

Jenni Palomäki

ENERGIAN VARASTOIMINEN VETYYN SÄHKÖKEMIAALLISILLA MENETELMILLÄ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Joulukuu 2024

TIIVISTELMÄ

Jenni Palomäki: Energian varastoinen vetyyn sähkökemiallisilla menetelmillä

Energy storage in hydrogen by electrochemical methods

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan opintosuunta
Joulukuu 2024

Ilmastonmuutoksen myötä pyritään eroon fossiilisista polttoaineista. Kun siirrytään käyttämään uusiutuvia energian tuotantotapoja, energian varastoinnin merkitys korostuu. Uusiutuva energia on vaikeasti ennustettavaa ja vaihtelee vuorokauden ajan, vuodenajan ja vuoden sisällä merkittävästi. Jotta uusiutuvasta energiasta saataisiin kilpailukykyistä, sitä tulisi saada varastoitua tuotantopiikin aikana, jotta energiaa olisi varastossa hetkille, joissa uusiutuvaa energiaa ei saada tuotettua.

Tässä työssä selvitetään, miten energiaa voidaan varastoida vetyyn sähkökemiallisilla menetelmillä. Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä. Työssä on tarkasteltu tieteellisiä julkaisuja energian varastoinnista ja elektrolyysimenetelmistä ja hyödynnetty yritysten nettisivuja esimerkiksi tuulivoiman ja aurinkovoiman tutkimiseen. Työssä on kolme osaa. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan energian varastointia. Tässä osassa tarkastellaan lyhyestä millä eri tavoilla energiaa voidaan varastoida ja keskitytään lopuksi siihen, millainen energian varasto vety on. Osassa esitellään myös millaisia etuja ja haasteita vetyvarastojen käytöllä on.

Työn toisessa osassa esitellään sähkökemialliset menetelmät varastoida energiaa vetyyn. Sähkökemiallisista menetelmistä tutkitaan elektrolyysimenetelmiä, joita ovat alkalielektrolyysi, polymeerielektrolyysi, vesihöyryelektrolyysi sekä anioninvaihtomembraani elektrolyysi. Työ keskittyy näistä elektrolyysimenetelmistä kolmeen ensimmäiseen, sillä ne ovat paremmin tunnettuja ja niiden kaupallinen kypsyyden on parempi kuin anioninvaihtomembraani elektrolyysillä. Vesihöyryelektrolyyseistä tutkitaan vain kiinteä oksidielektrolyysiä, sillä se on kyseisen menetelmän tutkituin tyyppi.

Viimeinen osa keskittyy toisessa osassa esiteltyjen elektrolyysimenetelmien vertailuun. Osassa vertaillaan menetelmissä käytettäviä materiaaleja, menetelmällä tuotetun vedyn puhautta, tuotannon hyötysuhdetta, menetelmälle soveltuvia käyttökohteita sekä menetelmien taloudellisuutta. Tutkimus osoittaa, että elektrolyysimenetelmät poikkeavat toisistaan sekä rakenteen että käytön kannalta. Taloudellisen kannattavuuden kannalta on tärkeä tuntee menetelmien ominaisuudet ja valita käyttökohteeseen soveltuva menetelmä.

Työssä havaittiin, että lähitulevaisuudessa ja tällä hetkellä elektrolyysimenetelmistä merkittävin on alkalinen elektrolyysi. Polymeerielektrolyysin kehityksessä on kuitenkin tehty merkittävää edistystä ja tulevaisuudessa se tulee kilpailemaan alkalielektrolyysin kanssa myös suuremman kokoluokan vedyn tuotannossa. Kehitysvaiheessa oleva kiinteä oksidielektrolyysi vaatii vielä työtä erityisesti materiaalien elinajan kehittämiseen. Vaikka alkalinen elektrolyysi onkin jo todella lupaavassa vaiheessa, siirtymä vihreään vetytalouteen vaatii vielä paljon työtä erityisesti toimivan vetyverkoston rakentamiseksi.

Avainsanat: Vety, Vihreä vety, Energian varastointi, Elektrolyysimenetelmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. ENERGIAN VARASTOINTI	3
2.1 Uusiutuvan energian tuotantotavat	3
2.2 Energian varastointitavat	5
2.3 Vety energiavarastona	6
2.3.1 Vedyn varastointitavat ja niihin liittyvät ongelmat	6
2.3.2 Vedyn kuljetus	7
3. SÄHKÖKEMIAALLISET MENETELMÄT	10
3.1 Elektrolyysi yleisesti	10
3.2 Alkalinen elektrolyysi	11
3.3 Polymeerielektrolyysi	13
3.4 Vesihöryelektrolyysi.....	14
4. ELEKTROLYYSIMENETELMIEN VERTAILU.....	17
4.1 Elektrolyysimenetelmien materiaalit	17
4.2 Vedyn puhtaus, hyötysuhteet sekä käyttökohteet	18
4.3 Menetelmien taloudellisuus.....	19
4.4 Tulokset ja päätelmät	20
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	22
LÄHTEET.....	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

H ₂	Vety
O ₂	Happi
H ₂ O	Vesi
OH ⁻	Hydroksidi-ioni
e ⁻	Elektroni
H ⁺	Vety-ioni
O ²⁻	Oksidi-ioni
AEL	Alkaline Electrolysis, alkalinen elektrolyysi
AEMEL	Anion Exchange Membrane Electrolysis, anioninvaihtomembraani elektrolyysi
CCS	Carbon capture and storage, hiilidioksidin talteenottoteknologia
HTSEL	High-Temperature Steam Electrolysis, korkean lämpötilan elektrolyysi
PEMEL	Proton Exchange Membrane Electrolysis, polymeerielektrolyysi
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell, kiinteä oksidikenno

1. JOHDANTO

Nykyhetken yksi suurimmista ongelmista ihmiskunnalle on ilmastonmuutos, joka vaikuttaa koko maapallon ilmasto-olosuhteisiin esimerkiksi nostaten lämpötilaa. Kestävien energiateknologioiden kehittäminen sekä fossiilisista polttoaineista luopuminen ovat tarpeen tämän ilmastonmuutoksen hidastamiseksi (Widera 2020).

Ilmastonmuutoksesta johtuva olosuhteiden muuttuminen vaikuttaa suoraan energiasysteemeihin. Esimerkiksi voimalaitokset kärsivät lämpenevästä ilmastosta ja vesivarojen vähentymisestä. Kyseiset muutokset vaikuttavat muun muassa voimaloiden jäähtytykseen. Olosuhteiden muuttuminen vaikuttaa merkittävästi myös uusiutuvan energian tuotantoon, sillä sen tuotantotavat ovat yleensä riippuvaisia ilmastosta (OECD/NEA 2021). Uusiutuvan energian tuotanto on kuitenkin avain fossiilisista polttoaineista luopumiseen (Dincer et al. 2018).

Kun siirrytään käyttämään uusiutuvia energiantuotantotapoja, energian varastoinnin tärkeys korostuu (Dincer et al. 2018). Vihreää vetyä eli hiilineutraalisti valmistettua vetyä voidaan pitää yhtenä lupaavana tulevaisuuden energiavarastona (Widera 2020). Sitä tuotetaan tyypillisesti sähkökemiallisesti eli elektrolyysin avulla. Elektrolyysissä vesi hajotetaan sähköenergiaa käyttäen hapeksi ja vedyksi. Mikäli prosessissa käytetty sähkö tuotetaan uusiutuvalla energialla, on vety täysin päästötöntä. Esimerkki päästöttömästä vedystä on vedyn elektrolyyttisen valmistuksen yhdistäminen tuulivoimalaan (Widera 2020).

Työ on kirjallisuuskatsaus, jonka aineistona käytetään kirjoja ja tieteellisiä artikkeleita. Tutkielman tarkoituksena on esitellä sähkökemialliset menetelmät, joilla energiaa voidaan varastoida vetyyn. Tutkielma vertailee näiden menetelmien ominaisuuksia, kuten hyötysuhdetta, tuotetun vedyn puhtautta, käyttökohdetta sekä menetelmien vaatimia materiaaleja.

Koska vetytalous ei ole vielä osa energiajärjestelmää, työssä käsitellään myös elektrolyysimenetelmien haasteita ja pohditaan millainen rooli eri menetelmillä voisi mahdollisesti olla tulevaisuudessa. Pelkkä toimiva vedyn tuotanto ei riitä toimivan vetytalouden

saavuttamiseksi. Siksi tutkielmassa käsitellään lyhyesti myös koko vetytalouden haasteita.

Työn luvussa 2 käsitellään energian varastointia ja vedyn roolia energiavarastona. Luvussa 3 esitellään vedyn tuotannon sähkökemialliset menetelmät ja luku 4 keskittyy näiden menetelmien vertailuun. Lopussa työn päätelmät kootaan yhteen johtopäätökset luvussa.

