-liuos). Elektrodit ja tuotetut kaasut erotetaan toisistaan huokoisella epäorgaanisella kalvolla (separaattori), ja joka läpäisee KOH-liuoksen. (IRENA 2020, s. 32)

3.3 Elektrolyysit

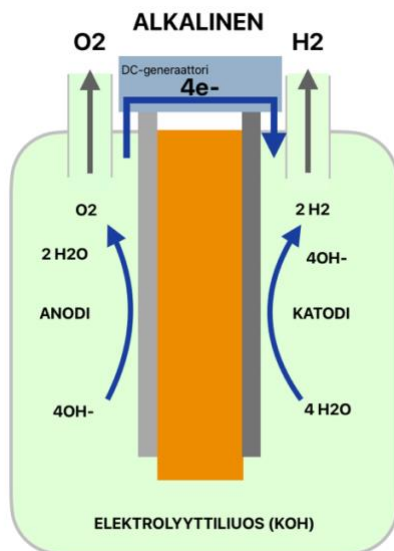
Elektrolyysit luokitellaan tyypillisesti neljään pääteknologiaan elektrolyytin ja käyttölämpötilan perusteella, jotka ohjaavat materiaalien ja komponenttien valintaa. Nämä teknologiat ovat: **alkalinen**, **polymeerielektrolyyttikalvo** (engl. proton exchange membrane, PEM), **anioninvaihtokalvo** (engl. anion exchange membrane, AEM) ja **kiinteä oksidi** (engl. solid oxide electrolyser, SOEC). Alkalinen- ja PEM-elektrolyysit

ovat jo kaupallisessa käytössä, kun taas AEM ja SOEC ovat nyt vatsa laboratoriomittakaavassa ja lupaavat merkittävää edistystä vedyn valmistukseen. (IRENA 2020, s. 31–32)

PEM-, AEM- ja kiinteäoksidin elektrolyysereissä elektrodit on erotettu toisistaan elektronieristävällä kiinteällä elektrolyytillä. Tämä kiinteä elektrolyytti vastaa ionien kuljettamisesta elektrodilta toiselle ja tuotettujen kaasujen fyysisestä erottamisesta. Tähän tarkoitukseen ei tarvitse lisätä nestemäistä elektrolyyttiliuosta, koska ionien kuljetus tapahtuu PEM-, AEM- tai kiinteäoksidin komponentin sisällä. (IRENA 2020, s. 31–32)

3.3.1 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysissä kaksi metallielektrodia upotetaan nestemäiseen elektrolyyttiliuokseen, joka on tyypillisesti KOH-liuos, jonka pitoisuus on enintään 40 painoprosenttia, jotta sähkönjohtavuus maksimoitaisiin jopa 90 °C:n lämpötiloissa. Prosessi kuluttaa vain vettä, jota on syötettävä kennoon reaktion ylläpitämiseksi ja elektrolyyttikonsentraation pitämiseksi optimaalisella tasolla. (Bessarabov et al. 2018, s. 20) Alkalinen elektrolyysi on esitetty kuvassa 6.



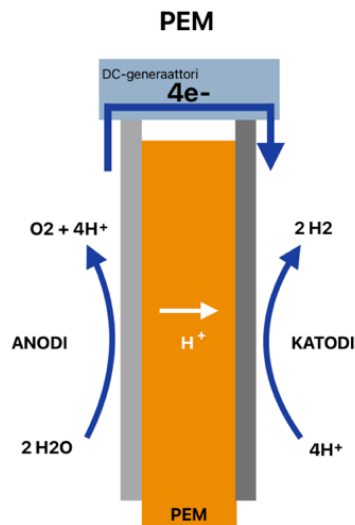
Kuva 6. Kaupallisesti saatavilla oleva alkalinen elektrolyysi. Mukailten lähteestä (IRENA 2020)

Alkaliset elektrolyysarit ovat yksinkertaisia pino- ja järjestelmätason rakenteeltaan, joten ne ovat suhteellisen helppoja valmistaa. Tällä hetkellä niiden elektrodipinta-ala on

jopa 3 m². Ne toimivat käyttämällä elektrolyyttinä korkeaa KOH-pitoisuutta, kestäviä ZrO₂-pohjaisia kalvoja ja nikkellillä päällystettyä ruostumatonta terästä elektrodeina. Hydroksyyli-ioni (OH⁻) toimii ionisena varauksenkuljettajana, kun taas KOH ja vesi läpäisevät huokoisen kalvorakenteen sähkökemiallisen reaktion helpottamiseksi. Tämä mahdollistaa elektrolyyttiin liuenneiden kaasujen (H₂ ja O₂) sekoittumisen, mikä rajoittaa tehoaluetta ja kykyä toimia korkeammilla painetasoilla. (IRENA 2020, s. 33–34)

