

Antti Ikonen

VETY TUULI- JA AURINKOVOIMAN VA- RASTONA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2026

TIIVISTELMÄ

Antti Ikonen: Vety tuuli- ja aurinkovoiman varastona
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2026

Väestön kasvaminen ja elintasojen koheneminen kasvattavat energiantarvetta. Energiantarpeen kasvamisen lisäksi on alettu kiinnittää huomiota entistä enemmän ilmastoon. Täten tarvittavan energian pitäisi olla myös ympäristöystävällistä. Tuuli- ja aurinkovoima ovat ympäristöystävällisiä sekä taloudellisesti kannattavia, mutta niiden tuotanto vaihtelee pitkin päivää ja vuotta luoden tarpeen tuotetun energian varastoinnille.

Yleisin tapa tuottaa vetyä tällä hetkellä on höyryreformointi, mutta vedyn tuottaminen tällä tavalla tuottaa hiilidioksidipäästöjä, joita yritetään pienentää. Vihreää vetyä tuotetaan elektrolyysin avulla, jonka hyötysuhde PEM (Proton Exchange Membrane eli polymeerielektrolyyttikalvo) elektrolysaattoreilla saavuttaa 70 %. Vihreä vety on tärkeää ympäristön näkökannalta, sillä se ei tuota ylimääräisiä hiilidioksidipäästöjä.

Energianvarastona vety, vaikka teknillisesti mahdollinen, on kallis ja siltä puuttuu vielä tarvittava infrastruktuuri ison skaalan hyödyntämistä varten. Tuuli- ja aurinkovoimaa varten vety on kiehtova vaihtoehto, sillä vety ja tuuli- ja aurinkovoima täydentävät toistensa heikkouksia. Tuuli- ja aurinkovoima tuottavat paljon sähköä ajoittain laskien sähkön hinnan nolnaan. Vedyn hyötysuhde puolestaan ei pärjää muille varastointimetoille. Tuuli- ja aurinkovoiman tuotannot vaihtelevat paljon, mutta PEM elektrolysaattorit pystyvät toimimaan jopa 50 %/s muutoksen kanssa. Yhteensopivuudesta huolimatta vety on energianvarastona muita vaihtoehtoja kalliimpi ja tarvitsisi tukemista, jotta se alkaisi yleistymään.

Avainsanat: Vety, Energia, Energianvarasto, Uusiutuvat energianlähteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUULI- JA AURINKOVOIMA.....	2
2.1 Tuulivoima	2
2.2 Aurinkovoima	3
3. VETY	5
3.1 Vedyn valmistaminen	5
3.2 Vedyn varastoiminen.....	8
3.3 Vedyn kuljettaminen	12
4. VETY ENERGIANVARASTONA.....	14
4.1 Vetyvaraston hinta.....	14
4.2 Vetyvarastojen muita ominaisuuksia.....	15
5. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT.....	17
LÄHTEET.....	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

PEM	Proton Exchange Membrane eli polymeerielektrolyyttikalvo
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell eli kiinteäoksidipolttockenno
LCOE	Levelized Cost of Electricity eli tasoitettu sähkön hinta

1. JOHDANTO

Energiantarve maapallolla kasvaa väkiluvun kasvaessa, sekä ihmisten elintason parantuessa. Kasvavan energiantarpeen lisäksi pitäisi hidastaa ilmastonmuutosta eli tarvitaan ympäristöystävällisiä energianlähteitä. Tämän lisäksi kyseisen energianlähteen pitäisi vielä olla taloudellisesti realistinen vaihtoehto. Tuuli- ja aurinkovoima täyttävät nämä kriteerit.

Tuuli- ja aurinkovoima ovat uusiutuvia energianlähteitä, joiden kapasiteetti on kasvussa [1]. Tuuli- ja aurinkovoima ovat suosittuja energiantuotantomuotoja johtuen niiden ympäristöystävällisyydestä ja hinnasta. Tuuli- ja aurinkovoima eivät kovasta suosiostaan huolimatta ole täydellisiä energianlähteitä, vaan niistäkin löytyy omat ongelmansa. Tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto ei ole tasaista, vaan vaihtelee reilustikin päivän ja erityisesti vuoden aikana. Tämä on ongelmallista sillä sähkön kulutus ei vaihtele samalla tavalla tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon kanssa, jolloin joudutaan käyttämään säätövoimaa, joka aiheuttaa ylimääräisiä kuluja.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan vedyn potentiaalia tuuli- ja aurinkovoiman varastona. Tätä varten vaaditaan hieman ymmärrystä tuuli- ja aurinkovoimasta energiantuotantomuotoina, jota luvussa 2 käydään läpi. Tämän lisäksi tarvitaan tietoa vedystä, sen valmistamisesta sekä varastoisesta ja lopuksi vedyn muuttamisesta takaisin sähköksi. Näitä asioita käsittelee luku 3. Luvussa 4 tutustutaan vedyn ominaisuuksiin energian varastona ja luvussa 5 käydään läpi, millainen vety on tuuli- ja aurinkovoiman varastona aiempien lukujen perusteella.