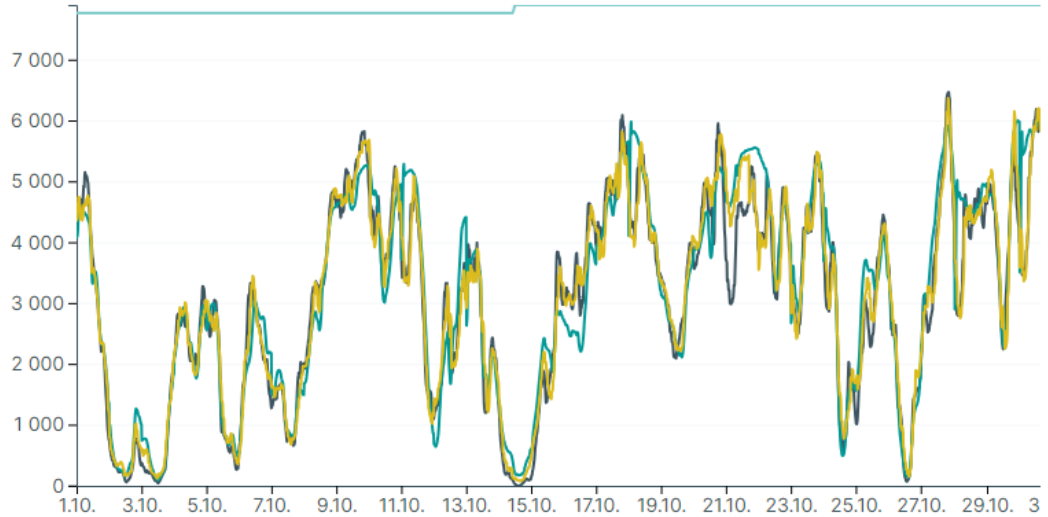
2. ENERGIAN VARASTOINTI

Energian varastointi on tärkeää ja energiavarastoja tarvitaan energianjakelun eri vaiheissa. Varastoinnin suurin syy on saatavuuden ja kysynnän yhteensopimattomuus (Rufer 2018). Energian varastoinnilla pyritään siis mahdollistamaan jatkuva energian saanti. Ihmiskäytön kasvaessa myös energiankulutus kasvaa, mikä lisää energiantuotannosta syntyvien päästöjen aiheuttamia ongelmia. Nämä ongelmat motivoivat vaihtamaan fossiilisia polttoaineita käyttävät teknologiat puhtaisiin, tehokkaisiin ja kestäviin vaihtoehtoihin, joita uusiutuvat energiantuotantotavat ovat.

2.1 Uusiutuvan energian tuotantotavat

Uusiutuviin energiantuotantotapoihin siirryttäessä energian varastoinnista on tullut yhä tärkeämpää (Dincer et al. 2018). Energian varastointi on tärkeää juuri uusiutuvien energiantuotantotapojen käytössä, sillä varastointi auttaa tekemään niistä kilpailukykyisempiä. Monien uusiutuvien energiantuotantotapojen, kuten aurinkoenergian ja tuulienergian saantia on vaikea ennustaa pitkällä aikavälillä, sillä niiden tuotanto riippuu pitkälti tuotantohetken sääolosuhteista, joita ei osata arvioida tarkasti edes muutamaa viikkoa aikaisemmin. (Stadler et al. 2019)

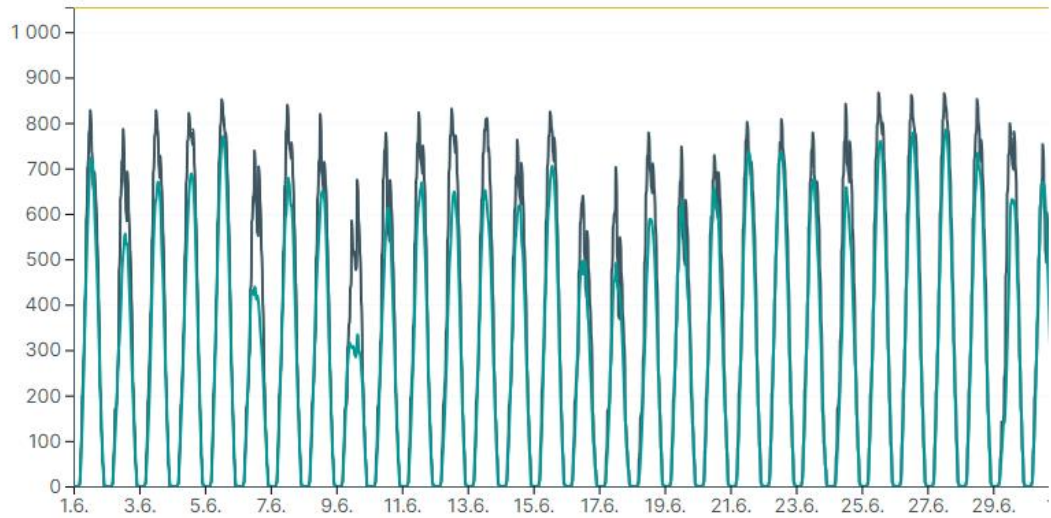
Kuvasta 1 nähdään, että tuulivoiman tuotanto on hyvin vaihtelevaa. Tuulivoiman tuotantoon vaikuttavat vahvasti sääolosuhteet, mutta myös vuodenaika vaikuttaa tuulen määrään. Vuoden tuulisähköstä valtaosa tuotetaan kylmimpinä kuukausina. Sen lisäksi, että talvikuukausina tuulee tyypillisesti enemmän kuin kesällä myös ilman tiheys on korkeampi ja tällöin samasta ilmamäärästä voidaan tuottaa enemmän energiaa. (Energiateollisuus 2024a)



Kuvaaja	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
● Tuulivoiman tuotanto	-7	6465	3086 MWh/h
● Tuulivoimaennuste seuraavalle vuorokaudelle	90	6014	3192 MWh/h
● Jatkuvasti päivittyvä tuulivoimaennuste	73	6365	3115 MWh/h
● Tuulivoimaennusteessa käytetty kokonaiskapasiteetti	7764	7898	7826 MWh/h

Kuva 1: Tuulivoima lokakuussa 2024 (Fingrid 2024)

Kuvasta 2 nähdään, että myös aurinkovoiman tuotanto vaihtelee paljon aurinkoisuuden, vuorokaudenajan sekä vuodenajan mukaan. Suomessa aurinkosähkön saatavuuden vuodenaikavaihtelut ovat suuremmat kuin monissa muissa maissa kylmemmän ilmaston vuoksi. Toisaalta kylmä ilmasto parantaa aurinkovoiman hyötysuhdetta. (Energiateollisuus 2024a)



Kuvaaja	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
● Aurinkovoiman tuotantoennuste tunneittain	0	866	319 MWh/h
● Aurinkovoiman tuotantoennuste vrk	0	785	271 MWh/h
● Aurinkovoimaennusteessa käytetty kokonaiskapasiteetti	1055	1055	1055 MWh/h

Kuva 2: Aurinkovoima kesäkuussa 2024 (Fingrid 2024)

Energian varastoinnin avulla pystytään tasaamaan vaihtelusta johtuvia uusiutuvan energian tuotantopiikkejä. Varastoja voitaisiin sijoittaa esimerkiksi suoraan tuulivoimaloiden yhteyteen, jolloin tuotantopiikin aikainen sähkö saataisiin heti hyötykäytettyä esimerkiksi vedyn tai muun polttoaineen tuotantoon. (Bröckl et al. 2022)

2.2 Energian varastointitavat

Energiaa voidaan varastoida termisesti, sähköisesti, sähkökemiallisesti, mekaanisesti ja kemiallisesti. Nämä energiavarastointimenetelmät ovat kaikki erilaisia, sillä ne perustuvat eri fysikaalisiin periaatteisiin (Stadler et al. 2019).

