



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ville-Veikko Rajala

ELEKTROLYYSITEKNIKOIDEN HYÖTYSUH- TEET VIHREÄN VEDYN TUOTANNOSSA

Tekniikka
2022

ABSTRACT

Author	Ville-Veikko Rajala
Title	Efficiencies of electrolysis techniques in the production of green hydrogen.
Year	2022
Language	Finnish
Pages	34 + 1 Appendices
Name of Supervisor	Ossi Koskinen

Green hydrogen is one of the key solutions to replace fossil raw materials. It is produced from renewable energy sources such as wind and solar power. Green hydrogen enables zero-emission production and solves the challenges of storage. Hydrogen can be used, for instance, as a fuel and for energy storage. The green hydrogen plant can be placed close to a wind power or solar power park, and it enables an environmentally friendly storage for wind power and the use of the power during consumption peaks.

The aim of the study is to provide a good overview of scientific articles on the benefits of green hydrogen electrolysis techniques. The articles I analyzed were different modeling or simulations.

In my study, I found that green hydrogen and its electrolysis techniques have been extensively studied. I also noted that the efficiencies of electrolysis techniques consist of many different variables.

Keywords	Green hydrogen, Electrolysis, Efficiency
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	TEORIA	8
	2.1 Energiasiirtymän haasteet	8
	2.2 Vety ja vetytalous.....	9
	2.2.1 Vety yleisesti	10
	2.2.2 Vedyn ominaisuudet	10
	2.2.3 Vetytalous	11
	2.2.4 Vihreä vety	13
	2.2.5 Harmaa vety	14
	2.2.6 Sininen vety	15
	2.2.7 Turkoosi vety	16
	2.3 Elektrolyysitekniikat vihreän vedyn tuotannossa	17
	2.4 Elektrolyysi	17
	2.5 Veden alkalielektrolyysi	18
	2.6 Protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM-elektrolyysi)	20
	2.7 Kiinteäoksidi elektrolyysikenna (SOEC)	22
3	OPINNÄYTETYÖN TOTEUTUS.....	24
	3.1 Kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä	24
	3.2 Kirjallisuuskatsauksen hyödyntäminen energiatehokkuuden tutkimisessa 24	
	3.3 Aiempiin tutkimuksiin perustuva analyysi	25
4	TULOKSET	28
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	31
	LÄHTEET	32
	LIITTEET	34

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Höyryreformointi-diagrammi.....	14
Kuvio 2. CCS-diagrammi.....	15
Kuvio 3. Metaanipyrolyysi-diagrammi.....	16
Kuvio 4. Alkalielektrolyysikenno.....	19
Kuvio 5. PEM-elektrolyysikenno.....	21
Kuvio 6. SOEC-elektrolyysikenno.....	23
Taulukko 1. Vedyn ominaisuudet.....	11
Taulukko 2. Vedyn värikoodit.....	12

LIITELUETTELO

LIITE 1. Artikkelitaulukko

1 JOHDANTO

Fossiilisille raaka-aineille pyritään löytämään jatkuvasti ekologisia korvaajia. Yksi laajasti teollisuudessa hyödynnetty raaka-aine on vety. Fortumin mukaan selvästi merkittävin osa vedystä tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, joten sen vaikutus maapallon vuosittaisiin hiilidioksidipäästöihin on noin kaksi prosenttia.¹ Vihreä vety on sen sijaan päästötön vedyn muoto, joka on muita vedyn muotoja ekologisempi.

Tässä tutkimuksessa vihreää vetyä tutkitaan sen valmistusmuodon eli elektrolyysitekniikoiden näkökulmasta. Hyödynnän tutkimuksessa menetelmänä kirjallisuuskatsausta, jonka avulla voidaan esimerkiksi arvioida aiempaa teoriaa ja muodostaa kokonaiskuva tutkittavasta aiheesta.²

Vihreää vetyä ja sen valmistamistapaa on tutkittu aiemmin laajastikin, mikä tarjoaa hyvän ja luotettavan pohjan tälle tutkimukselle. Aihe on tällä hetkellä erityisen ajankohtainen, sillä energian hinta on noussut merkittävästi globaalin koronaviruspandemian sekä Ukrainan kriisin myötä. Lisäksi esimerkiksi Siemensin julkaisemassa tuoreessa Kauppalehden artikkelissa on pohdittu Suomen mahdollisuuksia vetytalouden suunnannäyttäjänä ja vihreän vedyn kehittäjänä. Artikkelissa mainitaan esimerkiksi kansallinen energia- ja ilmastostrategia sekä Suomen hiilineutraaliustavoite vuoteen 2035 mennessä.³

¹ Fortum

² Baumeister, A.

³ Siemens

2 TEORIA

2.1 Energiasiirtymän haasteet

Globaalin energian kysynnän kasvu ja fossiilisiin energiaan liittyvät kasvavat ongelmat vaativat etsimään uusia energialähteitä korvaamaan perinteiset fossiiliset polttoaineet.⁴ Uusiutuvat energialähteet pelaavat tärkeää roolia tulevaisuudessa. Energialähteet ovat jaoteltu kolmeen eri kategoriaan: fossiiliset polttoaineet, uusiutuvat energialähteet ja ydinvoimavarat. Uusiutuviksi energialähteiksi kutsutaan sellaisia energialähteitä, joita voidaan käyttää yhä uudelleen. Esimerkiksi aurinkoenergia, tuulienergia, bioenergia ja maalämpö kuuluvat uusiutuviin energialähteisiin. Uusiutuvien energialähteiden teknologiat antavat erinomaisen mahdollisuuden alentaa kasvihuonepäästöjä ja globaalia ilmaston lämpenemistä korvaamalla perinteiset energialähteet.⁵

Energiasiirtymässä vedyllä on keskeinen rooli, koska se mahdollistaa fossiilisten polttoaineiden ja raaka-aineiden korvaamisen kestäväillä ja synteettisillä vaihtoehdoilla, jotka on tuotettu puhtaasta sähköstä. Vastaavasti tämä auttaa alentamaan hiilidioksidipäästöjä liikenteestä ja teollisuudesta. Vety mahdollistaa hiilen korvaamisen korkeapäästöisissä teollisuuden prosesseissa, kuten esimerkiksi teräksenvalmistuksessa.⁶ Vety on toissijainen energiakantaja sekä myös energiavektori, jota voidaan käyttää energian varastointiin ja vapauttamiseen.⁷ Nopeasti lisääntyvä uusiutuvan energian tuotanto lisää epävarmuutta energiajärjestelmälle sen

⁴ Chen, F.

⁵ Panwar, N. L.

⁶ H2 cluster Finland

⁷ Ajanovic, A.

luonnollisen epävarmuuden ja vaihtelun vuoksi. Vedyn varastointi tarjoaa ratkaisun joustavuuden ja luotettavuuden lisäämiseen.⁸

Ainoastaan vihreällä vedyllä, jonka tuottamiseen käytetty sähkö on tuotettu tuuli-, aurinko- ja vesivoimalla, on aidosti vähäiset päästöt. Kaikilla muilla tavoilla tuotettu vety – kuten esimerkiksi sininen vety, joka käyttää sähköverkkoa, on huomattavasti suuremmat päästöt ja ovat lähempänä harmaan vedyn päästölukemia. Yhdessä vuodessa kaikkiaan noin 900 megatonnia hiilidioksidia vapautuu ilmakehään vedyn tuotannosta maailmanlaajuisesti. Kiinnostus vähähiiliseen vedyntuotantoon onkin noussut ympäristöongelmien takia.⁹ Gongin mukaan viime vuosina kiihtyvä kehitystyö vihreän energian teknologioiden parissa on laskenut uusiutuvan energian hintaa, ja tämä on mahdollistanut ison mittakaavan vedyn tuotannon veden elektrolyysitekniikalla. Lisäksi hänen mukaansa elektrolyysiprosessi uusiutuvan sähkön käytössä ei käytä fossiilista energiaa tai aiheuta kasvihuonekaasuja ja näin se täyttää ”hiilivapaan” järjestelmän edellytykset¹⁰.