2. TUULI- JA AURINKOVOIMA

Tuuli- ja aurinkovoima ovat uusiutuvia energianlähteitä, joiden määrä ja merkitys kasvavat koko ajan. Vuonna 2020 uusiutuvan energian määrä Euroopassa käytetystä energiasta oli 22,1 % [1]. Tämä määrä ei kuitenkaan riitä, ja vuonna 2030 uusiutuvan energian määrä pitäisi olla vähintään 32 % Euroopassa käytetystä energiasta RED II -direktiivin mukaisesti [2]. Tuuli- ja aurinkovoiman määrät tulevat siis kasvamaan tulevaisuudessaakin, sillä toisin kuin vesivoiman kanssa, tuuli- ja aurinkovoima eivät tarvitse vettä ja korkeuseroja mahdollistaen paljon isomman kapasiteetin. Vuosina 2019–2024 tuulivoimaa asennettiin 566 GW edestä, ja aurinkovoimaa 1622 GW edestä. Vuosina 2025–2030 on ennustettu entistä nopeampaa tuuli- ja aurinkovoiman lisäystä. Ennustuksen mukaan tuulivoimaa lisättäisiin 873 GW edestä ja aurinkovoimaa 3 546 GW edestä vuosina 2025–2030.[3] 2020 Kiina asetti tavoitteekseen saada yhteensä 1200 GW tuuli- ja aurinkovoimaa vuoteen 2030 mennessä. Kiina saavutti tavoitteensa jo vuonna 2024 [4].

Kasvavan määrän lisäksi tuuli- ja aurinkovoimalle on yhteistä polttoaineen tarpeettomuus energian tuottamisessa, sekä suuret vaihtelut energiantuotannossa pitkin päivää ja vuotta. Nämä suuret vaihtelut aiheutuvat tuulivoiman kohdalla tuulen vaihtelusta ja aurinkovoiman kanssa nämä johtuvat auringonvalon luonnollisesta vaihtelusta vuorokauden ja vuoden aikana, sekä pilvistä ja muusta varjostuksesta [5]. Tuuli- ja aurinkovoiman lisääntyessä kasvaa myös tarve reserveille sähköverkossa. Tuuli- ja aurinkovoimoiden huipputuotannot ja minimituotannot tapahtuvat kuitenkin vain harvoin samaan aikaan, sillä niiden vaihtelut riippuvat eri tekijöistä, jolloin energiantuotannon vaihtelut pienentyvät molempia tuotantomuotoja käytettäessä. Myös sijainneiltaan eroavien voimaiden maksimituotantojen ja minimituotantojen ajankohdat yleisesti eroavat toisistaan johtaen tasaisempaan energiantuotantoon. Tämän lisäksi tuotannon heittelyiden vaikutuksia sähköverkossa voidaan tasoittaa vielä energianvarastoja, kuten akkuja tai vetyä hyödyntämällä. [6] Tuuli- ja aurinkovoima ovat siis voimalan valmistumisen jälkeen melkein ilmaisia energianlähteitä, joiden tuottamaa energiaa on haastavaa käyttää, sillä se ei ole tasaista eikä myöskään täysin ennustettavaa.

2.1 Tuulivoima

Tuulivoima on toiseksi nopeinten kasvava energiantuotantomuoto aurinkovoiman jälkeen. Vuodesta 2019 vuoteen 2020 kasvu oli noin 17,8 %. Suomessa tuulivoimakapasiteettia oli vuoden 2021 lopussa 3,247 GW ja vuoden 2022 lopussa 5,677 GW, jolloin kasvu oli noin 57 %. [3,7]

Tuulivoimala koostuu yleisesti roottorista, konehuoneesta eli nasellista, tornista ja perustuksista. Roottori puolestaan koostuu lavoista ja navasta. Nasellissa on muun muassa generaattori, vaihteisto jos sellainen tuulivoimalasta löytyy ja lapojen ohjaukseen tarvittavat laitteet. Tuulivoimaloita on vaihteellisia ja vaihteettomia. Vaihteettomissa tuulivoimaloissa on kestopagneetti, joka on suoraan kiinnitetty tahtikoneeseen [8].