Termiset energiavarastot saadaan aikaan lämpötilavaihtelulla. Menetelmässä tuotantopiikin aikana lämmitetään esimerkiksi vesisäiliötä, jotta veteen varastoitunut lämpöenergia voidaan käyttää myöhemmin, kun energiaa ei ole saatavilla yhtä paljon. Termiset varastot sopivat hyvin lämpöä tarvitsevien laitosten yhteyteen, koska tällöin lämpö voidaan hyödyntää suoraan prosessiin tarvittaessa. (Dincer et al. 2018; Stadler et al. 2019)

Sähkökemialliset varastointimenetelmät puolestaan perustuvat sähköenergian muuntamiseen kemialliseksi energiaksi. Menetelmällä voidaan valmistaa esimerkiksi vetyä elektrolyytisesti vedestä, jolloin valmistuksessa kulunut sähköenergia varastoituu vedyn kemialliseksi energiaksi. (Dincer et al. 2018; Stadler et al. 2019)

Mekaaniset varastot perustuvat sähköenergian muuntamiseen mekaaniseksi energiaksi. Energia siis muunnetaan potentiaali- tai liike-energiaksi ja varastoidaan. Varastoitu energia voidaan myöhemmin muuntaa esimerkiksi sähköenergiaksi ja käyttää halutulla tavalla. (Dincer et al. 2018; Stadler et al. 2019)

Kemialliset varastointimenetelmät perustuvat kemiallisten sidosten katkeamisessa vapautuvaan ja sidosten syntyessä absorboituvaan energiaan. Kemiallisia varastoja voidaan suoraan käyttää polttoaineena, mikä tekee niistä kannattavia. Tällä hetkellä tulevaisuuden polttoaineena eli kemiallisena energianvarastona nähdään vety. (Dincer et al. 2018)

2.3 Vety energiavarastona

Vety on maailmankaikkeuden kevyin ja yleisin alkuaine. Hyvän energiavaraston vedystä tekee sen suuri energiatiheys suhteessa massaan (Singh et al. 2020). Suuren energiatheyden takia vetyyn on mahdollista varastoida todella suuria määriä energiaa. Vedyllä onkin nykyisen tiedon mukaan hyvät mahdollisuudet toimia tulevaisuudessa merkittävimpanä energiavarastona ja energian siirtäjänä. (Töpler 2016)

Vety ei ole primäärienergianlähde, koska se ei esiinny luonnossa sellaisenaan. Kun vetyä valmistetaan vetyä sisältävistä kemiallisista yhdisteistä, valmistukseen käytetty energia varastoituu vetyyn kemialliseksi energiaksi. Vetyyn varastoitunutta energiaa voidaan siirtää, käyttää polttoaineena ja muuntaa haluttuun muotoon esimerkiksi takaisin sähköenergiaksi. (Dincer et al. 2018) Kun vetyä käytetään polttoaineena, sivutuotteena syntyy vain vesihöyryä eli sillä ei ole hiilijalanjälkeä. (Srinivasan et al. 2019)

2.3.1 Vedyn varastointitavat ja niihin liittyvät ongelmat

Vety, johon energia on varastoitu, tulee myös varastoida. Vedyn varastointiin on monia tapoja, joista kaikki tarvitsevat energiaa jossain muodossa. Tarvittava energia voi olla varastointitavan mukaan esimerkiksi lämpöä tai työtä. (Andersson et al. 2019) Kun vetyä varastoidaan, täytyy ottaa huomioon varastointiin liittyvät parametrit. Näitä parametrejä ovat esimerkiksi varaston käyttöikä, täyttöaika, ja turvallisuus. (Srinivasan et al. 2019)

Yleisin tapa varastoida vetyä on paineistettuna kaasuna. Vetykaasua varastoitaessa kaasu paineistetaan, sillä vedyn energiatiheys on tilavuuteen nähden matala. (Singh et al. 2020) Varastoinnin vaatima korkea paine aiheuttaa ongelmia vedyn varastoinnissa ja tuottaa lisäkustannuksia. Yksi ongelmista on säiliöiden materiaalin valinta. Paineen vaihtelu vahingoittaa lujia teräksiä ja vety liikenee joihinkin metalleista, joten materiaali on valittava tarkasti. Säiliömateriaaleiksi soveltuvat esimerkiksi jotkin komposiittimateriaalit. (Afy 2022) Vedyn varastominen paineistettuna kaasuna aiheuttaa myös turvallisuusrisikin, sillä säiliöt voivat räjähtää, mikäli ne haurastuvat korkean paineen takia (Demirci Sankir et al. 2018).

Toinen tapa varastoida vetyä on nesteytettynä. Nesteytetty vety vaatii kryogeeniset olosuhteet eli lämpötilan tulee varastoinnin ajan pysyä erittäin matalana. Kryogeenisten olosuhteiden ylläpitäminen vaatii hyvän lämpöeristyksen, mikä kasvattaa vetyvaraston kooka ja kustannuksia. Nesteyttämisestä syntyvät energiahäviöt ja suuresta energiatarpeesta syntyvät kustannukset ovat myös nesteytetyn vedyn varastointiin liittyviä ongelmia. (Demirci Sankir et al. 2018)

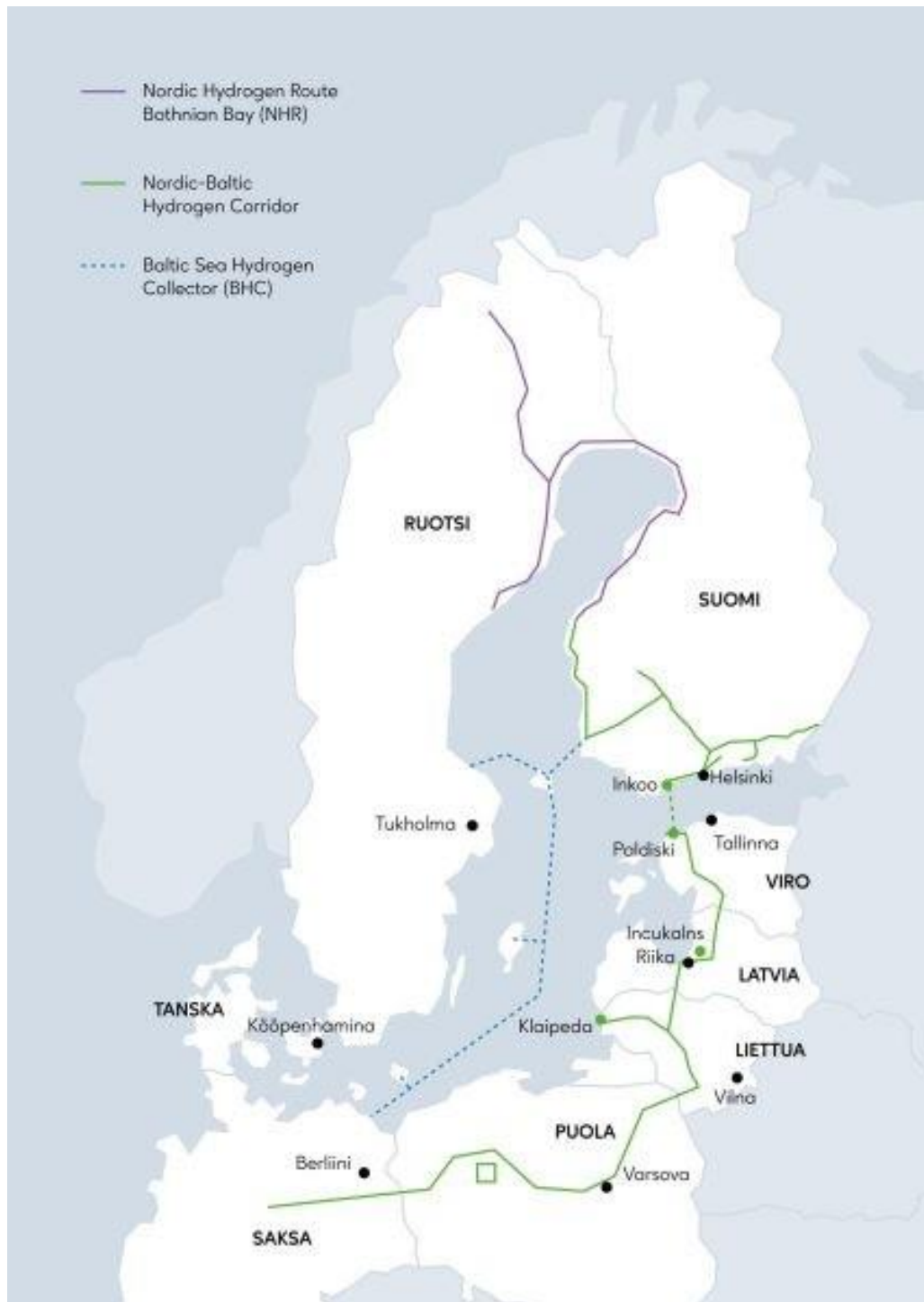
Myös metallihydrideihin voidaan varastoida vetyä. Vetyä varastoidaan niihin kemiallisesti eli liuottamalla vetyä metallin kidehilan (Andersson et al. 2019). Metallihydrideihin varastointiin liittyvät ongelmat riippuvat paljon siitä, minkä tyyppisestä metallihydridistä on kyse. Jotkut metallihydridit pystyvät varastoimaan vain vähän vetyä, kun taas toisten pinta on herkkä oksidoitumiselle. Metallihydrideihin saadaan kuitenkin varastoitua vetyä tilavuuteen nähden enemmän ja turvallisemmin kuin kahdella aikaisemmin mainitulla tavalla (Demirci Sankir et al. 2018).