3.3.2 Polymeerielektrolyttikalvo

PEM-elektrolyysissä kaksi elektrodia on kosketuksissa protoneita johtavan polymeerielektrolyytin kanssa muodostaen kalvoelektrodikokoonpanon (engl. membrane electrode assembly, MEA). Tämän jälkeen MEA upotetaan puhtaaseen veteen, jonka vastus on 18 megaohmia senttimetriä kohti. Protonit jäävät polymeerikalvon sisään. (Bessarabov et al. 2018, s. 75–77; IRENA 2020, s. 33–34) PEM-elektrolyysi on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Kaupallisesti saatavilla oleva PEM-elektrolyysi. Mukailten lähteestä (IRENA 2020)

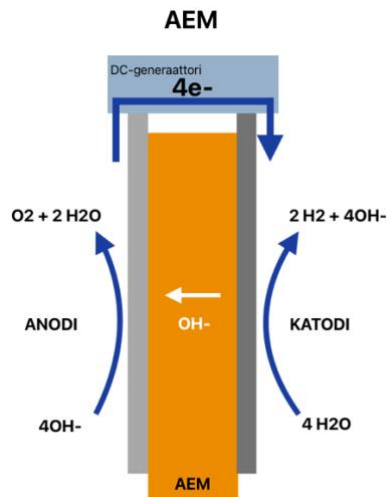
PEM-elektrolyyseri teknologiassa käytetään ohutta (0,2 mm) perfluorosulfonihappokalvoa (engl. perfluorosulfonic acid, PFSA) ja kehittynyttä elektrodirakennetta korkeamman hyötysuhteen saavuttamiseksi. PFSA-kalvo on sekä kemiallisesti että mekaanisesti kestävä, ja se mahdollistaa suuret paine-erot.

Protoninvaihtokalvokennot (PEM-kennot) pystyvät toimimaan jopa 70 baarin paineessa, kun happipuoli pidetään ilmakehän paineessa. (IRENA 2020, s. 33–34)

PFSA-kalvon tarjoamien happamien olosuhteiden, korkeiden jännitteiden ja anodin hapen kehittymisen aiheuttama ankara hapetusympäristö edellyttää sellaisten materiaalien käyttöä, jotka kestävät näitä olosuhteita. Titaanipohjaiset materiaalit, jalometallikatalyytit ja suojapinnoitteet ovat välttämättömiä kennon komponenttien pitkäaikaisen vakauden sekä optimaalisen elektroninjohtavuuden ja kennon hyötysuhteen takaamiseksi. (IRENA 2020, s. 33–34)

3.3.3 Anioninvaihtokalvot

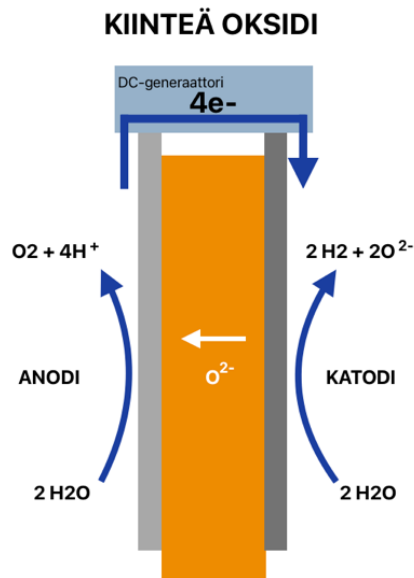
Anioninvaihtokalvot (engl. anion exchange membrane, AEM) ovat uusi teknologia. AEM:llä on mahdollista yhdistää emäksisten elektrolyyserien vähemmän ankara ympäristö ja PEM-elektrolyyserien yksinkertaisuus ja tehokkuus. Siinä voidaan käyttää muita kuin emäksisiä katalyyttejä ja titaanittomia komponentteja, ja PEM:n tavoin se voi toimia paine-erossa. AEM-kalvolla on kuitenkin kemiallisia ja mekaanisia stabiilisuusongelmia, jotka johtavat epävakaaseen käyttöikäprofiiliin. Lisäksi suorituskyky ei ole vastannut odotuksia, mikä johtuu pääasiassa AEM:n alhaisesta johtavuudesta, riittämättömästä elektrodiarkkitehtuurista ja katalyytin hitaasta kinetiikasta. Yleensä suorituskykyä parannetaan säätämällä kalvon johtavuusominaisuuksia tai lisäämällä tukielektrolyyttiä, kuten KOH:ta tai natriumbikarbonaattia (NaHCO_3). Järjestelmän virittäminen voi johtaa kestävyuden heikkenemiseen. On tärkeää huomata, että OH^- ionin johtavuus PEM:ssä on alhaisempi kuin H^+ protonien, mikä tarkoittaa, että AEM-kehittäjien on joko luotava ohuempia kalvoja tai kalvoja, joissa on suurempi varaustiheys. (IRENA 2020, s. 33–34) AEM-elektrolyysi on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Kaupallisesti saatavilla oleva AEM-elektrolyysi. Mukailten lähteestä (IRENA 2020)