2.2 Vety ja vetytalous

Tässä luvussa käsitellään vetyä eri näkökulmista. Luvussa 2.2.1 kerron yleisesti, mitä vety on ja sen jälkeen luvussa 2.2.2 kerron vedyn ominaisuuksista. Luvussa 2.2.3 käsittelen vetytaloutta. Luvuissa 2.2.4–2.2.7 esittelen neljä eri vedyn värikoodia, jotka ovat tämän tutkimuksen keskiössä oleva vihreä vety sekä muina värikoodeina harmaa, sininen ja turkoosi vety.

⁸ Wu, D.

⁹ Ajanovic, A.

¹⁰ Gong, J.

2.2.1 Vety yleisesti

Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Se on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen alkuaine ja sekä alkalimetallien ryhmään kuuluva epämetalli. Maailmankaikkeudessa vetyä esiintyy 73 % massasta, ja se on auringon ja muidenkin tähtien ydinfuusioprosessin polttoaine. Maapallolla vety on kymmenenneksi yleisin alkuaine ja se kattaa noin 0,12 % maapallon massasta. Yleensä kaikki vety on sitoutunut erilaisiin kemiallisiin yhdisteisiin, mutta puhdasta vetyä voi luonnossa esiintyä pieniä määriä.¹¹

Vety on monipuolinen alkuaine, joten sille on monia käyttökohteita. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineena, raaka-aineena, energiakantajana ja väliaineena energian varastoinnissa. Vetyä voidaan tuottaa fossiilisilla polttoaineilla ja uusiutuvilla energialähteillä.¹² Braißen ja De la Ruan mukaan 48 % valmistetusta vedystä on maakaasua, 30 % raskasta öljyä ja teollisuusbenssiiniä sekä 18 % on kivihiiltä. Yleisesti vetyä on käytetty pääasiassa kemianteollisuudessa ammoniakkin ja metanolin tuotannossa ja öljynjalostuksessa.¹³

2.2.2 Vedyn ominaisuudet

Vety on hajuton ja väritön kaasu ja 2,016 g/mol moolimassallaan se on kevyin alkuaine. Vety on nestemäisessä muodossa lämpötilassa -252,8 °C (ilmakehän paineessa). Tavallisen vetyatomien isotooppi eli protium koostuu yhdestä protonista ja yhdestä elektronista. Myös muita erilaisia isotooppeja esiintyy luonnossa, mutta ne ovat harvinaisempia. Näitä ovat deuterium ja tritium.

¹¹ Jumppanen, P.

¹² Fortum, Vetytalous tulee.

¹³ Braißen, K.

Vedyllä on kaikista polttoaineista suurin energiapitoisuus painoon nähden ja sen kalorimetrinen lämpöarvo on 141,9 MJ/kg eli lähes kolme kertaa suurempi kuin bensiinillä. Vedyllä on kuitenkin pieni tiheys, joten vedyn lämpöarvo jää tilavuusyksikköä kohden vain noin kolmasosaan bensiinin vastaavasta.¹⁴ Kuviossa 1 on lisättuna vedyn ominaisuuksia.

Properties of Hydrogen (at Normal Temperature and Pressure)		
Molecular weight		2.016
Density	kg/m ³	0.0838
Higher heating value	MJ/kg	141.90
	MJ/m ³	11.89
Lower heating value	MJ/kg	119.90
	MJ/m ³	10.05
Boiling temperature	K	20.3
Density as liquid	kg/m ³	70.8
Critical point		
Temperature	K	32.94
Pressure	Bar	12.84
Density	kg/m ³	31.40
Self-ignition temperature	K	858
Ignition limits in air	vol. %	4–75
Stoichiometric mixture in air	vol. %	29.53
Flame temperature in air	K	2318
Diffusion coefficient	cm ² /s	0.61
Specific heat (c _p)	kJ/(kg K)	14.89

Taulukko 1. Vedyn ominaisuudet.¹⁵

2.2.3 Vetytalous

Vetytaloudella tarkoitetaan talousjärjestelmää, missä siirrytään fossiilisista energialähteistä tai raaka-aineista vedyn tuotantoon, jossa käytetään puhtaita tai vähähiilisiä energialähteitä. Vähähiiliseksi kutsuttu vety tarkoittaa, että se on valmis-

¹⁴ Goswami, D.

¹⁵ Gandia, L.

tettu prosessilla, joka alittaa tietyt CO₂-päästöjen raja-arvot. Vähähiilistä vedyntuotantoa voidaan myös kutsua siniseksi vedyn tuotannoksi, jossa syntyvät päästöt otetaan talteen ja varastoidaan.¹⁶

Vetyä voidaan siis tuottaa monella eri energialähteellä ja riippuen tuotantovasta, kustannuksista ja vapautuneista päästöistä, jotka voivat olla todella erilaisia. Tämän takia vedyn tuottamisteknologiat ovat yleensä luokiteltu erilaisiin väriin. Värejä ovat muun muassa harmaa, sininen, turkoosi ja vihreä vety. Kuviossa 2 esitellään värikoodit ja eri tuotantoteknologiat.¹⁷

Väri	"Harmaa"	"Sininen"	"Turkoosi"	"Vihreä"
Ensisijainen raaka-aine	Maakaasu	Maakaasu	Maakaasu	Vesi
Tuotanto teknologia	Höyrymetaanireformointi (SMR)	CO ₂ talteenotto- ja varastointimenetelmä	Metaanipyrolyysi	Elektrolyysi
Teknologian valmiusaste	Kaupallinen (TRL 9)	Teollinen (TRL 8-9)	Tutkimus & kehitystyö (TRL 3-4)	Kaupallinen (TRL 9)
Prosessiin liittyvät CO ₂ -päästöt	Korkea CO ₂	Matala CO ₂	CO ₂ vapaa	Hiilivapaa

Taulukko 2. Vedyn värikoodit.¹⁸

Vety on esillä kansainvälisessä ilmasto- ja energiapolitiikassa, ja Euroopan Uniolla on erilaisia tukiohjelmaa vetyyn liittyen. Green Deal on vihreän kehityksen ohjelma, joka toimii kansainvälisenä edistäjänä vetytalouden saralla. Green Deal on Pariisin ilmastonsopimuksen ja Euroopan unionin käynnistämä ohjelma vuonna

¹⁶ Sivill, L.

¹⁷ Hermesmann, M.

¹⁸ Hermesmann, M.

2019. Ohjelman tavoite on saavuttaa hiilineutraalisuustavoite vuoteen 2050 mennessä.¹⁹

2.2.4 Vihreä vety

Vihreästä vedystä on tulossa keskeinen osa kestäväen tulevaisuuden varmistamisesta. Vihreä vety on tuotettu käyttämällä uusiutuvaa energiaa. Yleisimmin saatavilla oleva vaihtoehto on vihreän vedyn tuottamiseen uusiutuvalla sähköllä toimiva vesielektrolyysi.²⁰ Esimerkiksi aurinko-, tuuli- tai vesivoimalla tuotettua vetyä kutsutaan vihreäksi vedyksi, ja se tuotetaan ilman CO₂-päästöjä. Sähkön lisäksi lopputuotteena on vettä ja happea.²¹

Vihreää vetyä tuotetaan yleisesti kolmella eri tekniikalla, jotka ovat veden alkali-elektrolyysi, protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM-elektrolyysi) ja kiinteäoksidi elektrolyysikemno (SOEC). Relevantein ja kaupallisesti käytetyin on veden alkali-elektrolyysitekniikka.²² Veden PEM-elektrolyysin suhteen on tehty merkittävää edistystä viime vuosina. Tekniikalla on suuri potentiaali tulevaisuudessa kehittyä eteenpäin, ja sille on asetettu merkittäviä tavoitteita vetytalouden piirissä ja odotetaan, että tuotanto kasvaisi tulevaisuudessa. Kiinteäoksidi elektrolyysikemno on tehokkaampi verrattuna PEM-elektrolyysiin, mutta se on kohdannut haasteita etenkin materiaalitekniikan puolella.²³ Sen tuotannon kustannukset ovat noin €2,5/kg - €8/kg.²⁴

¹⁹ Sivill, L.