2.3.2 Vedyn kuljetus

Jotta energian varastointi vetyyn on kannattavaa, tarvitaan toimiva infrastruktuuri vedyn kuljetukseen. Kun vety varastoidaan säiliöihin säiliöt tarvitsevat logistiikkaa eli esimerkiksi rekkoja, junia tai laivoja. Näillä voidaan kuljettaa vetysäiliöitä kaupungista tai maasta toiseen. Tällä tavalla kuljettaminen on kuitenkin hidasta ja kuljetettavan vedyn määrä on esimerkiksi säiliöauton tilanteessa todella rajattu. (Afy 2022)

Vetyä voidaan kuljettaa myös putkessa puhtaana tai sekoitettuna maakaasuun. Tämä tapa on kustannustehokkaampi, mutta vaatii raskasta infraa. Vety läpäisee monet materiaalit ja on helposti syttyvä kaasu eli nämä ominaisuudet on otettava huomioon putkistoa rakennettaessa. (Afy 2022)

Gasgridillä on tällä hetkellä käynnissä hankkeita Suomen rajat ylittävän vetyinfrastruktuurin kehittämiseksi. Kuvassa 3 on kolme suunnitteilla olevaa vetyverkostoa. Hankkeet ovat tällä hetkellä esisuunnittelussa ja verkostojen olisi suunnitelmien mukaan valmistuttava vuoteen 2030 mennessä. (Gasgrid 2024)



Kuva 3: Gasgridin vetyverkostohankkeet kartalla (Gasgrid 2024)

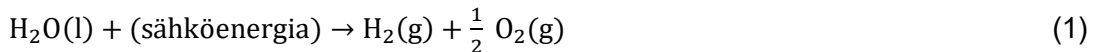
Tällä hetkellä vetyputkistoa on olemassa Meksikonlahdella ja Länsi-Euroopassa. On käynnissä myös projekteja, joissa maakaasulinjoja muutettaisiin sopiviksi vetykäyttöön. Vetykäytössä olevien putkistojen paineet ovat 30–80 barg ja Suomen maakaasun kantaverkon paine puolestaan 50–80 barg. (Afy 2022)

3. SÄHKÖKEMIAALLISET MENETELMÄT

Vety voidaan erottaa kemiallisista yhdisteistä kemiallisilla, termokemiallisilla ja sähkökemiallisilla menetelmillä. Vedyn valmistuksessa lähtöaineena voidaan käyttää öljyä, maakaasua, vettä tai kivihiiltä (Basile et al. 2015). Tässä tutkielmassa keskitytään sähkökemiallisiin menetelmiin, jotka perustuvat veden elektrolyyttiseen hajottamiseen (Godula-Jopek et al. 2015).

3.1 Elektrolyysi yleisesti

Vesi voidaan hajottaa alkuaineisiin eli vetymolekyyleihin ja happimolekyyleihin reaktion 1 mukaisesti (Godula-Jopek et al. 2015).



Hajoamisreaktio ei ole spontaani vaan sen tapahtuminen tarvitsee paljon sähköenergiaa. Sähköenergia kulkee vedessä elektrodilta toiselle elektrolyysikennon sisällä. Elektrolyysikennon perusrakenteeseen kuuluvat negatiivisesti varautunut elektrodi eli katodi, positiivisesti varautunut elektrodi eli anodi sekä kalvo, elektrolyytti ja tasavirtalähde. Elektrolyytti on yleensä vesiliuos, joka sisältää ioneja. (Platzer et al. 2021)

Autoionisaatio tarkoittaa kahden molekyylin välistä reaktiota, jossa syntyy ioneja. Veden autoionisaatiossa kaksi vesi molekyyliä reagoi muodostaen positiivisen hydroksiumionin ja negatiivisen hydroksidi-ionin. Elektrolyysissä positiivisesti varautuneet hydroksiumionit liikkuvat negatiivisesti varautuneelle katodille ja pelkistyvät vetymolekyyleiksi vapauttaen samalla vesimolekyylejä. Samalla negatiiviset hydroksidi-ionit liikkuvat positiivisesti varatulle anodille ja hapettuvat happimolekyyleiksi. (Platzer et al. 2021)

Elektrolyysin avulla saadaan tuotettua puhtainta mahdollista vetyä. Elektrolyysillä tuotetun vedyn puhtaus on yli 99 %. Vastaavasti kemiallisilla ja termokemiallisilla menetelmillä päästään parhaimmillaankin vain alle 95 % puhtauteen. (Newborough et al. 2020)

Vedyn eri tuotantotapojen erottelussa on käytössä myös hiilipäästöjä kuvaavat värit harmaa, sininen ja vihreä. Harmaan vedyn tuotanto tuottaa eniten hiilipäästöjä. Sinisen vedyn tuotannossa käytetään hiilidioksidin talteenottoteknologioita (Carbon capture and storage, CCS), joilla syntyneitä hiilipäästöjä pyritään vähentämään. Sinisen vedyn tuotanto ei siis kuitenkaan ole täysin hiilineutraalia. Vihreä vety puolestaan tarkoittaa, että

vety on tuotettu päästöttömästi. Vihreää vetyä saadaan tuotettua ainoastaan sähkökemiallisilla menetelmillä. Vety on siis päästötöntä, kun elektrolyysissä käytetty sähkö on tuotettu uusiutuvasti. Uusiutuvan sähköenergian valitseminen on siis merkityksellistä prosessin päästöjen kannalta. (Laurikko et al. 2020)

Tunnettuja vesielektrolyyseyjä on neljä erilaista alkalinen elektrolyysi, polymeerielektrolyysi, vesihöyryelektrolyysi sekä anioninvaihtomembraani elektrolyysi (Anion Exchange Membrane Electrolysis, AEMEL). Näistä viimeisin on markkinoiden nuorin eikä ole vielä kaupallisesti kypsä teknologia, joten se jätetään tässä tutkielmassa pois tarkemmasta tarkastelusta. (Holland et al. 2024)

3.2 Alkalinen elektrolyysi

Alkalinen elektrolyysi (Alkaline electrolysis, AEL) on yleisesti käytetyin elektrolyysimenetelmä ja sen kennotyyppi on vanhin. Alkalisen elektrolyysikennon suurin etu muihin kennoihin nähden on se, että kennomateriaaleja on runsaasti ja ne ovat edullisia. Materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi terästä tai nikkeliä. Kennon elektrolyytinä käytetään alkalista liuosta. Liuoksena käytetään yleensä kaliumhydroksidin tai natriumhydroksidin vesiliuosta. (Godula-Jopek et al. 2015)

Alkalielektrolyysikennojen käyttölämpötilan on noin 60–80 °C. Kun käyttölämpötilaa nostetaan, Nernstin jännite eli kahden systeemin välinen elektrokemiallinen jännite-ero eli potentiaaliero pienenee. Korkeampi lämpötila aiheuttaa myös suuremman vesihäviön, veden haihtuessa. Kennoissa käytettävä paine on ilmankehän painetta korkeampi noin 3,5 MPa, jotta syntyvän vedyn kuplakoko ja ohmiset häviöt saadaan pidettyä mahdollisimman pieninä (Zeng et al. 2010). Alkalielektrolyysikennon hyötysuhde on noin 63–70 % (Bröckl et al. 2022).

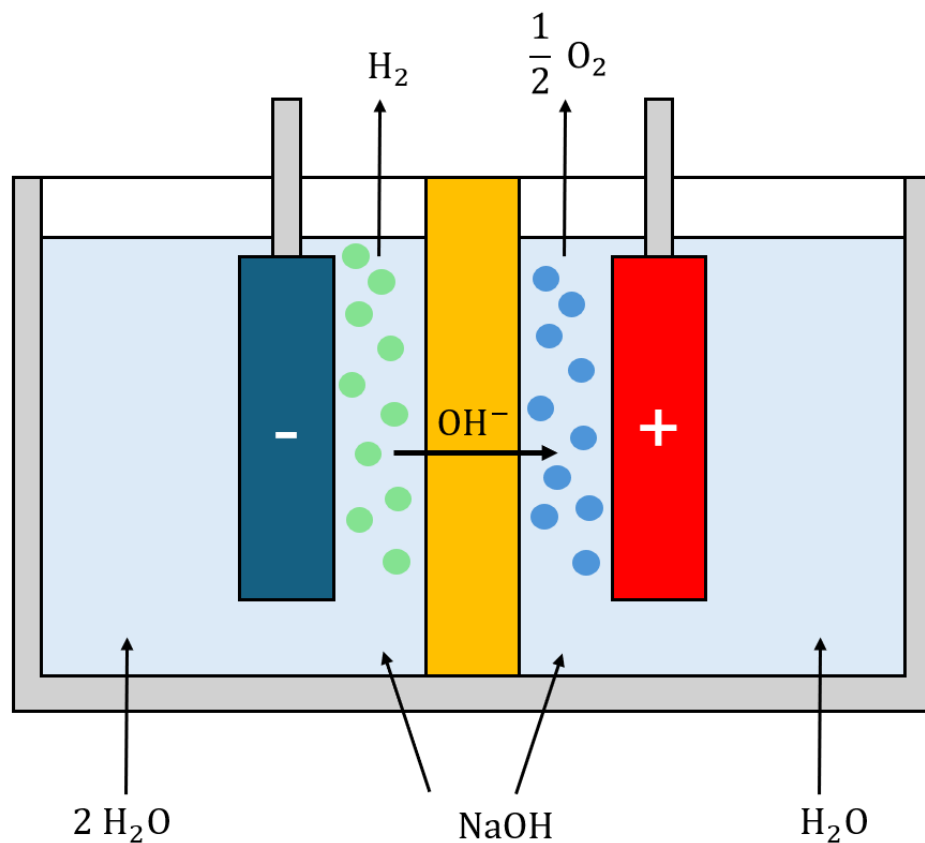
Alkalielektrolyysikennostossa käytettävät materiaalit määrittävät kennoston eliniän. Alkalielektrolyysikennon materiaaleilta edellytetään suuren konsentraation alkalisen elektrolyytin sietokykyä, jotta vältetään materiaalien korroosiolta. (Zeng et al. 2010)

