

Vedyntuotannon mallintaminen ja laboratoriomittakaavan pilotointi

"Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa" -hanke

Työpaketti 3

Tämä raportti on laadittu osana Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa -hanketta (lyhenne VEP) työpaketin 3 tulosten pohjalta. Hanketta ovat rahoittaneet Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), Etelä-Pohjanmaan liitto, Etelä-Pohjanmaan Korkeakoulusäätiö, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Vaasan yliopisto ja Tampereen korkeakoulusäätiö sr.



ETELÄ-POHJANMAAN
liitto



Euroopan unionin
osarahoittama

SEAMK

Seinäjoen ammattikorkeakoulu
Seinäjoki University of Applied Sciences



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VÅASA

Sisällys

Johdanto	4
Veden elektrolyysi.....	5
AEM-elektrolyysi.....	5
Aurinkopaneelit	6
Keskittävät aurinkokennot	7
Mittausten suorittaminen	9
Vedyn tuotanto	9
CPV-moduuli	10
Tulokset	11
AEM-elektrolyyseri	11
CPV-moduuli	12
Kustannuslaskenta.....	12
Yhteenveto.....	15
Lähteet:.....	16

Johdanto

Tällä hetkellä yli 80 % kaikesta tarvittavasta energiasta tuotetaan fossiilisista polttoaineista, joiden käytöstä syntyy ympäristölle haitallisia päästöjä. Fossiilisten polttoaineiden määrä on rajallinen, ja esimerkiksi nykyisten maakaasuvarastojen on arvioitu riittävän korkeintaan 60 vuotta nykyisellä kulutuksella. Näistä syistä johtuen tarve korvaaville energialähteille ja polttoaineille on suuri. [1]

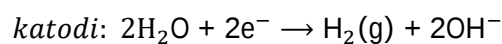
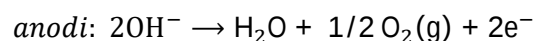
Vety on houkutteleva vaihtoehto fossiilisille polttoaineille, koska sen energiatiheys painoon nähden on suuri ja sitä voidaan tuottaa uusiutuvalla energialla. Vedyn käyttö ei tuota lainkaan kasvihuonepäästöjä, ja raaka-aineena vaadittavaa vettä on runsaasti saatavilla. [2] Vetyä voidaan käyttää energiavarastona säästä riippuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, tuotannon tasoittamiseen, ja se on tärkeä raaka-aine kemikaalien, muun muassa ammoniakkin, valmistuksessa. [3]

Lähes kaikki nykyään tarvittava vety tuotetaan fossiilisista polttoaineista, mutta uusiutuvilla energialähteillä tuotetun vihreän vedyn osuus on toistaiseksi hyvin pieni. Yksi potentiaalisimmista vaihtoehtoista vedyn tuottamiseen on elektrolyysi eli veden pilkkominen hapeksi ja vedyksi sähkövirtaa käyttäen. Tässä työssä keskitytään anioninvaihtomembraanielektrolyysiin (engl. anion exchange membrane, AEM), joka yhdistää alkaali- ja protoninvaihtomembraanielektrolyysereiden hyödyt. [4] Veden elektrolyysi voidaan toteuttaa hyödyntäen aurinkosähköä joko perinteisillä levykennoilla tai keskittävillä aurinkokennoilla (engl. concentrating photovoltaics, CPV). Keskittävät kennot mahdollistavat korkeamman hyötysuhteen kuin perinteiset kennot, mutta niiden kustannukset ovat selvästi suuremmat. [5]

Tämä raportti koostuu elektrolyyserin ja keskittävän aurinkokennon käyttöönotosta sekä kustannuslaskennasta. Molempia laitteita testataan erikseen, ja niiden yhteistoimintaa arvioidaan. Raportin tavoitteena on mallintaa vedyn tuotannon kustannuksia esitetyillä teknologioilla, analysoida laitteiden toimintaa ja tuottaa kustannusarvio vedylle.

Veden elektrolyysi

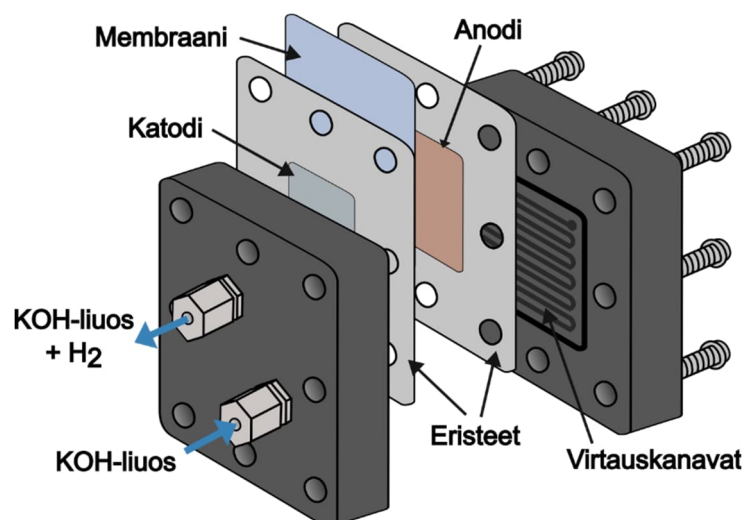
Vedyn tuotanto elektrolyysillä perustuu veden pilkkomiseen sähkövirtaa käyttäen, jolloin saadaan yksinkertaisesti vetyä ja happea. Veden pilkkomisessa käytettävä elektrolyyseri koostuu kahdesta elektrodista (anodi ja katodi) sekä elektrolyytistä, joka voi olla neste tai kiinteä polymeerikalvo. Veden elektrolyysissä veden hajoaminen tapahtuu kahtena osareaktiona anodilla ja katodilla, kunhan elektrodien välillä on riittävän suurin jännite. Nämä osareaktiot riippuvat veden pH:sta ja esimerkiksi emäksisissä olosuhteissa osareaktiot anodilla ja katodilla ovat [6]