²⁰ Acciano

²¹ Fortum

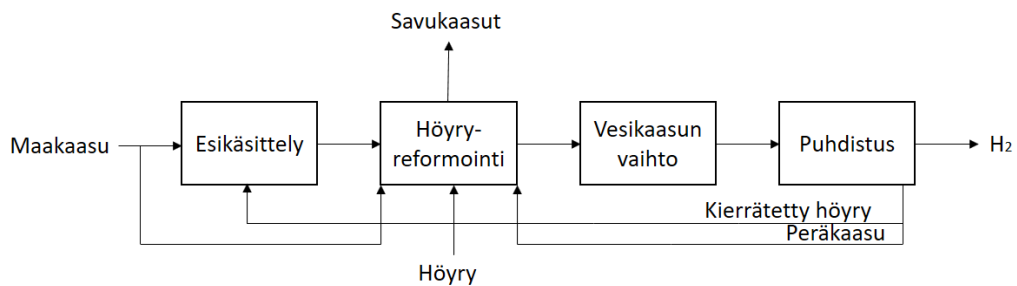
²² Hermesmann, M.

²³ Gandia, L.

²⁴ Sulasalmi, P.

2.2.5 Harmaa vety

Harmaa vety on tuotettu fossiilisista raaka-aineista, kuten maakaasusta. Yleisesti harmaata vetyä tehdään höyryreformoinnilla. Höyryreformointi eli SMR on nykyään yleisesti käytetyin menetelmä vedyn tuottamiseen. Höyryreformointi perustuu fossiilisiin raaka-aineisiin, ja prosessin yhteydessä vapautuu runsaasti CO₂-päästöjä. Nykyisen vuosittaisten päästöjen ollessa noin 530 Mt/a harmaa vety vaikuttaa merkittävästi ilmastonmuutokseen.²⁵ Harmaa vety on edullista ja sitä käytetään yleensä kemianteollisuudessa öljyn ja lannoitteiden valmistukseen.²⁶ Kuviossa 3 on esitelty prosessin eri vaiheet.



Kuvio 1. Höyryreformointi-diagrammi.²⁷

Harmaa vety, joka on tuotettu höyryreformointilla maksaa noin €1,5/kgH₂. Höyryreformointi tuottaa päästöjä 10–13 kgCO₂/kgH₂²⁸.

²⁵ Hermesmann, M.

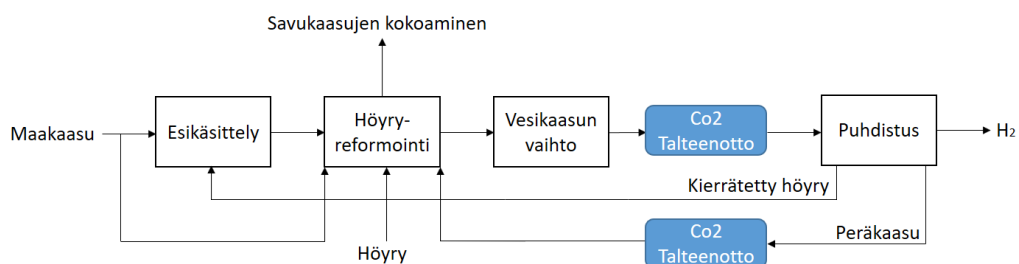
²⁶ What is the difference

²⁷ Dincer, I.

²⁸ Sulasalmi, P.

2.2.6 Sininen vety

Hermesmannin ja Müllerin mukaan sininen vety tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla käyttämällä hiilidioksidin talteenotto- ja varastointimenetelmää eli CCS:ää. Lähestymistapa perustuu samaan tuotantoprosessiin kuin harmaassa vedyssä, mutta sen sijasta, että vapauttettaisiin päästöt ilmakehään, suurin osa syntyvästä hiilidioksidista eristetään ja säilytetään geologisissa kohteissa. Lupaavalta vaikuttava tekniikka voisi alentaa vedyntuotannossa syntyviä CO₂-päästöjä ja olla vaihtoehto matalimpiin kasvihuonepäästöihin. Kuviossa 4 on esitelty prosessin avainvaiheet.²⁹



Kuvio 2. CCS-diagrammi.³⁰

CCS:ssä hiilidioksidin talteenottotehokkuus on noin 53–95 % välillä. Talteenoton tehokkuutta voidaan lisätä, mutta se nostaa myös taloudellisia kuluja. SMR-laitok-

²⁹ Hermesmann, M.

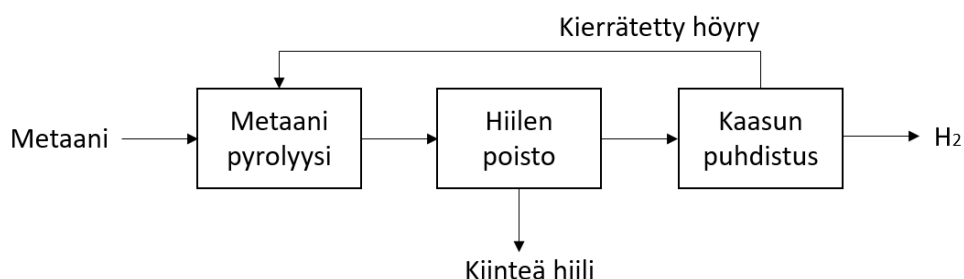
³⁰ Dincer, I.

sen tehokkuus tippuu 5–14 %, kun hiilidioksidin talteenotto- ja varastointimene-
telmä otetaan käyttöön.³¹ Tuotannon kustannus on noin €2/kg ja päästöt ovat
noin 5–15 % harmaan vedyn tuotannossa³².

2.2.7 Turkoosi vety

Turkoosi vety tuotetaan metaanipyrolyysillä, joka pilkkoo metaanin ja yhdistää
maakaasun käytön raaka-aineena ilman hiilidioksidin tuotantoa. Metaaniparalyy-
sissä sivutuotteena syntyy niin sanottua hiilimustaa. Tällä sivutuotteella on useita
loppulähteitä teollisuuden parissa, kuten autonrenkaat, pinnoitteet ja se on yksi
muovien ja akkujen tuotannossa käytettävä kriittinen raaka-aine.³³

Kuviossa 5 esitellään metaanipyrolyysin prosessivaiheet: (1) metaanin pilkkomi-
nen kaasumaiseksi vedyksi ja kiinteäksi hiileksi, (2) kiinteän hiilen poistaminen kaa-
suvirrasta, suodattimen läpi tai syklonijärjestelmällä ja (3) kaasuvirran puhdistami-
nen pääasiassa PSA:n tai kalvon avulla.³⁴



Kuvio 3. Metaanipyrolyysi-diagrammi.³⁵

³¹ Hermesmann, M.

³² Sulasalmi, P.

³³ Spectra.

³⁴ Hermesmann, M.

³⁵ Dincer, I.