3.3.4 Kiinteäoksidgelektrolyysi

Kiinteäoksidgelektrolyysin elektrolyysit toimivat korkeissa $700\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötiloissa. Kiinteäoksidgelektrolyysi on esitetty kuvassa 9. Korkeat lämpötilat mahdollistavat suotuisan kinetiikan ja suhteellisen edullisten nikkielektrodien käytön. Sähkön tarve vähenee, ja osa erottamiseen tarvittavasta energiasta saadaan lämmön avulla. Hukkalämpöä voidaan käyttää, ja sähköön perustuva näennäinen hyötysuhde voi olla yli 100 prosenttia. Mahdollisuus on myös palautuvaan toimintaan, joka toimii sekä polttokennona että elektrolyyserinä. Lisäksi hiilidioksidin ja veden rinnakkaiselektrolyysillä voidaan tuottaa synteetikaasua, joka on kemianteollisuuden perusrakenne. (IRENA 2020, s. 33–34)



Kuva 9. Kaupallisesti saatavilla oleva kiinteäoksidielektrolyysi. Mukailten lähteestä (IRENA 2020)

Kuvat 6–9. ovat kaupallisesti saatavilla olevia elektrolyysiteknologioita ja niitä kuvaavat seuraavat yhtälöt:



Yhtälöt (7), (9), (11) ja (13) ovat anodipuolen reaktioita ja yhtälöt (8), (10), (12) ja (14) ovat katodipuolella tapahtuvia reaktioita. Yhtälöt (7) ja (8) kuvaavat alkalielektrolyysissä

olevia reaktioita. Yhtälöt (9) ja (10) liittyvät PEM-elektrolyysissä tapahtuviin reaktioihin. AEM-elektrolyysin reaktiot ovat yhtälöt (11) ja (12). Kiinteäoksidielektrolyysissä tapahtuvia reaktioita kuvaavat yhtälöt (13) ja (14). (IRENA 2020) Taulukossa 1 on esitetty alkali-, PEM-, AEM- ja kiinteäoksidin karakterisointi. Taulukosta käy ilmi, että eri vesielektrolyysityyppien käyttölämpötilat ja käyttöpaineet vaihtelevat ja tarvittavien materiaalien vaihtelut vesielektrolyysityypeittäin.

Taulukko 1. Vesielektrolyysityyppien karakterisointi. (IRENA 2020)

	Alkali	PEM	AEM	Kiinteäoksidi
Käyttölämpötila	70–90 °C	50–80 °C	40–60 °C	700–850 °C
Käyttöpaine	1–30 bar	< 70 bar	< 35 bar	1 bar
Elektrolyytti	KOH-liuos	PFSA-kalvot	DVB-polymeeri tuettuna KOH:lla	YSZ
Erotin	ZrO ₂ stabiloitettu PPS-verkolla	Kiinteä elektrolyytti	Kiinteä elektrolyytti	Kiinteä elektrolyytti
Elektrodi/katalyytti (happipuoli)	Nikkelipinnoitettu rei'itetty ruostumaton teräs	Iridiumoksidi	Suuripintaiset nikkeli- tai NiFeCo-seokset	Perovskiittityyppi (esim. LSCF, LSM)
Elektrodi/katalyytti (vetypuoli)	Nikkelipinnoitettu rei'itetty ruostumaton teräs	Platinan nanohiukkaset hiilimustassa	Suuri pinta-ala nikkeliä	Ni/YSZ
Huokoinen kuljetuskerros (anodi)	Nikkeliverkko (ei aina läsnä)	Platinalla päällystetty sintrattu huokoinen titaani	Nikkeli vaahto	Karkea nikkeliverkko tai vaahto
Huokoinen kuljetuskerros (katodi)	Nikkeliverkko	Sintrattu huokoinen titaani tai hiilikangas	Nikkelivaahto tai hiilikangas	-
Bipolaarilevy (anodi)	Nikkelipäällystetty ruostumaton teräs	Platinalla päällystetty titaani	Nikkelipäällystetty ruostumaton teräs	-
Bipolaarilevy (katodi)	Nikkelipäällystetty ruostumaton teräs	Kultapinnoitettu titaani	Nikkelipäällystetty ruostumaton teräs	Koboltilla päällystetty ruostumaton teräs

yttriastabiloitettu ziroocnia (engl. yttrium-stabilized zirconia, YSZ), divinyylibentseeni (engl. divinylbenzene, DVB), polyfenyleenisulfidi (engl. polyphenylene sulphide, PPS)

4 TALOUDELLISET NÄKÖKOHDAT

Vedyn, erityisesti vähähiilisen vihreän vedyn, tuotantokustannukset ovat ratkaiseva tekijä vetykäyttöisten teknologioiden menestyksen kannalta tulevaisuudessa. Nykyään metaanin höyryreformoinnilla (SMR) tuotetaan suurin osa maailman vuosittaisesta 50 miljoonan tonnin vetytuotannosta. SMR tuottaa kuitenkin merkittäviä hiilidioksidipäästöjä, ja tulevaisuudessa tarvitaan vaihtoehtoisia menetelmiä vähähiilisen vedyn tuottamiseksi. Vähähiilistä sähköä käyttävä elektrolyysi on erittäin tehokas menetelmä erittäin puhtaan vedyn tuottamiseen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää hiilipohjaisia raaka-aineita, kuten maakaasua, hiiltä ja biomassaa, yhdistettynä hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniikoihin (CCU). (Subramani et al. 2015, s. 63)