Emäksisissä olosuhteissa vety siis syntyy katodilla veden hajotessa ja hydroksidi-ionit kulkeutuvat anodille, jossa puolestaan happi muodostuu. Reaktiotuotteet pidetään erillään toisistaan huokoisella kalvolla eli membraanilla, joka kuitenkin mahdollistaa ionien kulkeutumisen läpi. Veden hajoaminen on endoterminen reaktio. Jotta reaktio voi tapahtua, tarvitaan vähintään 1,23 V jännite. Käytännössä vaadittava jännite on kuitenkin suurempi johtuen esimerkiksi aktivointienergiasta sekä elektrolyysierissä tapahtuvista ohmisista häviöistä. [7]

AEM-elektrolyysi

Anioninvaihtomembraanielektrolyysissä membraanina käytetään polymeerikalvoa, joka toimii samalla elektrolyytinä. Hydroksidi-ionit siirtyvät polymeerimembraanin läpi samalla tavalla kuin perinteisessä alkalielektrolyysissä. Polymeerimembraaneita käytetään hyödyksi myös protoninvaihtomembraanielektrolyyseireissä. AEM-elektrolyysit pyrkivätkin yhdistämään



Kuva 1: Havainnollistava kuva AEM-elektrolyysin rakenteesta.

näiden eri tekniikoiden parhaat puolet. [8] AEM-elektrolyyserin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 1.

Polymeerimembraani on peitetty molemmilta puolilta elektrokatalyyteilla, joissa itse reaktiot tapahtuvat. Ne ovat valmistettu huokoisesta materiaalista, jotta syntyvä kaasu pystyy kulkeutumaan pois kennosta. Katalyytit voidaan kasvattaa suoraan polymeerimembraanin pinnalle tai ne voidaan painaa myöhemmin membraania vasten [9, s. 69]. Katalyyttien jälkeen kennoissa on toinen huokoinen kerros, jota kutsutaan diffuusiokerrokseksi. Diffuusiokerroksen tarkoituksena on myös kuljettaa virta elektrokatalyyttikerrokselle, jossa itse reaktio tapahtuu. Samalla se mahdollistaa reaktiotuotteiden siirtymisen pois elektrokatalyyteilta. Partikkelit painetaan katalyyttikerrosta vasten kahdella metallilevyllä. Levyissä on kapeita virtauskanavia, joita pitkin vesi ja syntyvät kaasut pystyvät kulkemaan. [10]

Johtuen anioninvaihtomembraanielektrolyysin emäksisistä olosuhteista, pystytään materiaaleina usein käyttämään edullisempia vaihtoehtoja, samoin kuin alkaalielektrolyysissä. Vastaavasti elektrolyyserin tiivis rakenne ja kiinteä elektrolyytti vähentävät häviöitä ja mahdollistavat samalla suuremmat virrantiheydet ja tuotantonopeudet. [11] AEM-elektrolyysit ovat tosin vielä kehitysvaiheessa, eikä suuren mittakaavan tuotantoa ole [12].

Aurinkopaneelit

Aurinkokennojen toiminta perustuu valojänniteilmiöön (engl. photovoltaic effect, PV). Ilmiössä sähkömagneettinen säteily aiheuttaa materiaaliin jännite-eron ja täten myös sähkövirran. Käytännössä kaikki ilmiöön perustuvat laitteet, eli aurinkokennot, pohjautuvat puolijohteisiin ja niiden vyöaukkoihin. Sähkömagneettinen säteily, tässä tapauksessa auringon valo, virittää puolijohteessa olevia elektroneja valenssivyöltä johtavuusvyölle synnyttäen elektroni–aukko-pareja. Elektronit ja aukot erkaantuvat sähkökentän avulla, jolloin saadaan aikaiseksi jännite-ero. [13]

Nykyisistä aurinkokennoista suurin osa on juuri yksiliitoskennoja, joissa pohjana käytetään puolijohteita. Yksiliitoskennot kykenevät absorboimaan vain vyöaukkoa isompienergisiä fotoneita. Pienempi vyöaukko siis mahdollistaa sen, että useampi fotoni kykenee virittämään elektroneja, mutta tällöin pienempi osa isompienergisten fotonien energiasta saadaan hyödynnettyä. Fotonin ylimääräinen energia muuttuu lopulta aurinkopaneelissa lämmöksi, eikä sitä täten saada käyttöön. Jotta auringon säteilystä saadaan mahdollisimman suuri osa hyödynnettyä,