2.3 Elektrolyysitekniikat vihreän vedyn tuotannossa

Vihreän vedyn tuotannossa käytetään yleisesti kolmea erilaista tekniikkaa veden elektrolyysiin: veden alkalielektrolyysi, protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM-elektrolyysi) sekä kiinteäoksidi elektrolyysikemno (SOEC). Veden alkalielektrolyysi on vanhin ja yleisesti eniten käytetyin teknologiamuoto. Se on ollut käytössä jo 1920-luvulla ja sen markkinaosuus on noin 70 %. Tämän teknologian etuna on matalat kustannukset ja pitkä käyttöikä. Alkalielektrolyysissä haittapuolena on alhaiset virrantiheydet ja syövyttävät olosuhteet tuotannossa.

Protoninvaihtomembraanielektrolyysiä (PEM) ollaan taas käytetty 1960-luvulta lähtien. Se sopii paremmin urbaaneille alueille, koska sen tuotantosysteemi on kooltaan pienempi. Se on myös paljon tehokkaampi, ja tulevaisuudessa tekniikan oletetaan yleistävän. Vastaavasti PEM-tekniikalla on korkeammat kustannukset ja markkinat ovat vielä pienet.

Kiinteäoksidi elektrolyysikemnoon (SOEC) liittyy suuria odotuksia sen alhaisten kustannuksien ja korkean hyötysuhteen vuoksi. SOEC on verraten uusi tekniikka muihin verrattuna ja se on tullut markkinoille vasta hiljattain.³⁶

2.4 Elektrolyysi

Elektrolyysi kuuluu sähkökemian osa-alueeseen, jossa tutkitaan hapetus-pelkistysreaktioita. Nämä reaktiot tapahtuvat joko spontaanisti tai pakotetusti. Sähkökemiallinen reaktio on pakotettu tapahtumaan elektrolyysissä sähkövirran avulla. Elektrolyysikemnon sisällä käytetään elektrolyyttiliuosta. Elektrolyyttiliuos voi koostua emäksistä, vahvoista hapoista, suolasulatteesta, suolavesiliuoksesta sekä

³⁶ Ajanovic, A.

muista ioneina liukenevista aineista. Sähkö kulkeutuu katodien ja anodien avustuksella elektrolyysiliuoksessa.

Anodiksi kutsutaan plusmerkkistä napaa elektrolyysikennossa ja taas negatiivista napaa kutsutaan katodiksi. Elektrolyysikennon anodipuolella tapahtuu hapettuminen, ja katodipuolella negatiiviset ionit kulkeutuvat anodille. Samalla negatiiviset ionit luovuttavat ylimääräiset elektroninsa sekä samalla hapettuvat itse. Positiivisesti varautuneet ionit menevät katodille. Samalla positiiviset ionit ottavat vastaan elektroneja ja pelkistyvät.

Vedenelektrolyysi on veden (H_2O) sähkökemiallista pilkkomista vedyksi (H_2) ja hapeksi (O_2).³⁷



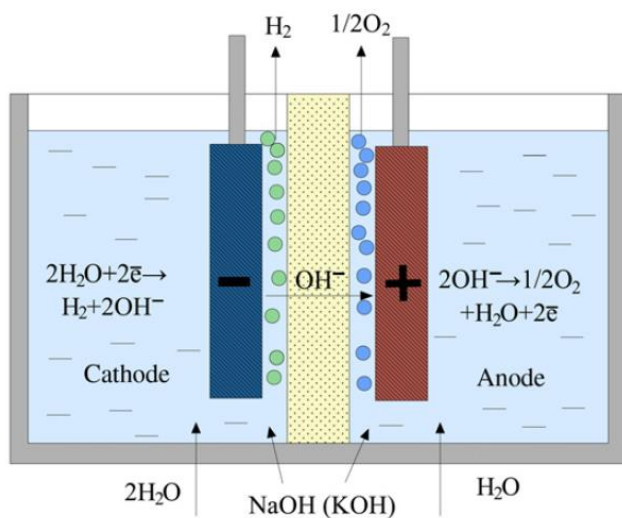
2.5 Veden alkalielektrolyysi

Veden alkalielektrolyysi on yleisin ja tavanomaisin elektrolyysitekniikka vihreän vedyn tuotannossa ja se on laajasti käytetty. Metallielektrodit upotetaan emäksiseen liuokseen, jotka ovat yleensä kaliumhydroksidi (KOH) tai natriumhydroksidi (NaOH). Emäksisen liuoksen pitoisuus on yleensä alkalielektrolyysissä 20 %-30 %.³⁸ Metallielektrodien materiaalina käytetään usein Raney-nikkeliä ja Ni-Mo-seosta veden hajottamiseen. Kuviossa 6 nähdään kalvo, joka on sijoitettu erottamaan elektrodit toisistaan. Kalvon tarkoitus on estää vedyn ja hapen muuntautumista

³⁷ Gandia, L.

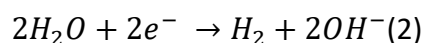
³⁸ Jinyu, L.

spontaanisti takaisin vedeksi. Kalvo on yleensä huokoista ja elektrolyytillä kyllästettyä materiaalia. Käyttövirtatiheydet määritetään, että ne ovat yleensä korkeintaan muutama 100 mA/cm^2 .³⁹

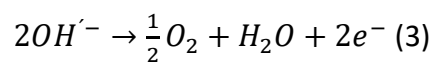


Kuvio 4. Alkalielektrolyysikemno⁴⁰

Reaktiossa syntyy vetykaasua, kun vettä pelkistetään katodilla.



Anodilla tapahtuu seuraava reaktio puolestaan samaan aikaan, kun muodostuu happea.



³⁹ Gandia, L.

⁴⁰ Gandia, L.

Alkalielektrolyysissä varmistetaan reaktion jatkuvuus veden kierrättämisellä kennossa, koska on tärkeää, että elektrolyyttien pitoisuudet pysyvät optimaalisina.⁴¹

2.6 Protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM-elektrolyysi)

Protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM) on yksi suosituimmista tekniikoista muuntaa uusiutuva energia korkealaatuiseen ja puhtaaseen vetyyn. PEM:illä on paljon hyviä ominaisuuksia, kuten kompakti järjestelmän koko, korkea virrantiheys ja korkea hyötysuhde. Järjestelmä voi myös toimia matalissa lämpötiloissa (20–80 °C), ja se tuottaa sivutuotteena happea. Yleisesti PEM-voimala on yksinkertainen ja on siten myös paljon houkuttelevampi vaihtoehto teollisuuden käyttöön⁴².

PEM-elektrolyysitekniikka perustuu siihen, ettei nestemäistä elektrolyyttiliuosta ei ole, vaan elektrolyyttinä toimii vetyprotoneja johtava kiinteä kalvo, joka erottaa anodin ja katodin toisistaan⁴³. Kiinteä ohut kalvo on kaasutiivis. Materiaali kalvossa on yleisesti Nafion, jonka paksuus on alle 0,2 mm. Anodi, katodi ja kalvo muodostavat elektrodikokoonpanon (MEA).⁴⁴ Kalvon elektrodikokoonpano muodostuu siten, että kaksi elektrodia puristetaan protonia johtavaa polymeerielektrolyyttiä vasten. Kennossa kalvo on vesiliuoksen peitossa ja kalvon sisäpuolella on protoneja, jotka liikkuvat. Happamuuden arvo on korkea elektrolyytissä. Perfluorisilfonihappo (PFSA) on fluorattu orgaaninen yhdiste, jota käytetään elektrolyytinä. PFSA:n takia käytetään reaktiossa esimerkiksi platinaa, koska se kestää happamuutta⁴⁵. Kuviossa 7 esitellään PEM-elektrolyysikkenno.