4.1 Vetytuotannon kustannukset

Vedyn tuotannon tasoitettuja kustannuksia voidaan käyttää vedyn tuotantokustannusten vertailemiseen eri tekniikoiden avulla. Kustannuksissa otetaan huomioon laitoksen alkuinvestointi (vuotuiset pääomakustannukset (engl. annualised capital cost, ACC) laitoksen taloudellisen käyttöiän aikana), kiinteät ja muuttuvat vuotuiset käyttö- ja ylläpitokustannukset (engl. fixed and variable operations and maintenance, FOM and VOM) sekä raaka-ainekustannukset (kuten sähkön ja maakaasun kustannukset, joita kutsutaan nimellä FUEL). Tasoitettut kustannukset voidaan laskea yhtälöllä (15):

$$\text{Tasoitettut kustannukset} = ACC + FOM + (VOM + FUEL) \times FCONSUM, \quad (15)$$

missä FCONSUM edustaa vuotuista polttoaineen kulutusta. (Subramani et al. 2015, s. 63–64)

Käyttö- ja ylläpito (engl. operating and maintenance, O&M) -kustannusten arviointi on hankalaa, sillä näihin laskelmiin sisältyy erilaisia erityismuuttujia. Näihin muuttujiin kuuluvat laitteet, raaka-aineet, seisokkikustannukset, käyttökustannukset, lisenssikustannukset ja työvoimakustannukset. Seisokki- ja lisenssikustannukset ovat kiinteitä vuositasolla. Muuttuvat O&M-kustannukset ovat sen sijaan verrannollisia laitoksen tuotantoon. (Subramani et al. 2015, s. 64–65)

4.1.1 Raaka-aineiden hinta

Useimpien laitosten pääasialliset käyttökustannukset ovat vedyn tuottamiseen käytettävän raaka-aineen kustannukset. Tulevaisuuden raaka-aineiden hinnat ovat hyvin epävarmoja, ja ne voivat johtaa merkittäviin vaihteluihin vedyn tuottamisen tasoitetuissa kokonaiskustannuksissa eri tekniikoiden avulla. Raaka-aineiden hintaennusteet on esitetty taulukossa 2. Sähkön hinnan ennustaminen on erityisen haastavaa, koska se on riippuvainen sähköntuotantovalikoimasta ja sähköjärjestelmän rakenteesta. Ajoittainen uusiutuvien energialähteiden tuotanto ylittää kysynnän, jolloin sähkön hinta voi laskea alle nollan. (Subramani et al. 2015, s. 67)

Verot ja tuet voivat lisäksi vaikuttaa raaka-aineiden hintoihin. Esimerkiksi hiilidioksidivero voisi nostaa fossiilisten polttoaineiden hintaa, ellei hiilidioksidipäästöjä oteta talteen ja varastoida (CCU). (Subramani et al. 2015, s. 67)

Taulukko 2. Raaka-aineiden hintaennusteet (Subramani et al. 2015). Taulukossa olevat luvut ovat esitetty USD/GJ_e sen vuoden keskimääräisiä hintoja.

Raaka-aine	2010	2050
Kaasu	10	12
Sähkö**	14	29

**Sähkökustannukset ovat tällä hetkellä Iso-Britanniassa noin 50 punttaa/MWh, ja tulevaisuuden kustannukset riippuvat tuotantoteknologian valinnasta. Vuodesta 2030 alkaen kustannusten oletetaan olevan 90 punttaa/MWh, mikä on Iso-Britanniaan rakennettaville kahdelle uudelle ydinreaktorille sovittu hinta, ja sitä pidetään tyypillisenä pitkän aikavälin alhaisen hiilidioksidipäästön sähkön hintana. Kaikki kustannukset on muunnettu Yhdysvaltain dollareiksi vuonna 2013, ja ne on ilmaistu GJ:nä sisäistä energiaa (USD/GJ_e).

4.1.2 Eri tuotantolaitosten kustannukset

Subramani et al. (2015) mukaan maakaasun reformointi oli vuonna 2015 tehokkain ja taloudellisin, kun kaasun saatavuus ja hinta olivat alhaisia. Reformointi on laajalti käytetty prosessi vedyn tuottamiseen ja SMR:n pääomakustannukset ovat alhaisimmat tärkeimmistä vedyntuotantotekniikoista. SMR:n hyötysuhde vaihtelee 60–80 % välillä. Tehokkuuden odotetaan kasvavan hieman tulevaisuudessa, ja keskitettyjen ja hajautettujen laitosten hyötysuhteiden välisen eron odotetaan pienenevän. Korkeasta energiatehokkuudesta huolimatta raaka-ainekustannukset ovat jo nyt tärkein taloudellinen tekijä. Lisäksi näiden kustannusten odotetaan nousevan huomattavasti tulevaisuudessa, jos CO₂-päästöjä verotetaan voimakkaasti. CCU:ta käyttävät

tuotantolaitokset voivat vähentää tällaisten verojen vaikutusta. CCU:n rakentaminen on kuitenkin kalliimpaa ja alentaisi laitosten energiatehokkuutta. (Subramani et al. 2015, s. 69)