Tuulen sisältämä energia voidaan määrittää kaavan

$$P = \frac{1}{2} d * A * V^3 \quad (1)$$

mukaisesti. Kaavassa P on tuulen sisältämä energia, d on ilmantiheys, A on pyyhkäisty alue eli tuulivoimalassa tämä on roottorin säde * π^2 ja V on tuulen nopeus. Kuten kaavasta näkee, on tärkein tekijä tuulen nopeus. Tuulen sisältämä energia ei ole sama asia kuin tuulivoimalan sähköntuotanto. Tuulivoimalan vuosittaista sähköntuotantoa ennen voimalan häviöitä arvioidaan yleensä Weibullin jakauman avulla. Jotta Weibullin jakaumaa voidaan hyödyntää tuulivoimalan sähköntuotannon arvioinnissa, täytyy ensin tietää paikan skaalauskerroin, muotokerroin, sekä tuulen nopeuteen ja suuntaan liittyviä arvoja. Yleensä tuulivoimalan hyötysuhde on noin 30–45 %, mutta saavutettuaan nimellistehonsa tuulivoimalan hyötysuhde voi nousta jopa 50 %:n. Tuulivoimalan teoreettinen maksimihyötysuhde on Betzin lain mukaan noin 59,3 % [9,10,11].

Tuulivoimaloiden koot vaihtelevat erittäin pienistä alle kW tuulivoimaloista, joissa roottorin halkaisija on noin kaksi metriä ja torni on vain kuusi metriä korkea suuriin tuulivoimaloihin, joista suurimman roottorin halkaisija on 236 m ja jonka nimellisteho on 15 MW [12]. Tämä on suurin käytössä oleva tuulivoimala, mutta Dongfang Electric yrityksellä on konsepti jopa 26 MW tuuliturbiinista. Näin isoja tuulivoimaloita valmistetaan vain merellä käytettäväksi, sillä näin isoista tuulivoimaloista lähtee kova, jopa 118 dB ääni [12, 13]. Suurin tuulivoimala, jota käytetään maalla, on Enercon E-126 ja sen nimellisteho on 7,5 MW [14].

2.2 Aurinkovoima

Aurinkovoima on nopeimmin kasvava energiantuotantomuoto tällä hetkellä. Vuonna 2019 aurinkovoimaa oli maailmanlaajuisesti asennettuna 580,76 GW ja vuonna 2020 sitä oli 707,50 GW eli kasvu oli noin 21,8 %. Suomessa sähköverkkoon liitettyä aurinkovoimaa oli vain 293 MW ja sähköverkkoon liittämätöntä aurinkovoimaa oli arviolta noin 20 MW vuonna 2020[15].

Auringosta tulee säteilyn kautta vuodessa maapallolle 10 000 kertaa enemmän energiaa kuin mitä maapallolla käytetään vuodessa [16]. Tätä säteilyä muutetaan sähköksi

joko valosähköisen ilmiön avulla tai keskittämällä auringonvaloa tiettyyn pisteeseen näin kuumentaan pistettä ja siten höyrystäen vettä tämän pisteen luona. Tässä kirjallisuuskatsauksessa keskitytään valosähköisen ilmiön avulla tuotettuun sähköön. Kun fotoni, jonka energia on tarpeeksi suuri, absorboituu puolijohdteessa, vapautuu elektroni johtavuusvyölle ja aukko valenssivyölle. Tämän jälkeen positiivisesti varautunut aukko ja negatiivisesti varautunut elektroni ajautuvat sähkökentän takia vastakkaisiin suuntiin aurinkokennon sisällä ja lopuksi päätyvät vastakkaisille puolille aurinkokennoa. Kun aurinkokennon molemmat puolet ovat yhdistettynä ulkoiseen virtapiiriin, kennosta saadaan tasavirtaa. [16]