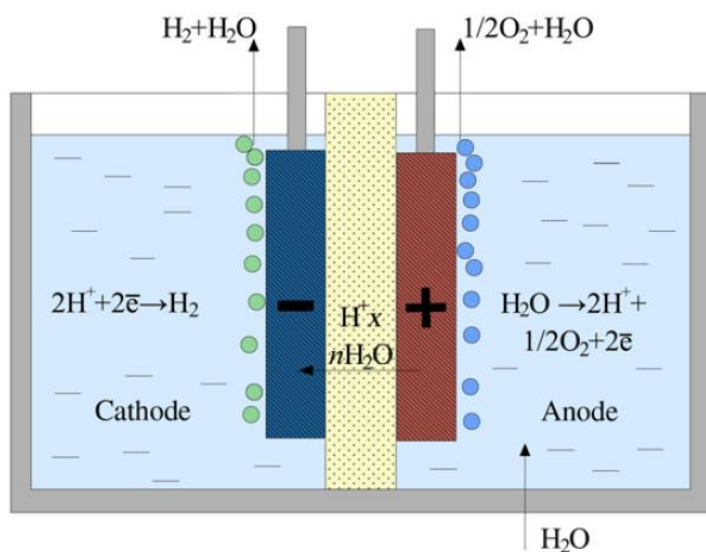
⁴¹ Gandia, L.

⁴² Kumar, S.

⁴³ Gandia, L.

⁴⁴ Bhandari, R.

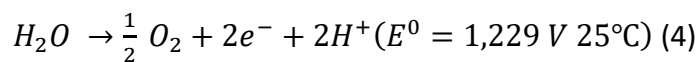
⁴⁵ Gandia, L.



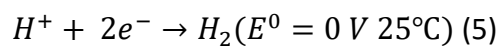
Kuvio 5. PEM-elektrolyysikemno⁴⁶

Seuraavat reaktiot tapahtuvat PEM-elektrolyysissä.

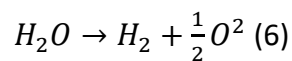
Anodipuolella tapahtuu reaktio, jossa muodostuu happea.



Katodissa muodostuu vetyä, kun PEM-kalvon läpi kulkeutuu vetyionit.



Kokonaisreaktio PEM-elektrolyysissä.⁴⁷



⁴⁶ Gandia, L.

⁴⁷ Gandia, L.

Vedyn puhtaus on yleensä noin 99,99 % ilman, että apupuhdistuslaitteita tarvitaan⁴⁸.

2.7 Kiinteäoksidi elektrolyysikemmo (SOEC)

Kiinteäoksidi elektrolyysikemmo (SOEC, solid oxide electrolysis cell) on puhdas ja hyvin tehokas teknologian muoto, joka muuntaa sähköenergian kemialliseksi energiaksi. SOEC tekniikka on lupaava teknologian muoto vedyn valmistuksessa. Tekniikka ei ole yhtä laajalla käytössä, kuin esimerkiksi protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM) tai veden alkalielektrolyysi (AWE), mutta SOEC:illa on korkeampi energian muunnostehokkuus ja se on osoittanut, että tekniikalla on potentiaalia myös suuressa mittakaavassa. SOEC:illa on korkea hyötysuhde ja sen ansiosta tekniikka on kustannustehokkaampi sähköhinnassa, etenkin korkean energiahinnan olosuhteissa. SOEC on kehittynyt nopealla vauhdilla viime vuosina, mutta se on kohdannut merkittäviä teknisiä ongelmia, kuten suorituskyvyn heikkeneminen ja lyhyt käyttöikä. Edellä mainitut asiat liittyvät materiaalin ominaisuuksiin. Materiaalin valinnalla ja käytöllä on suuri vaikutus sähkökemiallisiin ja kemiallisiin prosesseihin ja erilaiseen massan, lämmön ja varauksen kuljettamiseen⁴⁹.

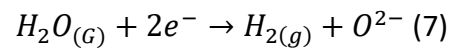
Kiinteäoksidi elektrolyysikemmon pääkomponentit ovat tiheä ioninen johtava elektrolyytti ja kaksi huokoista elektroodia. Tässä järjestelmässä katodin puolella oleva vesi yhdistyy elektroneja ulkoisesta piiristä muodostamaan vetykaasua ja negatiivisesti varautuneita happi-ioneja. Seuraavaksi happi-ionit kulkeutuvat kiinteän keraamisen kalvon läpi ja tämän jälkeen reagoivat anodin puolella muodostaen happikaasua ja tuottaen elektroneja ulkoiseen piiriin.⁵⁰

⁴⁸ Bhandari, R

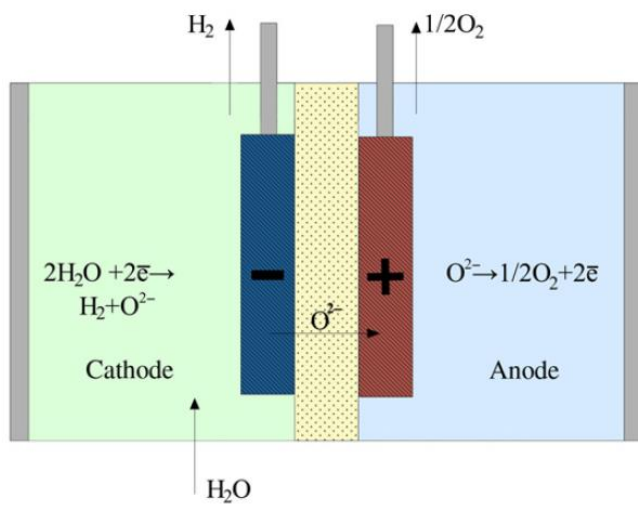
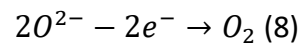
⁴⁹ Li, Z

⁵⁰ Shumkov, I

Vesimolekyylit ovat katodilla pelkistetty



Happi-ionit siirtyvät anodille, jossa happea kehittyi.⁵¹



Kuvio 6. SOEC-elektrolyysikenno⁵²

⁵¹ Gandia, L.

⁵² Gandia, L.

3 OPINNÄYTETYÖN TOTEUTUS

Tässä luvussa kerron tarkemmin tutkimusmenetelmästä, jonka avulla toteutan analyysin. Luvussa 3.2 kerron kirjallisuuskatsauksesta menetelmänä, minkä jälkeen luvussa 2.2 syvennyn siihen, miten kirjallisuuskatsausta voi hyödyntää hyötysuhteiden tutkimisessa. Luvussa 3.3 toteutan menetelmän mukaisen analyysin.

3.1 Kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä

Hyödynnän tässä tutkimuksessa tutkimusmenetelmänä kirjallisuuskatsausta, jonka avulla pyrin selvittämään elektrolyysitekniikoiden hyötysuhteita. Kirjallisuuskatsauksella tarkoitetaan menetelmää, jossa tutkija tekee analyttistä ja arvioivaa tutkimusta omasta aiheesta. Keskiössä ovat tutkimusongelmaan liittyvä aikaisempi tutkimus ja tieteellinen kirjallisuus. Kirjallisuuskatsauksessa on kyse siis teoreettisesta kehkosta, jonka kanssa tutkija käy vuoropuhelua omassa tutkimuksessa. Tutkimusmenetelmien avulla pyrin tekemään laadukkaan yleiskatsauksen aiempiin tutkimuksiin ja niistä löytyviin tietoihin. Yleensä puhutaan myös tutkimuskirjallisuuteen perehtyvistä teoriataustasta tai teoreettisesta viitekehystä. Tärkeää onkin käyttää oman tieteenalan ajattelumallia ja asettaa metodologiset toimintatavat⁵³.