Alkalielektrolyysikennon tuottama kaasun määrä on Faradayn lain mukaisesti suoraan verrattavissa prosessissa käytettyyn sähkövirtaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kun kaksi elektronia siirtyy virtalähteen läpi, syntyy puoli molekyyliä happea ja molekyyli vetyä puolikenno-reaktioiden 2 ja 3 mukaisesti. (Gandia et al. 2013)





Alkalielektrolyysikennon poikkileikkaus nähdään kuvasta 4. Kuvassa positiivisella anodilla tapahtuu reaktio 2 ja negatiivisella katodilla reaktio 3. Keskellä oleva kalvo on yleensä huokoinen ja elektrolyyteillä kyllästetty ja sen tarkoitus on estää vedyn ja hapen muuntautumista takaisin vedeksi. (Gandia et al. 2013) Puolikennoreaktioista nähdään myös, että vain vettä kuluu prosessissa, joten vettä tulee tuoda prosessiin lisää, jotta elektrolyytin konsentraatio säilyy optimina (Demirci Sankir et al. 2017).



Kuva 4: Alkalisen elektrolyysikennon poikkileikkaus. Perustuu lähteeseen (Gandia et al. 2013).

Alkalisella elektrolyysillä tuotettu vetykaasu on yli 99,5 % puhdasta vetyä ja sen tuotantopeus on $42 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. Kennotyyppi tuottaa siis vetyä sellaisella tasolla, että sen käyttäminen kaupallisesti on kannattavaa. (Zeng et al. 2010) Toisaalta alkalielektrolyysikennon vaatii huomattavan määrän sähköenergiaa toimiakseen. Tämän takia elektrolyyttisesti tuotettu vety on taloudellisesti kilpailukykyinen vain, jos sähköenergia on helposti saatavilla ja halvempaa kuin fossiiliset polttoaineet. (Godula-Jopek et al. 2015)

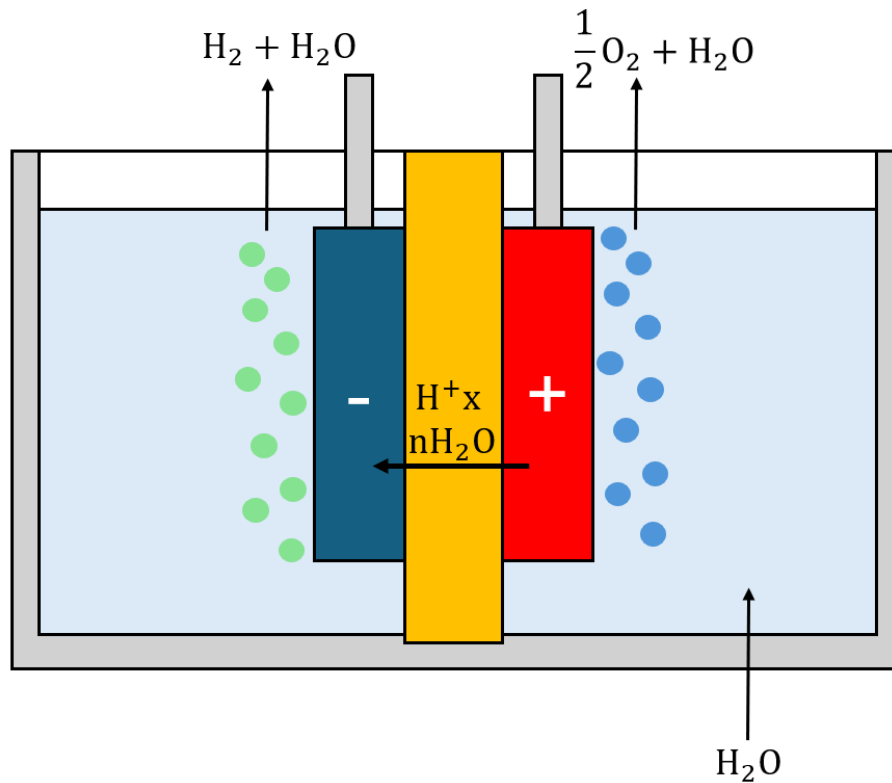
3.3 Polymeerielektrolyysi

Polymeerielektrolyysi (Proton Exchange Membrane Electrolysis, PEMEL) on toinen tällä hetkellä käytössä oleva vedyn valmistuksen elektrolyysitekniikka. Alkalisesta elektrolyysistä poiketen polymeerielektrolyysissä ei ole nestemäistä elektrolyyttiliuosta. Siinä elektrolyyttinä toimii ohut noin 50–250 mikrometriä paksu protoneja johtava kiinteä protoninvaihtokalvo. Kalvon tehtävänä kennossa on kuljettaa varauksia ja erottaa elektrolyysissä syntyneet tuotteet, happi ja vety, toisistaan, jotta niiden välinen spontaani eksoterminen reaktio takaisin vedeksi estyy. Ohut kiinteä elektrolyysikalvo tekee kennosta kompaktin verrattuna alkaliseen elektrolyysikennoon. (Godula-Jopek et al. 2015)

Polymeerielektrolyysissä positiiviset vetyionit liikkuvat kalvon läpi anodilta katodille. Myös negatiiviset elektronit kulkeutuvat katodille ulkoista reittiä pitkin ja muodostavat yhdessä vetyionien kanssa vetykaasua. Kennolla tapahtuvat puolikennoreaktiot 4 ja 5. (Gandia et al. 2013)



Polymeerikennon poikkileikkaus nähdään kuvasta 5. Kuvassa positiivisella anodilla tapahtuu reaktio 4 ja negatiivisella katodilla reaktio 5 (Gandia et al. 2013).



Kuva 5: Polymeerielektrolyysikennon poikkileikkaus. Perustuu lähteeseen (Gandia et al. 2013).

Polymeerielektrolyysikennon protoninvaihtokalvo on hapan sen läpi kulkevien protonien takia. Tästä syystä kalvo on korrosoiva, mikä tulee huomioida reaktiossa käytettävien materiaalien valinnassa. (Godula-Jopek et al. 2015) Reaktiossa voidaan käyttää happamuutta kestäviä jalometalleja, joista anodilla esimerkiksi iridiumia ja katodilla esimerkiksi platinaa (Buttler et al. 2018).

3.4 Vesihöyryelektrolyysi

Veden elektrolyysi voidaan tehdä matalassa tai korkeassa lämpötilassa. Korkeassa lämpötilassa vettä käsitellään höyrynä. Vesihöyryelektrolyysiä kutsutaankin myös korkean lämpötilan elektrolyysiksi (High-Temperature Steam Electrolysis, HTSEL) ja sen reaktiolämpötila on 650–1000 celsiusastetta. (Bröckl et al. 2022).