Valosähköiseen ilmiöön perustuvien aurinkokennojen huippuhyötysuhteet vaihtelevat 13 %:n ja 47.1 %:n välillä riippuen aurinkokennojen materiaaleista, kennojen paksuudesta, valmistustavasta ja pn-liitosten määrästä [17]. P ja n viittaavat puolijohdteen tyyppiin, joka voi siis olla joko p tai n riippuen onko puolijohdteen energiankuljettajat aukkoja vai elektroneja. Pn-liitos puolestaan on näiden kahden eri puolijohdetyypin välinen liitos. Paras hyötysuhde on saavutettu laboratorio-olosuhteissa aurinkokennolla, jossa on neljä eri pn-liitosta ja liitokset ovat tarpeeksi paksuja, jottei osa fotoneista jää absorboitumatta. Jokaisella pn-liitoksella on fotonille kynnyenergia, jonka se tarvitsee absorboituakseen. Jokainen absorboitunut fotoni tuottaa tämän kynnyenergian määrän energiaa absorboituessaan. Kynnyenergian määrää energiatasojen ero valenssi- ja johtavuusvyön välillä. Täten saadaan parempi hyötysuhde, kun on pn-liitoksia, jotka absorboivat matalan energian fotonit ja myös pn-liitoksia, jotka pystyvät hyödyntämään korkean energian fotonit paremmin kuin nämä pn-liitokset, jotka kykenevät absorboimaan myös matalan energian fotonit. [16,17]

3. VETY

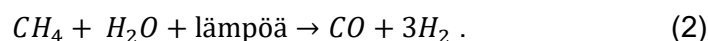
Vety on maailmankaikkeuden yleisin ja kevyin alkuaine. Maapallollakin vetyä on runsaasti, mutta se on pääasiassa yhdisteissä, kuten vedessä ja hiilivedyissä, kuten metaanissa. Vetyä on ilmakehässä vapaana, mutta vapaana olevan vedyn määrä on erittäin pieni ja vain noin 0,000055 % ilmakehästä on puhdasta vetyä [18]. Jotta vetyä voitaisiin hyödyntää energianvarastona, polttoaineena sellaisenaan polttokennossa, synteettisenä polttoaineena esimerkiksi e-metaanina tai lannoitteiden valmistamiseen, pitää se ensin erottaa näistä yhdisteistä.

Vetyä voidaan valmistaa esimerkiksi höyryreformoimalla ja elektrolyysillä. Tulevaisuudessa vetyä tullaan enenevässä määrin valmistamaan elektrolyysillä, sillä näin välteetään hiilidioksidipäästöjä. Vetyä voidaan varastoida esimerkiksi kaasuna, nesteenä tai metallihydrideissä. Eri tavat varastoida vetyä tuovat mukanaan erilaisia hyötyjä ja puutteita.

3.1 Vedyn valmistaminen

Vetyä voidaan valmistaa viidellä eri tavalla ja ainakin kolme tapaa ovat kehityksessä. Nämä tavat ovat höyryreformointi/kaasutus, osittainen hapettaminen, elektrolyysi, joka tulee olemaan tärkein tapa tuuli- ja aurinkovoiman kannalta, uusiutuvan nesteen reformointi ja käymisreaktio. Kehityksessä olevat tavat ovat lämpökemiallinen veden halkaiseminen, fotobiologinen veden halkaiseminen ja valosähkökemiallinen veden halkaiseminen. [19]

Höyryreformointi on kaikista yleisin vedyn valmistamistapa. Höyryreformoinnissa metaani tai yleisemmin maakaasu, jossa on metaania, reagoi korkealämpöisen, 700–1000 celsius asteisen vesihöyryn kanssa 3–25 baarin paineessa. Reaktiossa on mukana myös katalyytti, joista yleisin teollisessa käytössä on nikkeli. Reaktiossa metaani ja vesihöyry muodostavat hiilimonoksidia ja vetyä. Tällöin on käynyt seuraavan kaavan mukaisesti



Reaktio ei kuitenkaan ole täysin puhdas ja sen seurauksena muodostuu myös pieniä määriä hiilidioksidia. Muodostunutta seosta kutsutaan synteetikaasuksi, joka siis koos-

tuu vedystä, hiilimonoksidista ja pienestä määrästä hiilidioksidia. Höyryreformoinnin jälkeen tapahtuu vielä vesikaasun siirtoreaktio eli konvertointireaktio, jos vesihöyryä on vielä jäljellä. Konvertointireaktiossa hiilimonoksidi ja vesihöyry reagoivat rautaoksidikatalyytin läsnä ollessa muodostaen hiilidioksidia ja vetyä samalla vapauttaen hieman lämpöä. [20]



Jos synteetikaasu on valmistettu hiilestä tai biomassasta kuumen vesihöyryn ja hapen kanssa paineistetussa kaasuttimessa, on kyse kaasuttamisesta. Kaasuttamisen on siis vaihtoehtoinen tapa höyryreformoinnille luoda synteetikaasua. Konvertointireaktion jälkeen epäpuhtaudet poistetaan vedystä, ja jäljellä on käytännössä vain puhdasta vetyä. Höyryreformoinnilla voidaan tuottaa vetyä myös muista polttoaineista kuin metaanista, mutta tapahtuvat reaktiot ovat silloin erilaisia. [21]