3.2 Kirjallisuuskatsauksen hyödyntäminen energiatehokkuuden tutkimisessa

Tutkimuksen tarkoituksena on kasata laaja ja laadukas yleiskatsaus aiempien tutkimuksien pohjalta. Aloitin tutkimuksen systemaattisella tiedonhauulla ScienceDirect-tietokannassa. Hakusanoina käytin termejä veden elektrolyysistä. Tähän kirjallisuuskatsaukseen valikoituneet tutkimukset ovat Journal-artikkeleita, jotka on

⁵³ Jyväskylän yliopisto

julkaistu vuosina 2015–2022. Keräsin 8 erilaista artikkelia, jotka esittelen tarkemmin liitteessä 1. Valikoituneet artikkelit ovat erilaisista simuloinneista, oikeista projekteista ja laskennallisista tuloksista kertovia tutkimuksia. Artikkeleiden kriteerinä oli olla alkuperäinen, elektrolyysitekniikoiden hyötysuhteiden tutkimiseen keskittynyt artikkeli. Artikkeleille on luotu tunnukset, joita käytän tässä tutkimuksessa (ks. liite 1).

3.3 Aiempiin tutkimuksiin perustuva analyysi

Ensimmäisessä artikkelissa, josta käytän tunnusta A1, aiheena on veden elektrolyysin nykytila ja elektrolyysin hyödyntäminen energiavarastointiin ja verkon tasapainottamiseen. Artikkelissa tutkittiin kaupallisessa käytössä olevia suuria elektrolyysijärjestelmiä eli vain suurimmat järjestelmät listattiin. Artikkelissa tarkasteltiin 23 erilaista veden alkalielektrolyysitoimittajaa, 12 PEM-elektrolyysitoimittajaa ja yhtä SOEL-toimittajaa.

Artikkelissa A2 tutkitaan, kuinka veden alakalielektrolyysin tuotantoa voitaisiin tehostaa lisäämällä aktivoivia yhdisteitä ionisessa ja kompleksissa muodoissa. Artikkelin mainitsee muutaman erilaisen kokeellisen tavan yrittää madaltaa energian määrää prosessissa, kuten uusien kalvomateriaalin ja uusien elektrodeihin liittyvien materiaalien kehittäminen. Toisella tavalla on yritetty käyttää mahdollisimman halpaa sähköä. Esimerkiksi joissakin maissa on paljon ylimääräistä sähköenergiaa edulliseen hintaan, kuten että yön aikana sähköhinta on todella halpaa. Yleensä tällainen on ominaista maille, joilla on käytössä vesivoimaa tai ydinvoimaa. Tutkimuksen pääkohde on koboltti- ja volframipohjoiset ioniaktivaattorit.

Artikkeli A3:ssa käsitellään tuuli- ja aurinkovoimaa energianlähteenä tuottamaan vihreää vetyä PEM-elektrolyysillä. Tutkimus sijoittuu Puolaan, missä energiapolitiikan kanssa ollaan erittäin motivoituneita tutkimaan vetyä. Tutkimuksessa esitellään kokeellinen varastointikonsepti vetykemiallisen energian muodossa. Tämä kokeellinen järjestelmä koostuu monesta eri komponentista. Komponentteina

ovat esimerkiksi PV-paneeli, PEM-elektrolysaattori, akusto, logistiikkaohjainjärjestelmä ja valinnaisena lisäosana on tuuliturbiini. Vedyntuotantojärjestelmä saavutti keskimääräisen operaatiotehokkuuden akuissa puskuroidulla sähköllä ja arvoksi saatiin 69,87 %.

Artikkelissa A4 käsitellään veden elektrolyysitekniikan tehokkuuden nostamista. Tutkimuksessa nostettiin yleisimmät tekniikat esille, eli veden alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi ja SOEL. Tutkimuksessa vetyä tuotetaan aurinkovoimalla. Tutkimuksessa mainittiin lupaavasta vihreän vedyn tuotantotavasta, mikä voisi olla tulevaisuudessa taloudellisesti kilpailukykyinen ja kaupallisesti kannattava. Kyseessä on aurinkosähköpaneelien kytkentä vesielektrolysaattoriin. Tutkimuksen mukaan kyseisissä järjestelmissä aurinkopaneelien tuottamaa energiaa käytetään elektrolyysiprosessin tehostamiseen ja sitä kutsutaan aurinkovetyhybridijärjestelmäksi. Tutkimuksessa mainittiin, että kyseisen järjestelmän hyötysuhde on kuitenkin liian alhainen ollakseen taloudellisesti kilpailukykyinen. Tutkimuksessa perehdyttiin nykyisiin veden elektrolyysin hyötysuhteisiin ja kuinka sitä voitaisiin parantaa. AEL hyötysuhteeksi saatiin 51–60 %, PEM hyötysuhteeksi 46–60 % ja SOEL hyötysuhteeksi 76–81 %.

Artikkelissa A5 aiheena on yhdistetyin aurinkosähkövoimatuotannon suunnittelu ja optimoitu SOEC-elektrolyysi vedyn tuotantoon. Tutkimuksessa tehtiin matemaattinen ja sähkökemiallinen mallinnus järjestelmästä. Artikkelissa tutkittiin SOEC:n valmiutta toimia yhdessä aurinkosähkövoiman kanssa. Mallinnuksen tarkoitus oli selvittää järjestelmän suorituskyky erilaisissa käyttöolosuhteissa ja samalla havainnollistaa virrantiheyttä ja lämpötilaa. Järjestelmä tuotti 7 458 kg/h vetyä ja hyötysuhde oli 54 %.

Artikkelissa A6 tutkitaan vertailevasti eri veden elektrolyysitekniikoita ja tehdään niille monifysikaalinen mallinnus. Mallinnuksessa otetaan huomioon virrantiheysjakauma, virtaukset, joita on yksivaiheinen ja kaksivaiheinen, massan siirtyminen ja lämpötilariippuvuus elektrolysaattoreissa. Nämä asiat mahdollistavat, että voidaan perusteellisesti tulkita I-V-ominaisuuksien ja kennotehokkuuden eroja.

Artikkelissa A7 tutkitaan veden alkalielektrolyysitekniikkaa ja sille suoritetaan numeerinen mallinnus ja analyysi, kuinka lämpötila vaikuttaa suorituskäytön veden alkalielektrolyysissä. Simulaatiotuloksissa havaittiin, että korkeampi toimintalämpötila lisää järjestelmän tehokkuutta vain korkean virrantiheyden alueella. Tutkimuksessa vertailtiin järjestelmän hyötysuhdetta elektrolyytin vakiovirtausnopeuden ja vakiolämpötilagradientin välillä. AWE-lämpötila oli 70 °C ja virrantiheydet vaihtelivat, 0,4 – 1,0 A/cm².

Artikkelissa A8 tutkitaan vedyn tuotantoa veden elektrolyysillä, jossa energialähteenä käytetään verkkoon kytkemätöntä (Off-grid) aurinkosähköjärjestelmää. Kyseiset järjestelmät sijaitsivat Espanjassa Madridissa ja Lounais-italiassa Fiscianossa. Tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista kokoonpanoa, toisessa oli akut ja toisessa ei ollut. Vedyn tuottamiseen käytettiin PEM-elektrolyysitekniikkaa. PEM-elektrolyysin hyötysuhteeksi ilman akustoa Madridissa saatiin 62,5 % ja akuston kanssa 64,7 %. Fiscianossa saatiin ilman akustoa 62,5 % ja akuston kanssa 64,7 %.

4 TULOKSET

Tässä luvussa syvennyn tarkemmin edellisessä luvussa esittelemääni kahdeksaan artikkeliin. Analysoin artikkeleissa tutkittuja elektrolyysitekniikoiden hyötysuhteita ja pohdin yleisesti esiintyviä elektrolyysitekniikoiden hyötysuhteiden ominaisuuksia.