Elektrolyysi on yleisimmin käytetty menetelmä vedyn tuottamiseksi vettä krakkaamalla, ja sen tärkeänä etuna on, että sillä tuotetaan erittäin puhdasta vetyä ilman hiilidioksidipäästöjä. Menetelmän suurin haittapuoli on kuitenkin sähkön korkea hinta suhteessa muihin raaka-aineisiin. Useimmat kaupallisesti saatavilla olevat elektrolyysit perustuvat alkalielektrolyysiin. Sillä tuotetaan erittäin puhdasta vetyä, mutta sen kustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin SMR:llä. Matalalämpötilaisia PEM-elektrolyysereitä ja korkealämpötilaisia kiinteäoksidin elektrolyysereitä (SOEC) on ehdotettu tehokkaammiksi ja joustavammiksi tulevaisuuden teknologioiksi. PEM-elektrolyysit soveltuvat pienimuotoiseen vedyntuotantoon ja vaihteleviin kuormituksiin, esimerkiksi ajoittaiseen uusiutuvaan sähköntuotantoon, SOEC-elektrolyysit puolestaan voivat vähentää sähköntarvetta käyttämällä korkean lämpötilan lämpöä prosessissa, jota kutsutaan termiseksi krakkaukseksi. (Subramani et al. 2015, s. 71–72)

Subramani et al. (2015) tehdyssä tutkimuksessa esitetään kirjallisuudessa esitetyt (pienen ja keskikokoisten) elektrolyysijärjestelmien pääomainvestointikustannusten huomattavat vaihteluvälit. Vedyn tuotantolaitosten pääomakustannukset tasoitettujen kustannusten vertailua varten on esitetty taulukossa 3. Useat arviot ylittävät jo toiminnassa olevien tuotantolaitosten keskimääräiset kustannukset, jotka vaihtelevat 750 USD/kW:sta 2500 USD/kW:iin. Etupäässä kustannuksia ovat pienet järjestelmät, joiden kustannukset ovat erityisen korkeat. Tulevaisuudessa oletetaan, että kaikki järjestelmät tulevat huomattavasti edullisemmiksi teknisten läpimurtojen ansiosta. (Subramani et al. 2015, s. 72)

1900-luvulla kehitettyjen elektrolyyserien energiatehokkuus oli 58–72 %, ja on kohtuullista olettaa, että uusien elektrolyyserien energiatehokkuus löytyy vaihteluvälin yläpäästä. Tulevaisuudessa odotetaan, että pienissä ja keskisuurissa tuotantolaitoksissa saavutetaan 85–95 % hyötysuhteet. Edellytyksenä tälle on PEM-elektrolyyserien ja SOEC-elektrolyysien kehittämisen onnistuminen. (Subramani et al. 2015, s. 72)

Taulukko 3. Vedyn tuotantolaitosten pääomakustannukset tasoitettujen kustannusten vertailua varten. (Subramani et al. 2015). Kustannusluvut perustuvat Subramani et al. (2015) mukaan tehtyyn tutkimukseen ja taulukossa olevat luvut ovat esitetty USD/kW_e sen vuoden keskimääräisiä hintoja.

	Pääomakustannukset 2010	Pääomakustannukset 2050
Kaasu	409	409
Kaasu + CCU	468	409
Sähkö	1522	696

Vuotuiset pääomakustannukset on laskettu käyttäen 10 % pääomakorkeaa. Oletuksena, että kaikkien laitosten taloudellinen käyttöikä on 30 vuotta. Kaikki kustannukset ovat USD vuonna 2013 ja esitetty asennetun vetytehon kW kohden.

4.1.3 Tuotantolaitosten kustannuksien vertailu

Kiinteät käyttö- ja hallintokustannukset esitetään taulukossa 4. Muuttuvat käyttö- ja hallintokustannukset ovat raaka-aineita lukuun ottamatta tyypillisesti minimaaliset, joten ne on sisällytetty kiinteisiin käyttö- ja hallintokustannuksiin näissä laskelmissa. Taulukossa 4 esitetään myös yhteenveto eri tuotantolaitostyyppien oletetuista muuntohyötysuhteista. Subramani et al. (2015) tehdyssä kaaviossa esitetään tärkeimpien tuotantoteknologioiden arvioidut tasoitetut kustannusennusteet. SMR-menetelmä esitetään erikseen CCU:n kanssa ja ilman CCU:ta siitä huolimatta, että CCU lisää kokonaiskustannuksia vain vähän. Elektrolyysi on kalliimpi kuin SMR-menetelmä, ja on samalla kallein tuotantoteknologia. Elektrolyysillä tuotetaan puhtaampaa vetyä, joka on arvokkaampaa liikennepolttoaineena (puhtaammalla vedyllä ei kuitenkaan ole lisäarvoa teollisuuden raaka-aineena), joten elektrolyysillä tuotetun vedyn arvo voi olla suurempi, joka osittain kompensoisi korkeammat tuotantokustannukset. (Subramani et al. 2015, s. 73–74)