Osittaisessa hapetuksessa hiilivety, useimmiten metaani reagoi hapen kanssa. Hapen määrä pidetään kuitenkin niin pienenä, että se ei riitä hiilivetyjen hapettamiseksi hiilidioksidiksi ja vedeksi. Kun happea on rajattu määrä saatavilla, hapettumisreaktiosta tulee pääasiallisesti vetyä ja hiilimonoksidia. Näiden lisäksi muodostuu myös pieniä määriä hiilidioksidia ja muita yhdisteitä. Jos reaktioon ei ole käytetty puhdasta happea vaan ilmaa, muodostuu myös typpeä.



Jos tämän jälkeen reaktoriin päästetään vesihöyryä, tapahtuu kaavan 3 mukainen konvertointireaktio. Tämä reaktio on nopeampi kuin höyryreformointi ja ei tarvitse yhtä suurta reaktoria kuin höyryreformointi tarvitsee. [20]

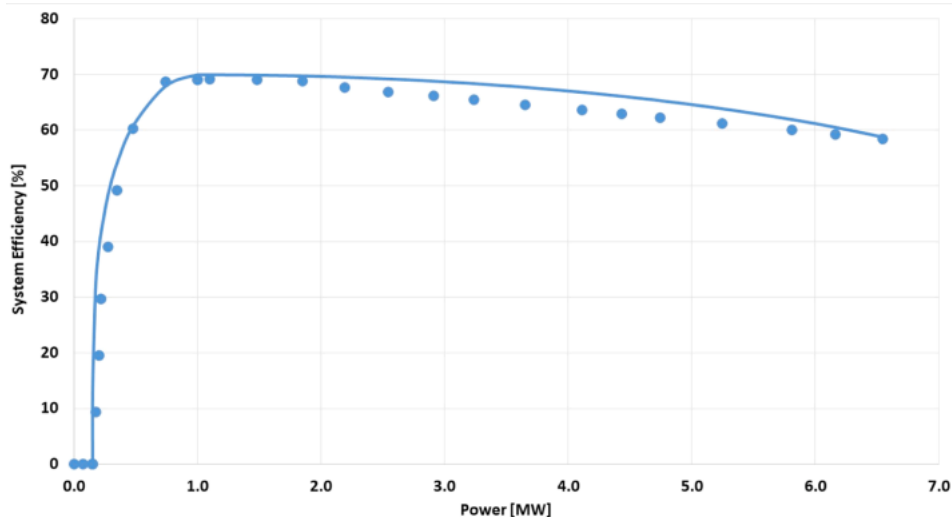
Elektrolyysi on yhdisteen pilkkomista osiin sähkön avulla. Veden kohdalla elektrolyysi on veden pilkkomista vedyksi ja hapeksi sähkön avulla. Elektrolyysi tapahtuu elektrolysaattorissa. Elektrolysaattorissa on anodi, katodi ja niiden välissä on elektrolyytti. Erilaiset elektrolysaattorit toimivat eri tavoilla johtuen elektrolyytistä. Tarkastellaan korkean höytysuhteen ja lämpötilan elektrolyysiä, joka tapahtuu kiinteäoksidipolttokennossa (SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cell). Kennossa katodilla tapahtuvat reaktiot ovat:



Vastaavasti anodilla tapahtuva reaktio on



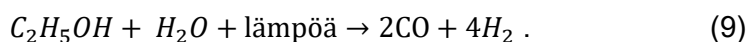
Elektrolyysin avulla voidaan siis tuottaa hiilineutraalisti vetyä, jonka takia elektrolyysin hyödyntäminen vedyn tuotannossa tulee kasvamaan. Elektrolyysin hyötysuhde on 60-97 %, riippuen elektrolyysitekniikasta, sekä polttoaineen puhtaudesta [27,28]. Huomattavan arvoista on myös se että 97 %:n hyötysuhde on saavutettu vain laboratoriossa SOEC elektrolysaattoreilla [28]. PEM (Proton exchange membrane eli polymeerielektrolyyttikalvo) elektrolysaattorit jäävät noin 70 %:n hyötysuhteeseen.



Kuva 1. 3.75 MW:n nimellistehoisen PEM-elektrolysaattorin hyötysuhde ja teho. Y-akselilla on hyötysuhde ja x-akselilla teho [29].