Suurin etu vesihöyryelektrolyysissä on se, että höyryn hajottamiseen tarvitaan vähemmän energiaa kuin nestemäisen veden hajottamiseen. Osa hajottamiseen tarvittavasta sähköenergiasta saadaan korkeassa lämpötilassa korvattua lämmöllä, mikä parantaa

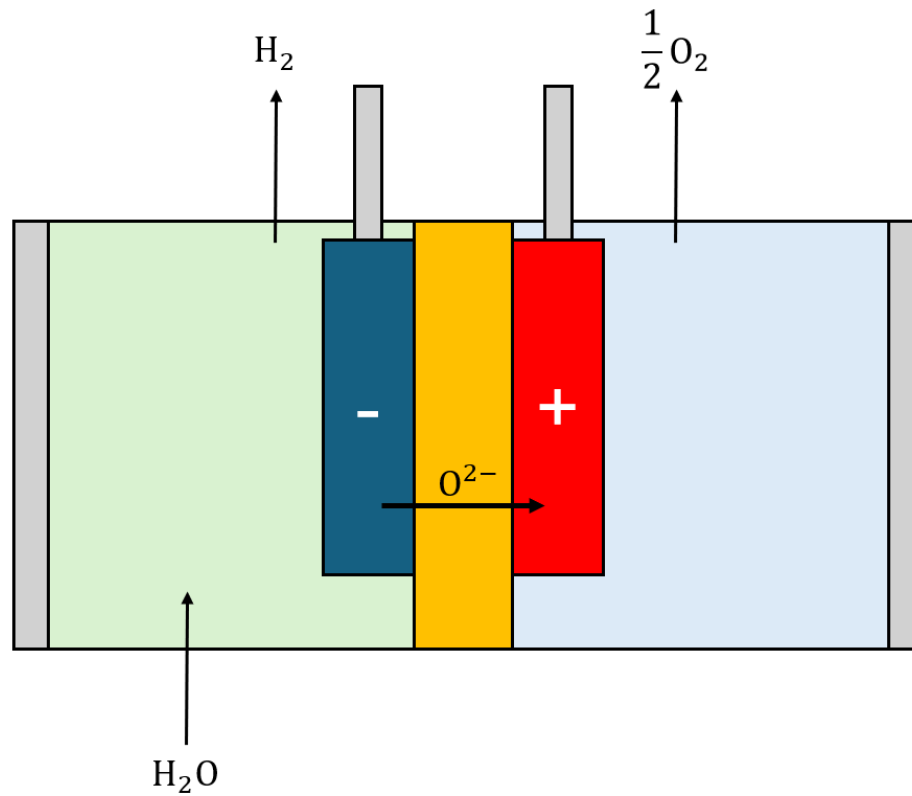
prosessin tehokkuutta ja vähentää vedyn tuotannon kustannuksia. Kenno tulee kuitenkin korkean lämpötilan vuoksi valmistaa korkeita lämpötiloja kestävästä keraameista. (Motazed et al. 2021) Vesihöyryelektrolyysi uudempi teknologia kuin alkalinen elektrolyysi tai polymeerielektrolyysi ja vaatiikin vielä kehitystyötä (Godula-Jopek et al. 2015).

Tutkituin vesihöyryelektrolyysin kennotyyppi on kiinteä oksidielektrolyysikenno (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC). Kiinteä oksidielektrolyysikenno koostuu kolmesta keraamisesta kerroksesta, joita ovat kiinteä elektrolyyttikalvo ja kaksi huokoista elektrodiä, joissa vedyn ja hapen tuotanto tapahtuvat. (Godula-Jopek et al. 2015) Kiinteä elektrolyytti on materiaaliltaan zirkoniumoksidia (Bröckl et al. 2022). Kennostossa kennojen kerrosten välissä on myös sähköenergiaa johtavia kappaleita, jotka varmistavat nesteen jakautumisen jokaiseen kennoon ja toimivat erottimina anodin ja katodin välillä. (Godula-Jopek et al. 2015)

Kiinteässä oksidielektrolyysikennossa elektrolyysin periaate pysyy samana, vaikka prosessiin menevän veden olomuoto onkin kaasumainen. Vesi hajoaa kiinteässä elektrolyysikennossa puolikennoreaktioiden 6 ja 7 mukaisesti (Gandia et al. 2013).



Kiinteän oksidielektrolyysikennon poikkileikkaus nähdään kuvasta 6. Kuvassa positiivisella anodilla tapahtuu reaktio 6 ja negatiivisella katodilla reaktio 7 (Gandia et al. 2013).



Kuva 6: Kiinteä oksidielektrolyysikennon poikkileikkaus. Perustuu lähteeseen (Gandia et al. 2013).

Vesihöyryelektrolyysi toimii erityisen hyvin alueilla, joissa lämpöä on saatavilla helposti ja edullisesti. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi ydinvoimaloiden lähialueet. Myös itse elektrolyysissä syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää uudestaan prosessissa. (Gandia et al. 2013)

4. ELEKTROLYYSIMENETELMIEN VERTAILU

Tutkittavat elektrolyysimenetelmiä ovat siis alkalielektrolyysi, polymeerielektrolyysi ja kiinteä oksidielektrolyysi. Kaikki nämä kolme menetelmää ovat toimintaperiaatteiltaan melko samanlaisia. Kuitenkin menetelmiin käytettävät materiaalit, menetelmien erikoisominaisuudet sekä rakenteet eroavat toisistaan. (Gandia et al. 2013)

4.1 Elektrolyysimenetelmien materiaalit

Vedyn tuotanto hyödyntäen sähkökemiallisia menetelmiä vaatii erilaisia materiaaleja. Tarvittavat materiaalit riippuvat siitä, mitä elektrolyysimenetelmää vedyn valmistamiseen käytetään. Menetelmissä erityisesti lämpötila sekä paine on otettava huomioon materiaaleja valittaessa. (Bröckl et al. 2022)

Alkalinen elektrolyysi tapahtuu 60–80 celsiusasteen lämpötilassa ja käyttöpaineena on 1–30 baria. Materiaalia tässä tapauksessa eniten rajoittaa käytettävä paine. (Bröckl et al. 2022) Alkalielektrolyysiin tarvitaan nikkeliöidystä teräksestä valmistettu kenno, jossa erottavana kalvona toimii huokoinen kalvo (Gandia et al. 2013).

Polymeerielektrolyysi puolestaan tapahtuu 50–80 celsiusasteen lämpötilassa ja käyttöpaine on 30–80 bar. Tässä tapauksessa materiaalin valintaan vaikuttaa paine vielä enemmän kuin alkalisessa elektrolyysissä. (Bröckl et al. 2022) Tämän lisäksi reaktiossa käytettävien materiaalien on kestettävä happamuutta (Godula-Jopek et al. 2015). Polymeerielektrolyysi tapahtuu ruostumattomasta teräksestä valmistetussa kennossa ja nimelle ominaisesti erottavana kalvona käytetään polymeerikalvoa eli synteettistä kumia ja elektrodit ovat platinaa ja iridiumoksidia (Buttler et al. 2018, Gandia et al. 2013).

Kiinteä oksidielektrolyysi tapahtuu ilmanpaineessa ja 650–1000 celsiusasteen lämpötilassa. Tässä elektrolyysissä materiaalien on siis kestettävä korkeaa lämpötilaa. (Bröckl et al. 2022) Korkea lämpötila aiheuttaa muun muassa korroosiota materiaaleissa pidemmällä aikavälillä. Kiinteä oksidielektrolyysi tarvitsee ruostumattomasta teräksestä valmistetun kennon ja erottavana kalvona toimii keraaminen kalvo. (Gandia et al. 2013) Taulukko 1 esittelee vielä tarkemmin eri elektrolyysimenetelmien materiaalit.

Taulukko 1. Elektrolyysimenetelmissä käytettävät materiaalit (Gandia et al. 2013, Bröckl et al. 2022)

	Alkalielektrolyysi	Polymeerielektrolyysi	Kiinteä oksidielektrolyysi
Kenno	Nikkelöity teräs	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs
Elektrolyytti	NaOH ja KOH vesiliuos	PFSA-membraani	Yttriumoksidistabiloitu zirkoniumoksidi
Elektrodi	Nikkelipinnoitettu rei'itetty teräs	Platina ja iridiumoksidi	Perovskiittityyppinen LSCF ja nikkeli
Kalvo	Huokoinen	Synteettinen kumi	Keraaminen

4.2 Vedyn puhtaus, hyötysuhteet sekä käyttökohteet

Elektrolyysimenetelmiä voidaan vertailla esimerkiksi tuotetun vedyn puhtausasteen, höytysuhteen sekä menetelmien käyttökohteiden avulla. Puhtausaste on jokaisella menetelmällä hieman erilainen. Alkalielektrolyysillä tuotetun vedyn puhtausaste on yleensä noin 99,5–99,9 % ja polymeerielektrolyysillä puolestaan päästään jopa 99,999 % puhtausasteeseen. Kiinteä oksidielektrolyysi on vielä tutkimusasteella ja siksi sille ei osata sanoa tarkkaa puhtausastetta. Puhtausasteen uskotaan kuitenkin olevan samaa luokkaa alkalielektrolyysin ja polymeerielektrolyysin kanssa. (Gandia, et al. 2013) Näistä puhtausasteista huomataan, että riippumatta mitä elektrolyysimenetelmää käytetään, elektrolyysillä tuotettu vety on varsin puhdasta.

Alkalielektrolyysin höytysuhde on 63–70 %, polymeerielektrolyysin hyötysuhde on 56–60 % ja kiinteän oksidielektrolyysin höytysuhde on jopa 74–81 % (Bröckl et al. 2022). Kiinteässä oksidielektrolyysissä päästään parhaaseen hyötysuhteeseen, koska reaktiossa syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää uudestaan prosessissa (Gandia et al. 2013).