Artikkelissa A1 tutkittiin DonQuichote-projektia, jossa PEM-elektrolyysille saatiin hyötysuhteeksi 67 %. Huomattiin että PEM-elektrolyysijärjestelmässä hyötysuhde heikkenee ylisuuren kompressorin suorituskyvyn heikkenemisen vuoksi. Artikkelissa perehdyttiin myös toiseen projektiin, jossa oli myös PEM-elektrolyysitekniikalla toimiva vedyntuotantojärjestelmä. Järjestelmän toimittaja oli Siemensin Energiepark Mainz -projekti. Projektissa hyötysuhde oli 58 % PEM-elektrolyysitekniikalla. Tutkimuksessa huomattiin, että hyötysuhteen tehokkuuden lisääminen onnistuu hyödyntämällä elektrolyysilaitteen matalan lämpötilan hukkalämpöä ja integroimalla sivutuotteena syntyvää happea. Artikkelissa A6 mainittiin, että mitä suurempi lämpötila on elektrolyysiprosessi niin sitä pienempi energiankulutus. Sen sijaan artikkelissa A3 oli tutkittu myös PEM-elektrolyysiä, jonka energialähteenä oli tuuli- ja aurinkovoima. Vedyntuotantojärjestelmä saavutti keskimääräisen operaatiotehokkuuden akuissa puskuroidulla sähköllä ja arvoksi saatiin 69,87 %. Tärkeä huomio tuli artikkelissa, kun tutkijat havaitsivat elektrolyysitehokkuuden riippuvuuden virran voimakkuudesta. Eryyisen kiinnostavaa on, että pienillä virta-arvoilla – kun lisättiin 1,5 A pienillä lisäyksillä – elektrolyysin hyötysuhde lisääntyi merkittävästi. Artikkelissa A3 PEM-elektrolyysissä oli käytetty virran-
tiehyttä 1.0 A/cm^2 .

Artikkelissa A8 oli myös tutkittu vedyn tuottamista veden elektrolyysillä ja juurikin PEM-elektrolyysitekniikalla. Energialähteenä käytettiin tutkimuksen mukaa off-grid-aurinkosähköjärjestelmää. Kokeessa suoritettiin kaksi erilaista mittausta ja virrantiheydet vaihtelivat $0,6 \text{ A/cm}^2$ – $1,0 \text{ A/cm}^2$. Ensimmäinen mittausta suoritettiin

ilman akustoa ja toinen suoritettiin akuston kanssa. Ilman akustoa toimivalle järjestelmälle, joka toimi virrantiheydellä $1,0 \text{ A/cm}^2$, saatiin hyötysuhteeksi 62,5 % ja samalla virrantiheydellä toimiva, akustolla varustettu järjestelmä sai hyötysuhteeksi 64,7 %. Artikkeleissa A3 ja A8 on käytetty virrantiehyttä $1,0 \text{ A/cm}^2$, koska artikkeli A8 mukaan alle $1,0 \text{ A/cm}^2$ käyttäminen se estää elektrolysaattorin varhaista suorituskyvyn alenemista. Myös artikkelissa A4 oli tutkittu, kuinka vedyn tuotannon tehostaminen parantuu, kun energialähteenä toimii aurinkovoima. Tutkimuksessa tutkittiin kaikkia veden elektrolyysitekniikoita. Tutkimuksessa todettiin, että veden alkalielektrolyysitekniikalla on etuna vakaa operointi ja vastavasti haittana on, että järjestelmään syntyy korroosiota.

Artikkelissa A2 oli tutkittu, kuinka vedyn tuotantoa voidaan tehostaa. Tutkimuksen mukaan se on mahdollista lisäämällä aktivoivia yhdisteitä ionisessa ja kompleksissa muodossa. Elektrolyysitekniikkana käytettiin veden alkalielektrolyysiä. Tutkimuksessa käytettiin myös $0,5 \text{ A/cm}^2$ – $1,0 \text{ A/cm}^2$ virrantiheyksiä. Hyötysuhde oli laskettu vedyn korkeampana lämpöarvona (HHV) ja se jaettuna elektrolyysijärjestelmän kuluttamalla energialla tuotettua vetyä kilogrammalla tai moolia kohden. Hyötysuhde oli 75–85 %. Hyötysuhde oli huomattavasti korkeampi, kun käytettiin ioniaktivaattoreita. Päätelmä oli, että ioniaktivaattorit nostavat energiatehokkuutta merkittävästi. Veden alkalielektrolyysiä tutkitaan myös artikkelissa A6, jossa hyötysuhteeksi oli saatu 50–60 %. Virrantiheys on myös yleensä $1,0 \text{ A/cm}^2$ tässäkin elektrolyysitekniikassa.

Artikkelissa A5 käsiteltiin uutta aurinkosähköjärjestelmää, jossa on integroitu SOEC-elektrolyysi. Tutkimus kartoittaa, voiko SOEC-tekniikkaa käyttää osana aurinkosähköjärjestelmää ja tehokkaana vedyn tuotantomenetelmänä. Tutkimuksessa esiteltiin kahta tapausta, missä SOEC-hyötysuhde perustui simuloituihin parametreihin. Auringon säteily oli 75 W/cm^2 ja absorboin lämpötila oli noin $1\,230 \text{ K}$. Näillä arvoilla SOEC-hyötysuhde oli 51–54 %. Tuloksissa oli myös simuloitu vedyn kg/h -arvo ja se oli $7\,295$ – $7\,458 \text{ kg/h}$. Hyötysuhteiden välillä oli pieni ero, vaikka

käyttölämpötilat olivat ensimmäisessä mittauksessa 700 °C ja toisessa 750 °C. Artikkelissa A6 mainittiin, että korkea lämpötila vähentää sähkön tarvetta ja aktivoi elektrodit, kun SOEC saavuttaa virrantiheyden huipun. Artikkelissa A7 tutkittiin lämpötilan vaikutusta veden alkalielektrolyysissä. Tutkimuksessa huomattiin, että järjestelmän tehokkuutta lisää matala lämpötilagradientti. Tutkimuksessa virrantiheydet olivat kokeissa 0,4 A/cm²– 1,0 A/cm² asteikolla. Tutkimuksessa vertailtiin tehokkuuden jatkuvan elektrolyytin virtausnopeuden ja vakiolämpötilagradientin välillä. Kokeen tuloksissa huomattiin, että matalammalla virrantiheydelle (0,4 A/cm²) hyötysuhde oli korkeampi kuin korkeammalla virranlähteellä. Myös lämpötilan vaikutuksella oli pieni ero, etenkin korkeammilla virrantiheyksillä.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiasiirtymässä vedyllä on merkittävä rooli, etenkin vihreällä vedyllä. Tuuli- ja aurinkovoimaa lisätään merkittävästi koko ajan, kun sitä käytetään vedyn tuotantoon, niin saadaan puhdasta energiaa. Vihreällä vedyllä voidaan myös tasata heilahduksia energiantuotannossa ja vedyllä voidaan myös varastoida energiaa. Tämä myös laskee päästöjä ja auttaa kohti päästötavoitteita.