PEM-elektrolysaattorin hinta on 708.76 €/kW, mutta sen uskotaan tippuvan 168.75 euroon/kW vuoteen 2050 mennessä [30]. Tähän hintakehitykseen vaikuttavat vedyn kysyntä, elektrolysaattoreiden teknologinen oppimiskurvi [30]. PEM-elektrolysaattorit kykenevät jopa -40 %/s - +50 %/s kokoiisiin tehomuutoksiin tehden ne sopivaksi tuuli- ja aurinkovoiman hyödyntämiseen [31]. Vaikka PEM-elektrolysaattori kykenee toimimaan suoraan kytkettynä tuuli- tai aurinkovoimalaan tai niiden yhdistelmään, akun avulla kyetään pysymään elektrolysaattorin korkeammilla hyötysuhteilla näin hieman parantaa sähkö -> vety -> sähkö prosessin huonoa hyötysuhdetta.

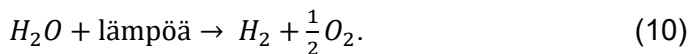
Uusiutuvan nesteen reformoinnissa biomassasta saatu neste, kuten etanoli tai bio-öljyt, voidaan reformoida vedyn valmistusta varten höyryreformointia vastaavan prosessin avulla. Suurin etu höyryreformointiin nähden on se, että nyt vetyä päästään taas tuottamaan uusiutuvan lähteen eli biomassan avulla. Vetyä myös saadaan enemmän polttoaineyksikköä kohti kuin metanolin kanssa. Etanolin höyryreformointireaktio tapahtuu, kun nestemäinen etanoli reagoi korkealämpöisen vesihöyryn kanssa. [21]



Seuraavaksi tapahtuu kaavan 2 mukainen konvertointireaktio, jonka jälkeen yhdestä etanolimolekyylillä on tuotettu 5 molekyyliä vetyä. Uusiutuvan nesteen reformointi on siis muuten samanlaista kuin höyryreformointi, mutta polttoaine on eri ja se on nestemäistä reaktion alkaessa. [23]

Käymisreaktiota hyödyntäessä vedyn tuottamiseen tarvitaan myös mikro-organismit, jotka rikkovat orgaanista materiaalia ja samalla tuottavat sivutuotteita, joista voidaan entsyymien avulla valmistaa vetyä. Tämä orgaaninen materiaali voi olla esimerkiksi jotain sokeripitoista tai vaikkapa jätevettä. Nämä mikrobit voivat rikkoa molekyyliä useilla eri tavoilla, joista vain osa tuottaa oikeita sivutuotteita, jonka takia tämä vedyn valmistustapa ei ole erityisen ideaalinen, kunnes löydetään tapa, jolla tapahtuu vain haluttuja reaktioita tai vain vähän ei-toivottuja reaktioita. [23]

Kehitteillä olevista tavoissa nettoreaktio on sama: vesimolekyyli jakautuu vedyksi ja hapeksi. Lämpökemiallisessa vedenhalkaisussa muut reaktiot riippuvat käytetystä laitteesta ja sen materiaaleista, mutta valosähkökemiallisessa veden halkaisussa vesi halkaistaan suoraan auringonvalon energian ja puolijohteen avulla. Fotobiologisessa vedenhalkaisussa puolestaan vedenhalkaisuun käytetään puolijohteiden sijasta mikrobeja, jotka auringonvalon energian avulla jakavat veden vetyyn ja happeen. Vedenhalkaisussa tapahtuva reaktio on:



Kehitteillä olevissa tekniikoissa on ongelmia, joita pitää ratkaista ennen kuin tiedetään ovatko nämä hyödyllisiä vedyn tuotannossa. Lämpökemiallisen vedenhalkaisun ja valosähkökemiallisen vedenhalkaisun ongelmia ovat huono hyötysuhde ja reagoivien materiaalien kestävyys reaktoreissa. Fotobiologinen vedenhalkaisu jakaa hyötysuhdeongelman, jota yritetään korjata kehittämällä uusia entsyymejä, jotka tuottaisivat enemmän vetyä reaktiossa ja joita voitaisiin käyttää myös kaupallisen skaalan reaktoreissa. [24,25,26]