Taulukko 4. Kiinteät käyttö- ja hallintokustannukset ja oletetut muuntotehokkuudet tasoitettujen kustannusten vertailua varten pääomakustannusten funktiona. (Subramani et al. 2015)

	Kiinteät O&M kustannukset	Energiatehokkuus 2010	Energiatehokkuus 2050
Kaasu	4 %	80 %	85 %
Sähkö	5 %	75 %	85 %

Kiinteiden O&M-kustannusten vaihteluvälit lasketaan pääomakustannusten vaihteluvälejä käyttäen.

4.2 Vihreän vedyn elektrolyyserien kustannukset

Veden elektrolyysistä saatavan vedyn tuotantokustannuksiin vaikuttavat monet tekniset ja taloudelliset tekijät. Merkittävimpiä näistä tekijöistä ovat investointitarpeet, muuntotehokkuus, sähkön hinta ja vuotuiset käyttötunnit. (IEA 2019, s. 46)

Nyt alkalielektrolyyserien pääomamenojen (engl. capital expenditure, CAPEX) arvioidaan tällä hetkellä olevan 500–1400 Yhdysvaltain dollaria kW_e kohti, kun taas PEM-elektrolyyserien arvioidaan olevan 1100–1800 USD/kW_e. SOEC-elektrolyyserien arviot vaihtelevat 2800–5600 USD/kW_e. Elektrolyseeripino muodostaa noin 50 % ja 60 % alkalielektrolyseerien ja PEM-elektrolyyserien CAPEX-kustannuksista, vastaavasti. Loput kustannukset koostuvat pääasiassa tehoelektronikasta, kaasun käsittelystä ja laitoksen komponenteista. (IEA 2019, s. 46)

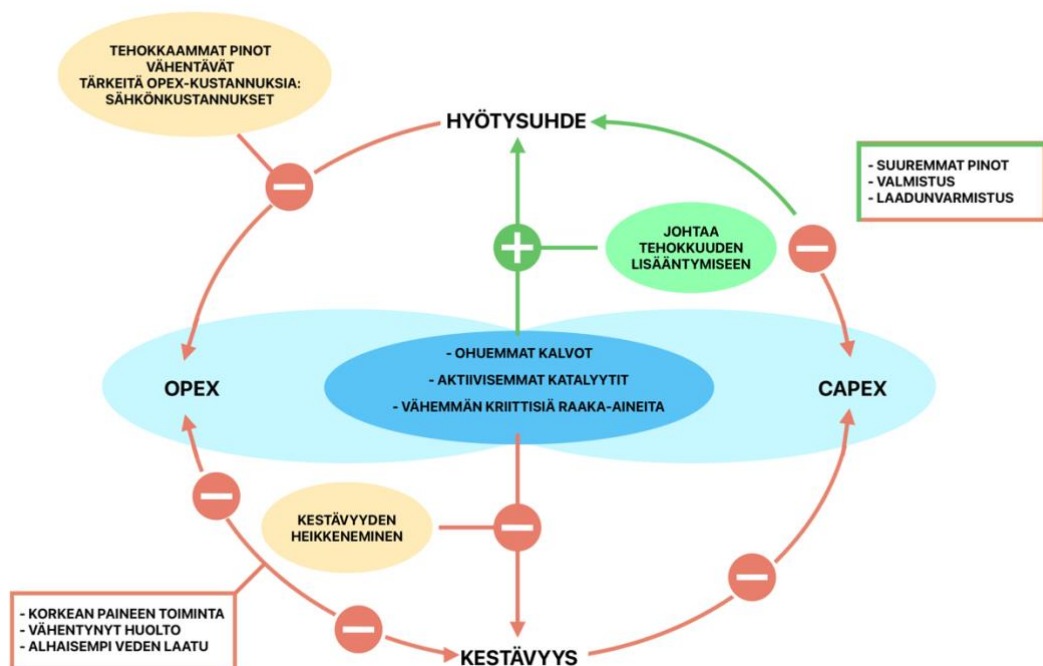
Elektrolyyserien kustannusten tulevaisuuden alenemiseen vaikuttavat kaksi päätekijää: teknologiaan liittyvät innovaatiot ja valmistusprosessien mittakaavaedut. Innovaation kehityksessä pääasiassa elektrodien ja kalvojen edullisempien materiaalien kehittäminen. Mittakaavaetujen osalta kustannusten alenemiseen vaikuttaa myös suurempien elektrolyyserien kehittäminen. IEA (2019) mukaan tehdyssä analyysissä nykyisten alkali- ja PEM-elektrolyyserien CAPEX-kustannuksia voidaan alentaa siirtymällä suurempiin monikerroksisiin järjestelmiin, joissa useita elektrolyseeripinoja yhdistetään, jotta systeemin kokonaiskapasiteettia voidaan lisätä. Lähteessä toisen analyysin mukaan suurennettujen elektrolyyserien ja automatisoitujen tuotantoprosessien käyttöönotto tulee johtamaan CAPEX-kustannusten huomattavaan vähenemiseen. Tämä käy ilmi vedyn tuotannon tulevista tasoitetuista kustannuksista käyttötunneittain eri elektrolyyserin investointikustannuksilla ja sähkökustannuksilla. Analyysin mukaan elektrolyyserien käyttötuntien kasvaessa investointikustannusten vaikutus vetykustannuksiin vähenee, ja sähköstä tulee veden elektrolyysin tärkein kustannusosuus. (IEA 2019, s. 46–47)