Alkalielektrolyysi on yleisimmin käytetty ja se soveltuu laajasti eri käyttökohteisiin, mukaan lukien suuriin laitoksiin. Polymeerielektrolyysi sopii nykyisin lähinnä pienempiin laitoksiin. Polymeerielektrolyysin kehityksessä on kuitenkin tehty merkittävää edistystä ja

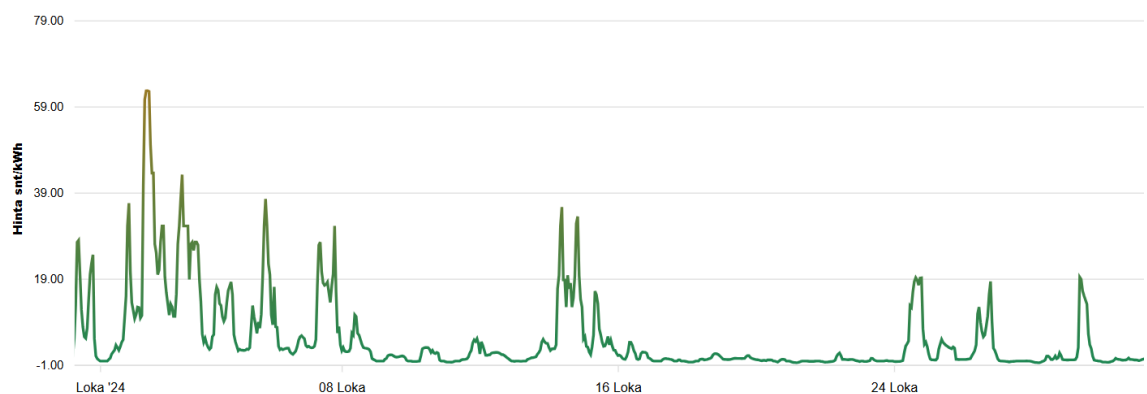
tulevaisuudessa se tulee kilpailemaan alkalielektrolyysin kanssa myös suuremmissa vedyn tuotantomäärissä. Koska höyryelektrolyysi on vielä kehitysvaiheessa, ei ole tarkkaa tietoa mihin käyttötarkoituksiin se soveltuu parhaiten. (Gandia et al. 2013) Sen kuitenkin odotetaan soveltuvan parhaiten ydinvoimaloiden yhteyteen, missä se voisi hyötyä käyttäen voimalan lämpöä omaan prosessiinsa (Tulkki 2020).

4.3 Menetelmien taloudellisuus

Taloudellisuus on ominaisuus, joka vaikuttaa merkittävästi valintoihin. Siksi vedyn tuotantotapojen taloudellisuus vaikuttaa suoraan niiden menestymiseen markkinoilla. Jotta elektrolyysiin perustuvilla menetelmillä voidaan tulevaisuudessa tuottaa puhdasta vetyä, tulee elektrolyysin kustannusten olla kilpailukykyisiä vanhempien teknologioiden kustannusten kanssa.

Teknologioiden kustannukset syntyvät laitteiston valmistuksesta ja käytöstä. Elektrolyysissä hintaan vaikuttaa siis merkittävästi käytetyn sähkön hinta. Sähkön hinta koostuu sähköenergian hinnasta, sen siirron hinnasta sekä arvonlisä- ja sähköverosta. Hintaan vaikuttaa myös sähkön kysyntä ja tarjonta. (Energiateollisuus 2024b)

Kuvassa 7 nähdään sähkön hinnan vaihtelua lokakuussa 2024. Kuvasta huomataan, että hinta vaihtelee merkittävästi. Elektrolyyseriä käytettäessä on siis hyvä pohtia, kannattaako prosessia pitää käynnissä koko ajan vai olisiko prosessi hyvä ajaa alas sähkön hinnan ollessa korkea. Elektrolyyseriä voitaisiin siis käyttää esimerkiksi vain tuotantopii-kin aikaan, jolloin sähköä on saatavilla ylimäärin.



Kuva 7: Sähkön hinta lokakuussa 2024 (Sahkoa 2024)

Kiinteään oksidielektrolyysiin tarvitaan vähemmän sähköenergiaa, kuin muihin elektrolyysein, sillä osa sähköenergiasta korvataan lämmöllä (Motazed et al. 2021). Sähköenergian korvaaminen lämmöllä voi kuitenkin kasvattaa kennon kokoa, mikä puolestaan

ei ole taloudellisesti järkevää. Tästä syystä pelkkää sähkön hintaa tutkimalla ei saada tehtyä kattavaa vertailua elektrolyysiteknologioiden taloudellisuudesta vaan huomioon tulee ottaa koko elinkaaren aikana syntyvät kustannukset. (Buttler et al. 2018)

Elektrolyysin hintaan vaikuttavat myös elektrolyysikennoston investointikulut eli kustannukset, jotka syntyvät kennostoa valmistettaessa. Matalimmat investointikustannukset ovat alkalisella elektrolyysikennolla, sillä kennostossa voidaan käyttää edullisia materiaaleja. Polymeerielektrolyysikennon kustannuksia nostavia tekijöitä ovat kennostossa käytettävät kalliit jalometallikatalyytit, polymeerielektrolyytti ja muut kennon komponentit sekä kennon valmistuksen vaatimat kehittyneet mekaaniset työkalut. (Godula-Jopek et al. 2015) Taloudellisuuteen vaikuttaa myös laitteiston elinaika, sillä se kertoo, kuinka kauan koko laitteiston investointikustannuksesta hyödytään. Alkalielektrolyysin elinaika on 60 000–90 000 tunti aja polymeerielektrolyysin 30 000–90 000 tuntia. Alkalielektrolyysin elinaika on pidempi kuin polymeerielektrolyysin, sillä polymeerielektrolyysin materiaalit joutuvat kestäämään enemmän happamuutta, mitä vaikuttaa materiaalien keston. (Bröckl et al. 2022)

Kiinteän oksidielektrolyysin kustannuksia kasvattaa materiaaliteknisesti vaikeiden materiaalien tarve. Materiaalien tulee kestää todella korkeita lämpötiloja. Erityisesti pidemmällä aikavälillä materiaalit kärsivät muun muassa korroosiosta. Tämän menetelmän osalta pitäisi osata päätyä kompromissiin tehokkuuden ja laitteiston elinajan välillä. Tehokas prosessi vaatii kalliita materiaaleja, mutta lyhyempi laitteiston elinaika tarkoittaa koko laitteiston investointi kulujen uusiutumista lyhyemmällä aikavälillä. (Gandia et al. 2013)

4.4 Tulokset ja päätelmät

Eri elektrolyysimenetelmät soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin, niiden kustannukset sekä hyötysuhde ja laitteiston elinaika ovat erilaiset. Nämä kaikki asiat on hyvä ottaa huomioon elektrolyysimenetelmää valitessa. Kun elektrolyysimenetelmien erilaiset ominaisuudet tunnetaan, voidaan niiden tulevaisuutta ja käyttöönoton kannattavuutta arvioida. Taulukoon 2 on koottu elektrolyysimenetelmien nykyhetken ominaisuudet.

Taulukko 2: Sähkökemiallisten menetelmien nykyhetken vertailua. (Bröckl et al. 2022)

	Alkalielektrolyysi	Polymeerielektrolyysi	Kiinteä oksidielektrolyysi
Hyötysuhde (%)	63–70	56–60	74–81
Puhtaus (%)	99,5–99,9	99,999	~ 99
Laitteen elinaika (h)	60 000–90 000	30 000–90 000	10 000–30 000
Hinta (USD/kW _e)	500–1400	1100–1800	2800–5600

Alkalielektrolyysi on halpa juuri materiaalien edullisuuden vuoksi. Se kuitenkin käyttää huomattavan suuren määrän energiaa toimiakseen. Polymeerielektrolyysin käyttämät materiaalit ovat kalliita korkean paineen ja elektrolyytin happamuuden takia. Höryelektrolyysiin käytettävät materiaalit eivät ole yhtä halpoja kuin alkalielektrolyysissä tai yhtä kalliita kuin polymeerielektrolyysissä. Höryelektrolyysissä osa energiatarpeesta voidaan myös korvata aikaisemmin mainitusti lämmöllä. Höryelektrolyysi on kuitenkin vasta tutkimusvaiheessa ja sen laitteiston elinaika on nykyisellä tekniikalla muihin menetelmiin verrattuna lyhyt. Näistä kolmesta menetelmästä alkalielektrolyysi on siis tällä hetkellä kannattavin.