3.2 Vedyn varastointi

Edellisessä kappaleessa käytiin läpi eri tapoja valmistaa vetyä. Vetyä ei aina käytetä heti valmistamisen jälkeen, joten vedyn varastointiselle on tarvetta. Erilaisia tapoja varastoida vetyä ovat paineistamalla, nesteyttämällä, kryokompressoimalla, adsorboimalla, metallihydrideissä, kompleksihydrideissä ja nestemäisissä orgaanisissa vedynkantajissa. Taulukko 1. on Muhammad R. Usmanin kokoama ja se on julkaistu Renewable and Sustainable Energy Reviewssissä. [32]

Taulukko 1. Erilaisten vedyn varastointitapojen vertailu [33,34,35,36,37,38,39,40,41].

a: laskettu ihanteellisella kaasulailla

b: laskettu Peng-Robinson yhtälön standardimuodolla

c: olettaen tiheyden olevan sama kuin aktiivihielellä.

Varastointitapa	Vedyn määrä (massaosuus H ₂)	Tiheys (g/L)	Energiatiheys (MJ/L)
Kompressoitu			
1 bar, 20 °C	100	0.0814 ^a	0.01
350 bar, 20 °C	100	24.5 ^b	2.94
700 bar, 20 °C	100	41.4 ^b	4.97
700 bar, 20 °C, (sisältäen IV mallin vedynvarastointisäiliön)	5.7	40.8	4.9
Nestemäinen vety			
1 bar, -253 °C	100	70.8	8.5
1 bar, -253 °C (sisältäen säiliön)	14	51	6.12
Kryokompressoitu			
350 bar, -253 °C	100	80	9.6
Metallihydritit			
MgH ₂	7.6	110	13.2
FeTiH ₂	1.89	114	13.7
Kompleksihydritit			
NaAlH ₄	7.4	80	9.6
Fyysinen adsorbointi			

Varastointitapa	Vedyn määrä (massaosuus H ₂)	Tiheys (g/L)	Energiatiheys (MJ/L)
Aktiivihiihi @77 K ja 30–60 bar	5.0	38.5	2.4
Zeoliitti (NaX) @77 K ja 40 bar ^e	2.55	20	2.4
MoF (MOF-210) @77 K and 80 bar	7.9	25.8	3.1
Nestemäinen orgaaninen vedynkantaja			
Metyylisykloheksaani/tolueneeni	6.2	47.3	5.68
Perhydrobentsyyli-tolueneeni/benzyylitolueneeni	6.2	56.0	6.72

Kompressoitu vety on suosituin tapa varastoida vetyä, koska vedyn kompressoiminen on kehittynyt teknologia, joka tarjoaa nopean vedyn täytön ja vapauttamisen, ja tämän lisäksi vedyn vapauttaminen ei vaadi lisäenergiaa. Tankeissa säilytettäessä häviöitä tapahtuu vain kompressoitaessa ja tankkia purkaessa, mutta ei itse säilytysvaiheessa tankin ollessa ehjä. [24]. Kompressoitulle vedylle on neljä erilaista varastointitankkityyppiä, I-IV. Kaikki nämä tankkityypit ovat lieriön tai pyöreän muotoisia. Kaikki liikutettaviksi tarkoitettut tankit ovat lieriön muotoisia koska pyöreitä on vaikeampi siirtää. I: kokonaan metallinen tankki, painava mutta halpa, kestää painetta 30 bar asti. II: Metallinen tankki, jonka metallinen seinä on kiedottu komposiitilla, 30-40% kevyempi kuin I tyyppin tankki, mutta maksaa noin 50 % enemmän. III: Tehdään hiilikuidusta, johon pistetään metallivuoraus esimerkiksi alumiinista, jolloin tankki on kevyempi ja kestää enemmän kuin tyyppien I ja II tankit, valitettavasti hiilikuidulla on pieni lämpöjohtavuus, joka voi aiheuttaa ongelmia, jos tankkia yritetään täyttää liian nopeasti korkeaan paineeseen. Tyyppin III tankit kestävät jopa 700 bar:n painetta. IV: muuten samanlainen kuin tyyppin III tankki, mutta vuoraus on enimmäkseen polymeerinen ja sisältää vain hieman metallia. Tyyppin IV tankit kestävät myös 700 bar:n paineen. [42] Kompressoitua vetyä voidaan varastoida myös maanalaisissa luolissa tai tyhjenneissä suolakaivoksissa. Halvin tapa varastoida suuri määrä vetyä on tyhjenneissä suolakaivoksissa [43].