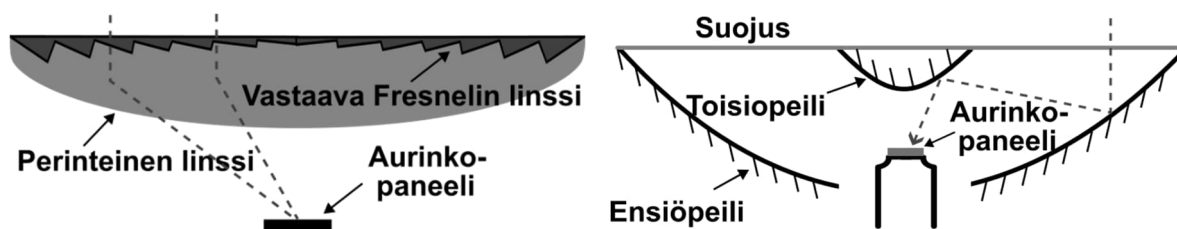
puolijohteen energiaraon olisi hyvä olla noin 1,39 eV. Yksiliitoskennoilla teoreettinen raja hyötysuhteelle on noin 30–32 %. [14]

Korkeammat hyötysuhteet voidaan saavuttaa moniliitoskennoilla, joissa on useita aurinkokennoja päällekkäin eri vyöaukon energioilla. Yksiliitoskennoihin perustuvat aurinkokennot kykenevät absorboimaan vain osan auringon energiasta, minkä suuruus riippuu käytettävästä puolijohdesta. Moniliitoskennoissa sen sijaan käytetään useampaa puolijohdettä, jolloin syntyy myös useampia pn-liitoksia. Tällöin auringon energiasta pystytään hyödyntämään suurempi osa ja saavutetaan korkeammat hyötysuhteet, mutta vastaavasti valmistuskustannukset nousevat. Teoreettinen maksimi moniliitoskennoille on 86,8 %. [15]

Keskittävät aurinkokennot

Aurinkokennojen materiaaleista johtuvia kustannuksia voidaan pienentää käyttäen keskittäviä aurinkokennoja (engl. concentrating photovoltaics, CPV). Ideana on keskittää auringon säteily aurinkokennolle suuremmalta pinta-alalta, esimerkiksi linssiä käyttäen, jolloin aurinkopaneelin pinta-ala voi olla pienempi ja esimerkiksi arvokkaita puolijohteita vaaditaan vähemmän. [5] Keskittävillä aurinkokennoilla yhdelle kennolle kohdistuva intensiteetti voi olla useita satoja kertaa suurempi kuin tavallisilla levykennoilla [16, s. 13].

Keskittävissä aurinkokennoissa valo voidaan ohjata paneeliin joko linssellä tai peilillä käyttäen. Itse aurinkopaneelien ollessa pieniä muiden asioiden, kuten näiden peilien ja linssien, hinta korostuu. [16, s. 113–114]. Kuvassa 2 on hahmoteltu keskittävien aurinkokennojen ideaa. Linssellä käytettäessä säteily yksinkertaisesti keskitetään aurinkokennolle kuperaalla tai Fresnelin linssillä. Fresnelin linssi koostuu yhtenäisen pinnan sijaan useasta rengasmaisesta segmentistä, joista jokainen taittaa säteilyä eri kulmassa [17, s. 206]. Vastaavasti peilillä käytettäessä auringon säteily heijastetaan ensin aurinkopaneelin ympäriltä sen yläpuolelle, josta säteily heijastetaan toisiopieilillä suoraan paneelille [16, s. 116].



Kuva 2: Keskittävän aurinkokennon rakenne peilillä tai linssillä hyödyntäessä. Kuvat mukailtu lähteistä [40, s. 193] ja [39, s. 119].

Keskittävissä aurinkokennoissa voidaan käyttää perinteistä yksi- tai moniliitoskennoa. Kuitenkin esimerkiksi perinteinen piipohjainen aurinkokenno kykenee toimimaan tehokkaasti vain noin 300 auringon intensiteetillä, kun vastaavasti moniliitoskennoilla luku voi olla jopa 2000. [16, s. 13] Moniliitoskennojen mahdollistama korkeampi hyötysuhde korostuu korkeammilla intensiteeteillä ja vastaavasti paneelien kustannusten merkitys pienenee, kun materiaalia tarvitaan suhteessa satoja kertoja vähemmän. Näiden hyötyjen lisäksi korkeamman hyötysuhteen ansiosta pienempi osa auringon säteilyenergiasta muuttuu lämmöksi [17, s. 67].