Energian varastointi vetyyn on kannattavaa vain, jos vedyn kuljetusverkosto toimii hyvin. Vaikka alkalielektrolyysi onkin kaupallisesti kypsä ja sillä saadaan tuotettua todella puhdasta vetyä, vedyn tuotanto on turhaa, jos sen kuljetusmahdollisuudet ovat huonot. Jotta vedyn tuotannosta saadaan hyötyä ja voidaan siirtyä kohti vihreää vetytaloutta, tarvitaan toimiva ja kattava vetyverkosto. Tällä hetkellä vetyverkosta on vasta kehitysvaiheessa. Gasgridillä on kuitenkin useita hankkeita vetyverkoston kehittämiseksi. Näiden hankkeiden olisi määrä valmistua vuoteen 2030 mennessä eli tulevaisuudessa olisi mahdollista saada vety luontaiseksi osaksi energiajärjestelmää,

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Maapallon populaation kasvaessa myös energian tarve on kasvanut. Samaan aikaan pyrimme eroon fossiilisista polttoaineista siirtymällä käyttämään uusiutuvia energiantuotanto tapoja. Nämä uusiutuvat energiantuotantotavat tekevät tuotettavan energian määrän arvioimisesta hankalaa ja siten energian varastoimisen merkitys on kasvanut entisestään. Yksi tulevaisuuden tavoista tulee olemaan energian varastoiminen vetyyn. Erityisesti vihreän vedyn valmistus tulee nousemaan avainasemaan, sillä se ei koko elinkaarensa aikana tuota ollenkaan hiilidioksidipäästöjä. Vihreällä vedyllä tulee siis olemaan keskeinen asema energiamurroksessa.

Vihreää vetyä voidaan tuottaa sähkökemiallisen elektrolyysin avulla uusiutuvasta sähköenergiasta. Tunnettuja elektrolyysimenetelmiä on neljä: alkalielektrolyysi, polymeerielektrolyysi, vesihöyryelektrolyysin, jonka tyypeistä kiinteä oksidielektrolyysi on tunnetuin sekä uusin ja kaupallisesti vielä epäkypsä anioninvaihtomembraani elektrolyysi. Elektrolyysimenetelmät poikkeavat toisistaan käyttölämpötilan, -paineen ja elektrolyytin pH:n sekä menetelmissä käytettävien materiaalien osalta. Eri elektrolyysimenetelmät soveltuvat myös erilaisiin käyttökohteisiin. Elektrolyysimenetelmien erilaiset ominaisuudet aiheuttavat eroja tuotetun vedyn puhtauteen, prosessin hyötysuhteeseen sekä kustannuksiin.

Kaikki elektrolyysimenetelmistä vaativat paljon sähköenergiaa. Kiinteä oksidielektrolyysissä osa energiasta voidaan kuitenkin korvata myös lämmöllä, mikä vähentää tämän menetelmän vaatimaa sähköenergian määrää. Elektrolyysin kustannuksiin vaikuttaakin käytettävän sähkön hinta. Kuitenkin mikäli elektrolyysi on kytkettynä suoraan sähköenergian tuotantolaitokseen, voidaan vetyä pyrkiä tuottamaan vain silloin kun on huomattavissa sähkön tuotantopiikki.

Tällä hetkellä elektrolyysijärjestelmistä käytetyin ja tunnetuin on alkalielektrolyysi, joka soveltuu laajasti eri käyttötarkoituksiin. Nykyisin polymeerielektrolyysi soveltuu parhaiten vain pienempien vetymäärien tuotantoon kalliiden materiaaliensa vuoksi. Kuitenkin myös polymeerielektrolyysin uskotaan kilpailevan tulevaisuudessa alkalielektrolyysin kanssa myös suurempien vedyn tuotantomäärien kohdalla. Kiinteä oksidielektrolyysi on edelleen kehitystyön tarpeessa. Sen suurin haaste on materiaalien korroosio korkean lämpötilan vuoksi. Kun tästä haasteesta päästään eroon myös se on lupaava tapa tuottaa vetyä erityisesti yhdistettynä hukkalämpöä tuottaviin laitoksiin.

Vedyn saaminen luontaiseksi osaksi energiajärjestelmää vaatii kuitenkin vielä töitä erityisesti vedyn kuljetusverkoston osalta. Tällä hetkellä Gasgridillä on useita hankkeita vetyverkoston kehittämiseksi ja niiden on määrä valmistua vuoteen 2030 mennessä. Toimivan infrastruktuurin valmistuttua vety voi toimia ratkaisuna esimerkiksi uusiutuvan energian varastointiin.

LÄHTEET

- AFRY. (2022). Vedyn varastointi. Saatavissa: https://afry.com/sites/default/files/2022-04/4_vetyesitys_jsii_11.3.2022.pdf. [11.11.2024].
- ANDERSSON, J. & GRÖNKVIST, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy* 44 (23). 11901-11919.
- BASILE, A., SUBMANI, V. & VERIROGLU, T. N. (2015). Compendium of hydrogen energy. Volume 1, Hydrogen production and purification. MA: Elsevier, Boston. 551 s.
- BRÖCKL, M., LAUKKANEN, O., LEHTINEN, H., PATRONEN, J., PILPOLA, H., RUISMÄKI, A., SEMKIN, N., SIVILL, L., TAKAMÄKI, S. & VASARA, P. (2022). Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvosto. 234 s.
- BUTTLER, A. & SPLIETHOFF, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-togas and power-to-liquids: A review. *Renewable & sustainable energy reviews* 2 (82). 2440-2454.
- DEMIRCI SANKIR, N. & SANKIR, M. (2017). Hydrogen production technologies. Beverly, Massachusetts; Hoboken, New Jersey: Scrivener Publishing: Wiley. 632 s.
- DINCER, I & EZAN, M.A. (2018). Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems. Cham: Springer International Publishing. 329 s.
- ENERGIATEOLLISUUS. (2024a). Energiatietoa. energian tuotanto, sähköntuotanto. Saatavissa: <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/> [11.11.2024].
- ENERGIATEOLLISUUS. (2024b). Sähkön hinta. Saatavissa: <https://energia.fi/energiatietoa/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon-hinta/>. [13.11.2024].
- FINGRID. (2024). Sähkömarkkinat. Sähköjärjestelmien tila. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/>. [11.11.2024].
- GANDIA, L. M., ARZAMENDI, G. & DIEGUEZ, P. M. (2013). Renewable hydrogen technologies production, purification, storage, applications and safety. Amsterdam: Elsevier. 460 s.
- GASGRID. (2024). Saatavissa: <https://gasgrid.fi/hankkeet/nordic-hydrogen-route/>. [11.11.2024].

GODULA-JOPEK, A. & STOLTEN, D. (2015). Hydrogen Production: By Electrolysis. John Wiley & Sons, Incorporated, Berlin. 403 s.

HOLLAND, A. & IDRISOR, C. (2024). Green Hydrogen Production & Electrolyzer Market 2024-2034: Technologies, Players, Forecasts. Saatavissa: <https://www.idtechex.com/en/research-report/green-hydrogen-production-and-electrolyzer-market-2024-2034-technologies-players-forecasts/992>. [4.12.2024].

LAURIKKO, J., IHONEN, J., KIVIAHO, J., HIMANEN, O., WEISS, R., SAARINEN, V., KÄRKI, J. and HURSKAINEN, M., (2020). National Hydrogen Roadmap for Finland. TEKES. 48 s.

MOTAZEDI K., SALKUYEH Y. K., LAURENZI I. J., MACLEAN, H.L. & BERGERSON J. A. (2021). Economic and environmental competitiveness of high temperature electrolysis for hydrogen production. International journal of hydrogen energy 46 (41). 21274-21288.

NEWBOROUGH, M. & COOLEY, G., (2020). Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. Fuel cells bulletin 2020 (11). 16-22.

OECD/NEA. (2021). Climate Change: Assessment of the Vulnerability of Nuclear Power Plants and Approaches for their Adaptation, Nuclear Development. OECD Publishing, Paris. 160 s.

PLATZER, M F & SARIGUL-KLIJN, N. (2021). The Green Energy Ship Concept: Renewable Energy from Wind over Water. Cham, Switzerland: Springer. 106 s.

RUFER, A. (2018). Energy storage: systems and components. Boca Raton: CRC Press. 278 s.

SAHKOA. (2024). Sähkön hinta vuonna 2024. Saatavissa: <https://www.sahkoa.io/stats.php>. [13.11.2024].

SINGH, R., SINGH, M. & GAUTAM, S., (2020). Hydrogen economy, energy, and liquid organic carriers for its mobility. Materials Today: Proceedings 46. 5420-5427.

SRINIVASAN, S. & STEFANAKOS, E. (2019). Clean Energy and Fuel (Hydrogen) Storage. MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 278 s.

STADLER, I & STERNER, M. (2019). Handbook of Energy Storage Demand, Technologies, Integration. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: Imprint: Springer. 829 s.

TULKKI, V. (2020). Vetyä ydinenergialla. Saatavissa: <https://fissioreaktori.wordpress.com/2020/11/08/vetya-ydinenergialla/> .[2.12.2024].

WIDERA, B. (2020). Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal science and engineering progress* 16. 100460.

ZENG, K & ZHANG, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in energy and combustion science* 36(3). 307-326.