Vihreää vetyä on tutkittu paljon ja tutkimustietoa löytyy jokaisesta elektrolyysitekniikasta. Veden elektrolyysitekniikoita, joita käytetään vihreän vedyn tuotannossa, on pääasiallisesti kolme erilaista. Yleisin elektrolyysitekniikka on veden alkalielektrolyysi ja tästä aiheesta on tehty paljon erilaisia mallinuksia ja simulointeja tieteellisissä piireissä. Menetelmä on myös halvin ja sitä voidaan käyttää laajasti. Ongelma alkalielektrolyysissä on se, että se vaatii paljon energiaa. Toinen kaupallisessa käytössä oleva elektrolyysitekniikka on PEM-elektrolyysi ja se on houkutteleva tekniikka teollisuuden käyttöön. PEM-elektrolyysissä ongelmana on se, että materiaalikustannukset ovat korkeat, etenkin jalometallielektroidit. PEM-elektrolyysi on kuitenkin kompaktiin kokoon menevä elektrolyysitekniikka ja omaa yksinkertaisen teknologian. Höyryelektrolyysi eli SOEC sen sijaan on vielä tutkimusasteella. Luultavasti menetelmästä tulee kustannustehokkain, sillä materiaalikustannukset ovat muista elektrolyysitekniikoista halvempia. Se on hyötysuhteeltaan myös korkein, koska elektrolyysiprosessiin tarvittava energia voidaan paikata osittain lämmöllä ja tämä lisää hyötysuhdetta.

Tämä tutkimus oli pintaraapaisu käsiteltävään aiheeseen, minkä vuoksi elektrolyysitekniikoiden hyötysuhteita olisi hyvä tutkia myös tarkemmin. Yksi hyvä jatkotutkimuksen aihe voisi olla hukkalämmön hyödyntäminen elektrolyysiprosessissa.

LÄHTEET

Ajanovic, A., Sayer, M. & Haas, R. 2022. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2–4. Viitattu 15.03.2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>

Barei, K., De la Rua, C., Mckl, M. & Hamacher, T. 2019. Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. *Applied Energy*, 863. Viitattu 22.03.2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001>

Baumeister & Leary, 1997, 312. Viitattu 10.05.2022.

Bhandari, R., Trudewind, C.A. & Zapp, P. 2014. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production*, 156. Viitattu 10.4.2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>

Chen, F., Duic, N., Alves, L. M. & Carvalho, M. G. 2007. Renewislands—Renewable energy solutions for islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1888–1902. Viitattu 01.03.2022. doi:10.1016/j.rser.2005.12.009

Fortum. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. Päivitetty 04.10.2020. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Gandia, L. M., Arzamendi, G. & Dieguez, P. M. 2013. Renewable Hydrogen Technologies : Production, Purification, Storage, Applications and Safety. *Renewable Hydrogen Technologies*, 2.2, 25–38. Viitattu 10.03.2022. <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=1187143>

Gong, J. 2021. A commentary of green hydrogen in MIT Technology Review 2021. *Fundamental Research*, 1. Viitattu 23.03.2022. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.11.013>

Goswani, D. Y. & Kreith, F. 2016. Energy efficiency and renewable energy handbook, 1670. Viitattu 23.03.2022.

H2 Cluster Finland 2021. A systemic view on the Finnish hydrogen economy today and in 2030 – Our common playbook for the way forward, 5. Viitattu 15.03.2022. <https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/inline-files/H2Cluster-Whitepaper-092021.pdf>

Hermesmann, M. & Mller T.E. 2022. Green, turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1–22. Viitattu 15.03.2022. <https://doi.org/10.1016/j.pecc.2022.100996>

Jumppanen, P. 2011. Vety energiantuotannossa. *Rakenteiden Mekaniikka*. 42(4), 218-234. Viitattu 02.02.2022. http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/Rak-Mek_42_4_2009_4.pdf

Panwar, N. L., Kaushik, S. C. & Kothari, S. 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1513–1524. Viitattu 02.03.2022. doi:10.1016/j.rser.2010.11.037

Shumkov, I. & Yaneva, M. 2021. Large-scale electrolysis technology of the past to shape the future, 4. Ossi Koskisen aineisto, yliopettaja. Viitattu 02.04.2022.

Siemens. Onko vihreä vety seuraava suomalainen menestystarina? *Kauppalehti*. Päivitetty 31.03.2022. <https://www.kauppalehti.fi/kumppanisisallot/siemens/onko-vihrea-vety-seuraava-suomalainen-menestystarina-potentiaalia-ja-osaamista-loyttaa-vakuuttavat-asiantuntijat/>

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. 19. Viitattu 23.03.2022. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163901>

Sulasalmi, P., Kärkkäinen, M-L. & Fabritus, T. 2021. Hydrogen study of the bay of bothnia, 2–7. Ossi Koskisen aineisto, yliopettaja Viitattu 01.04.2022.

Wu, D., Wang, D., Ramachandran, T. & Holladay, J. 2022. A techno-economic assessment framework for hydrogen energy storage toward multiple energy delivery pathways and grid services. *Energy*, 1 - 3. Viitattu 15.03.2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123638>

LIITTEET

LIITE 1

Artikkeli	Tutkimuksen aihe	Artikkelitunnus
Buttler, A. & Spliethoff, H. 2018. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> ,	Veden elektrolyysin nykytila ja elektrolyysin hyödyntäminen energianvarointiin, verkon tasapainoittamiseen.	A1
Nikolic, V.M., Tasic, G.S., Maksic, A. D., Sponjic, D. P., Miulovic, S. M. & Kaninski, M. P. M. 2010. Raising efficiency of hydrogen generation from alkaline water electrolysis e Energy saving. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> .	Vedyn alkali-elektrolyysin tuotannon tehostaminen lisäämällä aktiivisia yhdisteitä ionisessa ja komplekseksissa muodossa.	A2
Werle, S. & Zaik, K. 2021. Solar and wind energy in Poland as power sources for electrolysis process - A review of studies and experimental methodology.	Vihreää vetyä tuotetaan tuuli- ja aurinkoenergialla mallinnus. PEM-elektrolyysitekniikan hyötysuhteen laskeminen.	A3
Burton, N.A., Padilla, R.V., Rose, A. & Habibullah, H. 2021. Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. <i>Renewable and sustainable energy reviews</i> .	Tutkimuksen aiheena on hyötysuhteen nostaminen vedyn tuotannossa aurinkovoimalla veden elektrolyysitekniikalla.	A4
Daneshpour, R. & Mehrpooya, M. 2018. Design and optimization of a combined solar thermophotovoltaic power generation and solid oxide electrolyser for hydrogen production. <i>Energy Conversion and Management</i> .	Yhdistetyin aurinkosähkövoimatuotannon suunnittelu ja optimoitu SOEC-elektrolyysi vedyn tuotantoon. Tutkimuksessa tehtiin matemaattinen ja sähkökemiallinen mallinnus järjestelmästä.	A5
Hu, K., Fang, J., Ai, X., Huang, D., Zhong, Z., Yang, X. & Wang, L. 2022 Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling. <i>Applied Energy</i> .	Tutkittiin vertailevasti eri veden elektrolyysitekniikoita ja tehdä niille monifysikaalinen mallinnus. Mallinnuksessa otetaan huomioon virrantiheysjakauma, virtaukset, joita on yksivaiheinen ja kaksivaiheinen, massan siirtyminen ja lämpötilariippuvuus. elektrolysaattoreissa.	A6
Jang, D., Choi, W., Cho, H., Cho, W., Kim, C. & Kang, S. .Numerical modeling and analysis of the temperature effect on the performance of an alkaline water electrolysis system. <i>Journal of Power Sources</i> .	Veden alkali-elektrolyysi tekniikkaa ja sille suoritettiin numeerinen mallinnus ja analyysi, kuinka lämpötila vaikuttaa suorituskyykyyn veden alkali-elektrolyysissä.	A7
Martín, F.G, Amodio, L. & Pagano, M. 2021 . Hydrogen production by water electrolysis and offgrid solar PV.	Vedyn tuotantoa veden elektrolyysillä, jossa energialähteenä käytettiin verkkoon kytkemätöntä (Off-grid) aurinkosähköjärjestelmää. Tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista kokoonpanoa, toisessa oli akut ja toisessa ei.	A8