4.2.1 Elektrolyyserien suunnittelussa huomioitavat asiat

Tarjontapuolella vihreän vedyn näkymät riippuvat elektrolyyserin suorituskyvystä. Tämän saavuttamiseksi tutkimus- ja kehitysstrategioissa on käsiteltävä neljää eri aluetta:

1. Tehokkuuden kasvattaminen kenno-, pino- ja järjestelmätasolla (vähentää käyttökustannuksia)
2. Virta on suorana yhteydessä kennon ja pinon kapasiteettiin ja siten vedyntuotantoon.
3. Kestävyyden kasvattamisen yli 100 000 tuntiin jonkin kehitetyn järjestelmäkokonaisuuden osalta.
4. Investointikustannusten väheneminen pino- ja järjestelmätasolla.

Huomioitavaa on, että nämä neljä aluetta liittyvät toisiinsa, ja yhden parantaminen johtaa usein toisen alueen heikkenemiseen. Kuvassa 10 on esitetty edellä mainittujen alueiden välisiä vaikutuksia. (IRENA 2020, s. 42)



Kuva 10. Elektrolyyserien tehokkuuden, kestävyyden ja kustannusten väliset vaikutukset. Mukailten lähteestä (IRENA 2020). OPEX = toimintakulut (engl. operating expense, OPEX)

5 ANALYYSI JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Vetyä tuotetaan SMR-tekniikan avulla vakiintuneesti ja laajalti. Veden elektrolyysin suosio kasvaa erityisesti autoteollisuuden markkinoilla, joilla tarvitaan erittäin puhdasta vetyä. Veden elektrolyysin odotetaan olevan merkittävässä asemassa tulevaisuudessa. Kirjallisuudessa on kuitenkin epävarmuutta eri tuotantoteknologioiden tulevista kustannuksista. Tätä lisäävät raaka-aineiden hintoihin perustuvat epävarmuustekijät sekä ympäristölainsäädännön ja verotuksen mahdolliset vaikutukset.

Vedyn tuotanto fossiilisista polttoaineista on taloudellisesti kannattavinta; huomattavien CO₂-päästöverojen asettaminen kuitenkin suosisi merkittävästi CCU:ta käyttäviä tuotantolaitoksia. Elektrolyysi on kehittyneistä tuotantoteknologioista haasteellisin tulevaisuuden kustannusten ennustamisen kannalta. Pääoma- ja raaka-ainekustannukset ovat tällä hetkellä korkeammat kuin muissa tekniikoissa. Elektrolyysin kustannukset voivat kuitenkin alentua muita tuotantoteknologioita enemmän innovaatioiden avulla. Lisäksi sähkön tulevaisuuden hintaan liittyy epävarmuutta. Hintojen odotetaan nousevan, kun fossiilisten polttoaineiden tuotanto korvataan uusiutuvilla energialähteillä, toisaalta, joissakin maissa hinta on laskenut nolnaan, koska uusiutuvien energialähteiden tarjonta on ylittänyt kysynnän. (Subramani et al. 2015, s. 76–77)

Suurin kustannusosa vihreän vedyn tuotannossa on elektrolysaattoriyksikköön tarvittavan uusiutuvan sähkön hinta. Uusiutuvan sähkön hinta on suurin syy vihreän vedyn tuotannon suureen hintaan, riippumatta elektrolyysin kustannuksista. Tämän vuoksi alhaiset sähkökustannukset ovat olennainen vaatimus kilpailukykyisen vihreän vedyn tuottamiselle, ja tämän vuoksi on mahdollisuus tuottaa vetyä eri puolilla maailmaa sellaisissa paikoissa, joissa on optimaaliset uusiutuvat energiavarat (aurinko, tuuli ja vesi), jotta saavutetaan kilpailukyky.