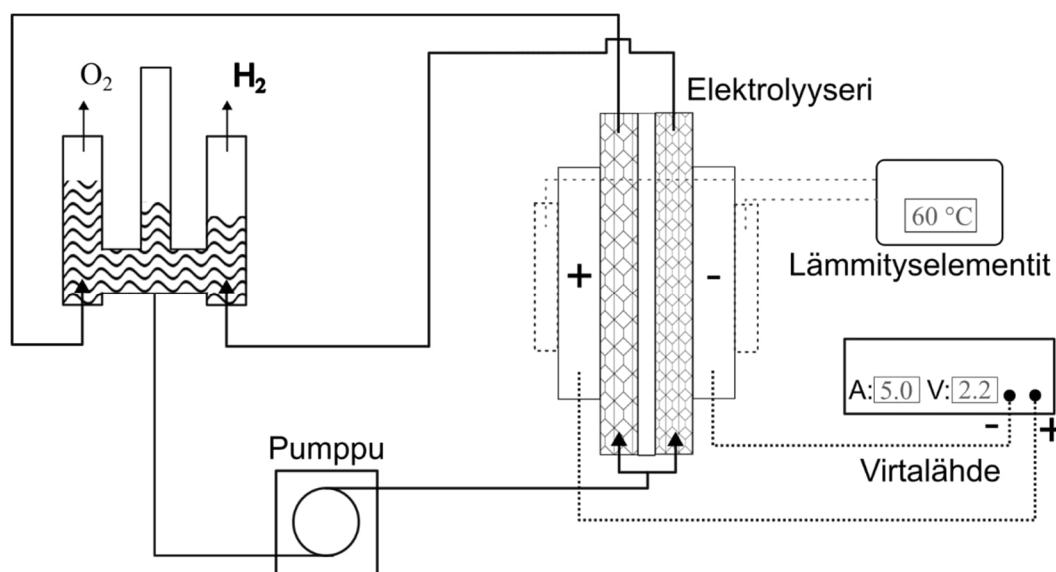
Mittausten suorittaminen

Mittaukset suoritettiin Tampereen yliopiston Fysiikan yksikön Pintatieteen tutkimusryhmän laboratoriossa. Elektrolyysin suorituskykyä ja tehokkuutta mitattiin potentiostaatilla, ja tuotetun vedyn määrän perusteella laskettiin muun muassa hyötysuhde. Keskittävän aurinkokennon toimintaa tutkittiin suoraan auringonvalossa, ja sen tuottamaa tehoa mitattiin säätövastuksella.

Vedyn tuotanto

Vedyn tuottamiseen käytettiin Dioxide Materialsin valmistamaa anioninvaihtomembraanielektrolyyseriä, jonka aktiivinen pinta-ala oli 5 cm². Membraanina toimi Sustainion® 37–50 -polymeerimembraani. Katodina käytettiin NiFeCo-nanopartikkeleilla pinnoitettua nikkelikuitupaperia ja anodina NiFe₂O₄-partikkeleilla pinnoitettua ruostumattomasta teräksestä valmistettua kuitupaperia. Elektrodit olivat suorassa kosketuksessa membraaniin ja virtauskanaviin. Elektrolyysin runko oli nikkelistä valmistettu ja virtajohdot liitettiin suoraan runkoon.

Elektrolyysin toimintaa tutkittiin AutoLab PGSTAT204 -potentiostaatilla, jota ohjattiin NOVA2.1-ohjelmistolla. Suurempien virtojen saavuttamiseksi käytettiin erillistä virranvahvistinta. Mittaukset tehtiin galvanostaattisessa tilassa, jolloin virtaa kontrolloitiin ja jännite mitattiin. Elektrolyysin lämpötilaa säädettiin erillisellä ohjaimella, ja elektrolyytinä käytettiin 1 M KOH-liuosta, jota syötettiin kennolle peristalttisella pumpulla vakionopeudella (3 ml/min). Mittausjärjestelyä on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3: Käytetty mittausjärjestely elektrolyyseriille.

Mittauksissa virtaa vaihdeltiin välillä 0,5–5 A, mikä vastasi virrantiheyksiä 0,1–1 A/cm², ja lämpötilan vaikutusta tutkittiin välillä 45–60 °C. Valmistajan suosittamat käyttöarvot olivat 5 A ja 60 °C. Ennen mittauksia elektrolyyseri lämmitettiin haluttuun lämpötilaan ja annettiin tasaantua noin 30 minuutin ajan. Virta nostettiin hitaasti asetettuun arvoon, ja vedyn tuotantonopeus määritettiin mittaamalla aika, jossa muodostui 50 ml kaasua.

Kaikissa mittauksissa jännitteelle asetettiin yläraja, jonka ylittyessä mittaus keskeytettiin. Kokeiden alussa mitattiin avoimen piirin jännite, ja varsinaisten mittausten kesto oli 35 sekuntia. Virta- ja jännitedata kerättiin NOVA2.1-ohjelmistolla, ja vedyn tuotantonopeus muunnettiin litroiksi tunnissa Matlabia käyttäen. Sekä vedyn että hapen tuotanto mitattiin mahdollisen kaasujen sekoittumisen havaitsemiseksi.

CPV-moduuli

Mittauksissa käytettiin Wince Powerin valmistamaa keskittävän aurinkokennon prototyyppiä. Kenno koostui kuudesta GaInP/GaAs/GaInNAsSb/GaInNAsSb-neliliitoskennopaneelist, joihin auringon säteily keskitettiin Fresnel-linsseillä. Linssien yhteenlaskettu pinta-ala oli noin 260 cm² ja yksittäisten kennojen koko 2 × 2 mm, mikä vastasi noin 320-kertaista valon intensiteettiä verrattuna suoraan auringon säteilyyn. Linssit ja kennot oli kiinnitetty alumiinirunkoon, joka toimi samalla lämmönhallintaelementtinä. Aurinkokennossa oli erilliset virran ja jännitteen ylärajat elektrolyyserin suojaamiseksi. Valmistajan mukaan yksittäisen aurinkopaneelin hyötysuhde oli noin 34 %, mutta optiikan ja elektroniikan aiheuttamien häviöiden vuoksi järjestelmän kokonaishyötysuhde oli noin 23 %.