Alhaiset sähkökustannukset ovat välttämätön edellytys kilpailukykyiselle vihreän vedyn tuotannolle, se ei kuitenkaan yksinään riitä. Lisäksi veden elektrolyysin tuotantolaitosten kustannuksia on alennettava. Elektrolyyserien suunnittelu ja rakentaminen on muuttunut merkittävästi viime vuosina. Näillä muutoksilla on ollut huomattava vaikutus elektrolyyserien tuotantokustannuksiin. Esimerkiksi tuotantolaitoksen koon kasvattaminen 1 MW:sta 20 MW:iin voi alentaa kustannuksia yli kolmanneksella. (IRENA 2020, s. 8)

Vihreän vedyn kilpailukyvyyn kehittyminen tulevaisuudessa riippuu monista osatekijöistä. Ensisijaiset kohteet, jotka auttavat kilpailukyvyyn saavuttamiseen vihreän vedyn tuotannossa ovat innovaatioiden onnistuminen sekä päästöttömän sähkön hinta ja saatavuus. Tuotantolaitoksen sijainti tulee myös valita tarkkaan, eli sieltä missä on optimaalisimmat uusiutuvat voimavarat, jolloin maksimoitaisiin sähkön päästöttömyys. Huomioitavaa paikan valinnassa on myös vedyn logistiikka ja siirto maantieteellisesti, jolloin mahdollistetaan tuotetun vedyn jatkokäyttö. Näiden lisäksi elektrolyyserien kehittäminen on erittäin tärkeää, koska nyt niiden kustannukset ovat todella arvokkaita. Alkali- ja PEM-elektrolyyserien pinojen toimintatuntien odotetaan nousevan. Pitkän aikavälin kehityksessä alkalielektrolyyseri pinojen toimintatunnit nousisivat nykyisestä puolitoistakertaiseksi ja PEM-elektrolyyseri pinojen toimintatunnit nousisivat puolestaan jopa nelinkertaisiksi. Toimintatuntien kasvu on suoraan verrannollinen CAPEX-kustannusten alenemiseen. Elektrolyyserien kehittämisessä pitää kuitenkin muistaa, että yhden osa-alueen kehittäminen voi vaikuttaa negatiivisesti toiseen osa-alueeseen kuten kuvassa 10 esitettiin. Tällöin muitakin osa-alueita on kehitettävä. Vihreän vedyn kilpailukykyyn tarvitaan innovaatioiden onnistuminen, päästötöntä sähköä, tuotantolaitoksen sijainti optimaaliselle alueelle ja elektrolyyserien osa-alueiden paras mahdollinen kehitys, jotta kilpailukyky voidaan saavuttaa.

6 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin vihreän vedyn ja vedyn tuotantoteknologioita, niiden taloudellisia näkökohtia, sekä käsiteltiin taloudellisten arvioiden haasteita tulevaisuudessa. Työssä tarkasteltiin pääasiassa höyryreformoinnin ja veden elektrolyysin tuotantomenetelmiä. Työn tavoitteena oli perehtyä höyryreformoinnin ja vihreän vedyn tuotantoteknologioihin sekä tarkastella ja vertailla niiden taloudellisia näkökohtia nyt ja tulevaisuudessa.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella veden elektrolyysin suosio tulee kasvamaan tulevaisuudessa, vaikka tällä hetkellä se onkin kallein tuotantoteknologia. Edellytyksenä on, että tehdään tekniset läpimurrot ja teknologiaan liittyvät innovaatiot sekä valmistusprosessien mittakaavaedut onnistuvat. Kun elektrolyyserien käyttötunnit kasvavat, investointikustannusten vaikutus vetykustannuksiin vähenee, ja sähköstä tulee veden elektrolyysin tärkein kustannusosuus. Sähkön hinnan arviointiin tulevaisuudessa horjuu, koska sähkön hinnan odotetaan nousevan uusiutuvien energialähteiden korvatta fossiiliset polttoaineet, kuitenkin sähkön hinta voi laskea nollaan, kun tarjonta ylittää kysynnän.

LÄHDELUETTELO

Bessarabov, D., Millet, P., 2018. PEM Water Electrolysis. Volume 1. In: Hydrogen and Fuel Cells Primer Series. eds. Pollet B.G., Lontoo: Academic Press, 164 s. ISBN 978-0-12-811145-1

IEA, 2019. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities [verkkodokumentti]
Saatavissa: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf [viitattu 17.04.2024] 199 s.

IRENA, 2020. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 103 s. ISBN 978-92-9260-295-6

Oliveira, A.M., Beswick, R.R., Yan, Y., 2021. Current Opinion in Chemical Engineering: A green hydrogen economy for a renewable energy society. Newark: Elsevier [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339821000332?via%3Dihub> [viitattu 17.04.2024]

Rostrup-Nielsen, J., Christiansen L.J., 2011. Concepts In Syngas Manufacture. Volume 10. Lontoo: Imperial College Press, 390 s. ISBN 978-1-84816-567-0

Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., Patronen, J., 2022. Vetytalous - mahdollisuudet ja rajoitteet [verkkodokumentti] Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 17.04.2024]. 232 s.

Subramani, V., Basile, A., Veziroğlu, T.N., 2015. Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Production and Purification. Volume 1. Bostom: Elsevier, 551 s. ISBN 1-78242-383-4

Vartiainen, E., 2020. Vetytalous tulee-ennemmin tai myöhemmin [verkkodokumentti]
Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin> [viitattu 17.04.2024]