CPV-kenno on suunniteltu kollimoidulle valolle, minkä vuoksi mittaukset suoritettiin ulkona auringonvalossa syyskuun alussa. Paneeli kiinnitettiin säädettävään jalustaan, jonka avulla sen suuntausta voitiin muuttaa auringon liikkeen mukaan. Aurinkokennosta mitattiin samanaikaisesti virtaa ja jännitettä kahdella yleismittarilla, ja virta–jännite-käyrä määritettiin säätövastusta käyttäen.

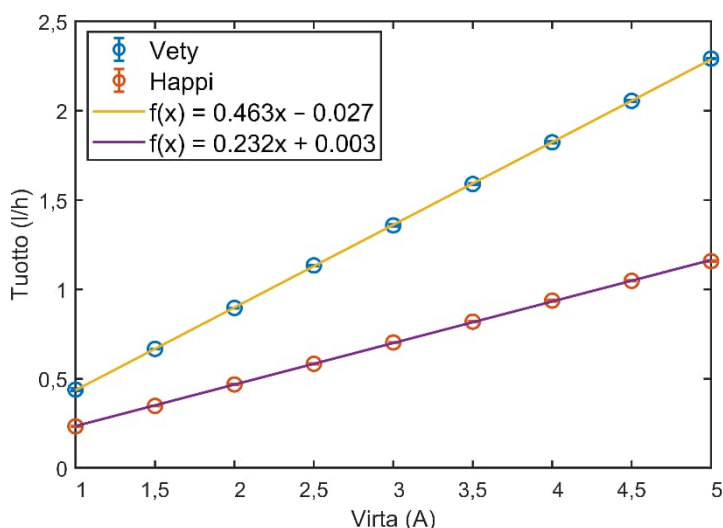
Tulokset

Tässä työpaketissa otettiin käyttöön anioninvaihtomembraanielektrolyseri sekä keskittävä aurinkokenno, ja tutkittiin niiden toimintaa tarkemmin. Elektrolyserin hyötysuhdetta sekä vedyn tuotantonopeutta mitattiin virran eri arvoilla. Keskittävälle aurinkokennolle mitattiin virta–jännitekuvaaja mistä pystyttiin laskemaan kennon tuottama teho ja hyötysuhde. AEM-elektrolyserilla ja CPV-moduulilla tuotetun vedyn hintaa arvioitiin myös suuremmassa mittakaavassa laskemalla opäaoma- ja käyttökustannukset.

AEM-elektrolyseri

Elektrolyserin sähköistä toimintaa tutkittiin mittaamalla jännitteen ja virran suhdetta eri virran arvoilla valmistajan suosittelemassa lämpötilassa (60 °C) ja vakioidulla elektrolyyttivirtauksella. Virtaa vaihdeltiin välillä 1–5 A, ja jokainen mittaus toistettiin kolme kertaa, joista laskettiin keskiarvo. Kuvassa 4 on esitetty tuotetun vedyn ja hapen määrät virran mukaan.

Jännitteen havaittiin kasvavan virran noustessa, mikä johti elektrolyserin tehontarpeen kasvuun. Valmistajan suosittelemalla 5 A:n virralla elektrolyserin keskimääräinen jännite oli noin 2,14 V, jolloin laitteen vaatima keskimääräinen sähköteho oli noin 10,7 W.

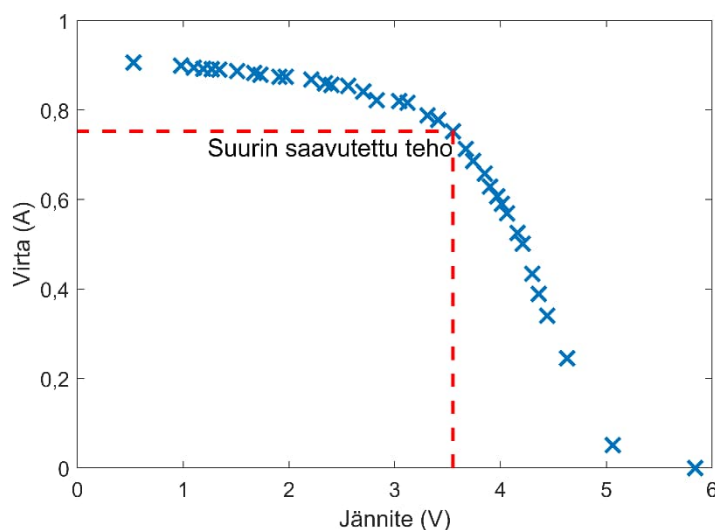


Kuva 4: Veden elektrolyysissä syntyneiden vedyn ja hapen tuotantonopeudet eri virran arvoilla

Elektrolyserin hyötysuhde määritettiin vertaamalla syötettyä sähkötehoa tuotettuun vetyyn sitoutuneeseen energiaan. Vedyn energiatiheudeksi oletettiin 2,935 Wh/l, jolloin mitattu vedyn tuotantonopeus vastasi noin 6,7 W:n kemiallista tehoa. Näin laskettu elektrolyserin hyötysuhde oli noin 63 %. Hyötysuhteen todettiin olevan herkkä elektrolyserin käyttöjännitteelle, minkä pienentäminen parantaisi suoraan järjestelmän suorituskykyä.

CPV-moduuli

Keskittävän aurinkokennon tuottamaa tehoa mitattiin ulkona syyskuun alussa keskipäivällä. Aurinkopaneeli kytkettiin säätövastukseen, jonka avulla määritettiin virta–jännite-käyrä. Mitattu kuvaaja on esitetty kuvassa 5, josta määritettiin myös suurinta tehoa vastaava toimintapiste. Avoimen piirin jännite oli 5,84 V.



Kuva 5: Keskittävän aurinkokennon virta–jännite-kuvaaja. Punaisella on merkitty korkeinta tehoa vastaava pinta-ala.

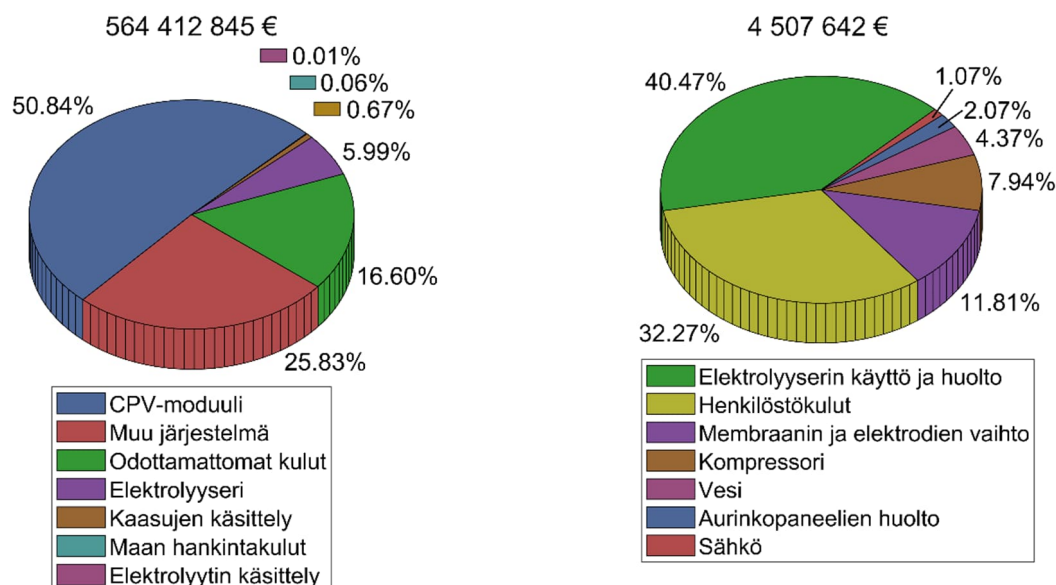
Mitattu maksimiteho oli noin 2,67 W. Aurinkokennon linssien yhteenlaskettu pinta-ala oli noin 260 cm² ja mittaushetkellä auringon säteilyvoimakkuus noin 480 W/m², jolloin kennoille kohdistunut kokonaisteho oli noin 12,5 W. Näiden perusteella CPV-moduulin hyötysuhteeksi saatiin noin 21 %, mikä on myös lähellä valmistajan ilmoittamaa arvoa. Valmistajan mittauksiin verrattuna hieman alhaisempi teho selittyy mittausajankohdan pienemmällä säteilyintensiteetillä.

Kustannuslaskenta

Vedyn tuotantokustannuksien laskennassa hyödynnettiin Khan et al. [18] mallia, johon sovellettiin AEM-elektrolyyserille arvioituja kustannuksia. Pääomakustannuksista merkittävä osa koostuu keskittävistä aurinkokennoista, seurantalaitteista ja muista paneeleihin liittyvistä kustannuksista, yhteensä noin 287 miljoonaa euroa. Elektrolyysereistä johtuvien kustannusten arvioitiin olevan noin 180 miljoonaa euroa hyötysuhteen ollessa 70 % [19]. Virrantiheydeksi arvioitiin 1 A/cm².

Käyttökustannuksissa elektrolyyserin huollot ja osien vaihdot aiheuttavat suurimman osan kuluista. Membranin ja elektrodien vaihtokustannukset arvioitiin nykyhinnoilla valmistajalta ostettuna sekä pelkkien materiaalien hintojen perusteella, ja lopulliseksi vuotuiseksi

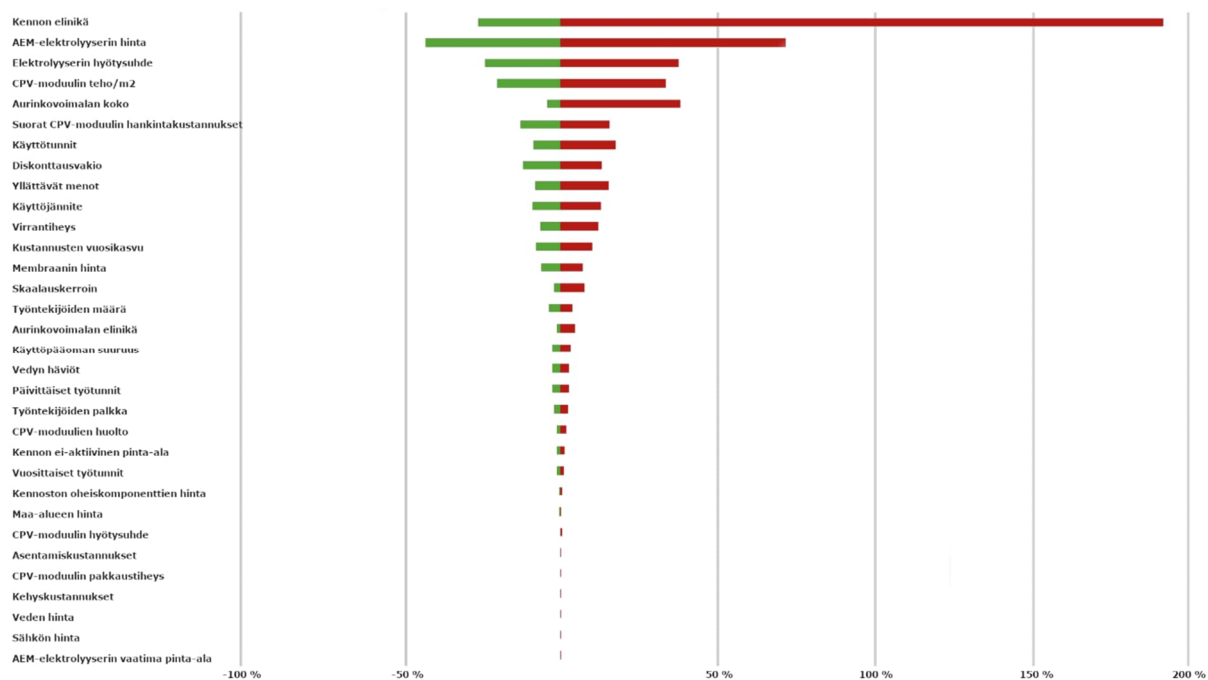
kustannukseksi saatiin noin 0,5 miljoonaa euroa. Materiaalien vaihtoajan arvioitiin olevan noin 2000 tuntia [19].



Kuva 6: Pääoma ja käyttökustannukset 50 tonnia vetyä päivässä tuottavalle laitokselle

Pääoma- ja käyttökustannusten avulla laskettiin hinta vedylle siten, että vuosittaisten käyttökustannusten nykyarvoon lisättiin päämakustannukset ja huomioitiin 15 % käyttöpääoma sekä mahdolliset hapen myyntitulot. Keskittävällä aurinkoenergialla tuotetulle vedylle hinnaksi saatiin noin 5,85 €/kg. Hinta koostuu pääosin aurinkokennojen hankinta- ja asennuskustannuksista.

Eri muuttujien vaikutus lopulliseen vedyn hintaan vaihteli paljon ja erityisesti kehitteillä oleville teknologioille hinta-arviot vaihtelivat paljon. Tämän takia raportissa laskettiin myös herkkyysanalyysijä eri muuttujille, joiden tulokset löytyvät kuvasta 7. Tästä voidaan huomata, että esimerkiksi aurinkokennojen eliniällä ja elektrolyyserien hankintahinnoilla voi olla todella suuri vaikutus lopulliseen vedyn hintaan.



Kuva 7: Eri tekijöiden vaikutus vedyn lopulliseen hintaan

Yhteenveto

Vety on yksi potentiaalisimmista korvaajista fossiilisille polttoaineille, minkä lisäksi se on tärkeä raaka-aine eri kemikaalien valmistuksessa. Vedyn tuotanto ilman haitallisia päästöjä onnistuu esimerkiksi veden elektrolyysillä, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkövirtaa käyttäen. Vihreän vedyn hinta on kuitenkin toistaiseksi huomattavasti korkeampi fossiilisista polttoaineista valmistettuun vetyyn verrattuna, joten vedyn käyttö polttoaineena on vielä hyvin vähäistä. Vedyn käyttöönotto laajemmassa mittakaavassa edellyttää tehokkaita ja edullisia valmistusmenetelmiä, minkä lisäksi uusiutuvaa energiaa tulee olla runsaasti saatavilla. [5] Tässä työssä otettiin käyttöön AEM-elektrolyyseri sekä keskittävä aurinkokenno, joiden toimintaa myös tutkittiin. Tämän lisäksi arvioitiin keskittävää aurinkoenergiaa ja AEM-elektrolyyseriä hyödyntävän vetylaitoksen pääoma- ja käyttökuluja vedyn hinnan laskemiseksi.

Elektrolyyseri sekä siinä käytettävät anodi, katodi ja membraani ostettiin suoraan valmistajalta. Keskittävä aurinkokenno tilattiin erilliseltä yritykseltä. Mittausten perusteella elektrolyyserin hyötysuhteeksi saatiin noin 62,9 % ja keskittävän aurinkokennon hyötysuhteeksi noin 21,4 %. Koko systeemin, eli elektrolyyserin ja aurinkokennon hyötysuhteeksi saatiin noin 13,5 %. Vedyn hinnan laskennassa hyötysuhteena käytettiin kirjallisuuden mukaista arvoa 28,7 % (elektrolyyseri 70 %, CPV-moduuli 41 %).

Vedyn tuotannon kustannuksia arvioitiin 50 tonnin päivätuotannolle laskemalla pääoma- ja käyttökustannukset. Keskittävällä aurinkoenergialla tuotetulle vedylle hinnaksi saatiin noin **5,85 €/kg**. Pääomakustannukset muodostuvat pääosin aurinkokennojen hankinta- ja asennuskustannuksista, ja niiden osuus tuotetun vedyn hinnasta on merkittävä. Käyttökustannuksissa elektrolyyserin huollot ja osien vaihdot aiheuttavat suurimman osan kuluista, arvioitu vuotuinen kustannus noin 0,5 miljoonaa euroa.

Tulosten perusteella AEM-elektrolyysi vaikuttaa potentiaaliselta vaihtoehdolta vedyn tuotantoon. Keskittävien aurinkokennojen korkeat hankintakustannukset nostavat vedyn hintaa, joten kustannusten lasku olisi edellytys kannattavuudelle. Tuotannon tehoa ja kustannustehokkuutta voidaan parantaa muun muassa elektrolyyserin ja elektrodimateriaalien kehittämisellä sekä hyötysuhteen optimoinnilla korkeammilla virrantiheyksillä.

Lähteet:

- [1] Abe, J. O., Popoola, A., Ajenifuja, E. ja Popoola, O. M. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International journal of hydrogen energy* 44(29) (2019), s. 15072–15086.
- [2] Alamiery, A. Advancements in materials for hydrogen production: A review of cutting-edge technologies. *ChemPhysMater* 3(1) (2024), s. 64–73.
- [3] Ishaq, H., Dincer, I. ja Crawford, C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(62) (2022), s. 26238–26264.
- [4] Zhang, B., Zhang, S.-X., Yao, R., Wu, Y.-H. ja Qiu, J.-S. Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology* 19(2) (2021), s. 100080.
- [5] Burhan, M., Shahzad, M. W. ja Ng, K. C. Long-term performance potential of concentrated photovoltaic (CPV) systems. *Energy Conversion and Management* 148 (2017), s. 90–99.
- [6] El-Shafie, M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: a review. *Results in Engineering* 20 (2023).
- [7] Zoulias, E., Varkaraki, E., Lymberopoulos, N., Christodoulou, C. N. ja Karagiorgis, G. N. A review on water electrolysis. *The Cyprus Journal of Science and Technology* 4(2) (2004), s. 41–71.
- [8] Ge, X., Zhang, F., Wu, L., Yang, Z. ja Xu, T. Current challenges and perspectives of polymer electrolyte membranes. *Macromolecules* 55(10) (2022), s. 3773–3787.
- [9] Godula-Jopek, A., Stolten, D. ja Bourasseau, C. *Hydrogen production : by electrolysis*. eng. WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, 2015
- [10] Sood, S., Prakash, O., Boukerdja, M., Dieulot, J.-Y., Ould-Bouamama, B., Bressel, M. ja Gehin, A.-L. Generic dynamical model of PEM electrolyser under intermittent sources. *Energies* 13(24) (2020), s. 6556.
- [11] Pushkareva, I., Pushkarev, A., Grigoriev, S., Modisha, P. ja Bessarabov, D. Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(49) (2020), s. 26070–26079.
- [12] Ryoo, G. W., Park, S. H., Kwon, K. C., Kang, J. H., Jang, H. W. ja Kwon, M. S. Towards high-performance and robust anion exchange membranes (AEMs) for water electrolysis: Super-acid-catalyzed synthesis of AEMs. *Journal of Energy Chemistry* (2024).
- [13] Goetzberger, A., Hebling, C. ja Schock, H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials science and engineering: R: Reports* 40(1) (2003), s. 1– 46.
- [14] Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F. ja Ekins-Daukes, N. J. Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics* 129(24) (2021).

- [15] Dimroth, F. ja Kurtz, S. High-efficiency multijunction solar cells. *MRS bulletin* 32(3) (2007), s. 230–235.
- [16] Luque, A. ja Andreev, V. M. *Concentrator photovoltaics*. eng. 1st ed. 2007. Springer series in optical sciences; 130. Berlin: Springer, 2007.
- [17] Algora, C. ja Rey-Stolle, I. *Handbook of concentrator photovoltaic technology*. eng. 1st ed. Chichester, England: Wiley, 2016
- [18] Khan, M., Al-Shankiti, I., Ziani, A. ja Idriss, H. Demonstration of green hydrogen production using solar energy at 28% efficiency and evaluation of its economic viability. *Sustainable Energy & Fuels* 5(4) (2021), s. 1085–1094.
- [19] Liu, Z., Sajjad, S. D., Gao, Y., Yang, H., Kaczur, J. J. ja Masel, R. I. The effect of membrane on an alkaline water electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(50) (2017).