Suolakaivoksissa varastoidessa häviöt koostuvat kemiallisista häviöistä, karkaamisesta, liukenemishäviöistä ja adsorptiohäviöistä. Kemiallista häviötä tapahtuu, kun vety reagoi epäpuhtauksien kuten mineraalien kanssa tuottaen epätoivottuja aineita ja vähentäen varastosta purettavan vedyn määrää. Vedyn karkaaminen on isoin häviöiden

aiheuttaja suolakaivoksissa. Korroosion aiheuttaessa rakoja varaston porausaukkoon suuria määriä vetyä voi karata, jos rakoja ei havaita ajoissa. Jos varastoa täytetään ja tyhjennetään usein, voi porausaukko kärsiä myös mekaanisia vahinkoja johtaen rakoihin. Tämä on taloudellisten tappioiden lisäksi myös vaarallista, sillä vety on helposti räjähtävää. Vedyn karkaamista tapahtuu myös, jos vetymolekyyli on pienempi kuin seinämän muodostavan aineen hilaetäisyys. Natriumkloridin hilaetäisyys on $2.8 \cdot 10^{-10} \text{m}$, joka on pienempi kuin vetymolekyyli, jonka halkaisija on $2.89 \cdot 10^{-10} \text{m}$. Suolakaivokset ovat pääosin suolaa eli natriumkloridia, joten vetyä ei näin pääse paljoa karkaamaan. Suolakaivoksissa vetyä liukenee vain suolaliuokseen. Vedyn liukenevuus suolaliuokseen pienenee suolan määrän kasvaessa ja kasvaa paineen kasvaessa. Liukenemishäviöitä voidaan siis minimoida pitämällä kaivosta mahdollisimman kuivana. Vetyä adsorboituu huokosiin mineraaleihin kaivoksessa. Useimmiten tämä on mineraalipitoista savea. Adsorptoitumista tapahtuu vain sähkökentän avulla, joten ilman ulkoista sähkökenttää adsorptoitumista tapahtuu vain van der Waalsin voimien seurauksena. Adsorboituminen van der Waalsin voimien seurauksena on huomattavasti pienempää kuin mitä vahvempi ulkoinen sähkökenttä aiheuttaisi. [44]

Kuten taulukosta 1 näkyy, nestemäisellä vedyllä on huomattavasti parempi energiatiheys kuin kompressoidulla vedyllä. Nestemäisellä vedyllä on myös isompi tiheys kuin korkeapaineistetulla vetykaasulla, joten tarvittavan varaston koko on selvästi pienempi, kuin kompressoidulla vedyllä. Koska nestemäisen vedyn paine on matala, ei varaston seinän tarvitse olla paksu. Valitettavasti nestemäinen vety vaatii matalan lämpötilan $-253 \text{ }^\circ\text{C}$, jonka vuoksi varastoihin tarvitaan erittäin hyvä eristys, joka lisää varaston painoa ja hintaa [25]. Tämän lisäksi vedyn nesteyttäminen vaatii paljon energiaa ja hyvästä eristyksestä huolimatta vetyä höyrystyy 1,5-3 % päivässä, riippuen varaston tilavuuden suhteesta varaston seinien määrään, mitä enemmän seinää tilavuutta kohden sitä enemmän vetyä höyrystyy [44].

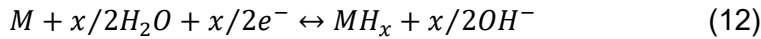
Kun vety kryokompressoidaan, se yhdistää kompressoidun vedyn ja nestemäisen vedyn puolia. Kryokompressoitu vety on energiatiheämpää kuin nestemäinen vety, mutta merkittävämpänä etuna nestemäiseen vetyyn verrattuna kryokompressoidulla vedyllä tapahtuu huomattavasti vähemmän vedyn höyrystymistä, kryokompressoitua vetyä on säilytetty jopa viikko ilman, että se alkaa höyrystymään, kun vetytankki täytettiin 85 % kapasiteetistaan. Kryokompressoitu vety kuitenkin tarvitsee kalliimman säilytystankin verrattuna nestemäiseen vetyyn, sillä hyvän eristyksen lisäksi sen pitää kestää myös painetta. Myös energian käyttö varastoinnissa lisääntyy, sillä paineistamisessa kuluu energiaa. [32,3]

Metallihydridi muodostuu, kun vety reagoi metallin tai metalliseoksen kanssa. Metallihydridi voi muodostua joko suoralla vetyreaktiolla, tai veden sähkökemiallisen dissosiaation seurauksena.

Suora vetyreaktio:

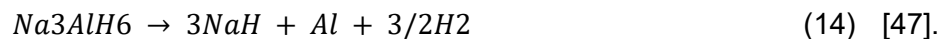
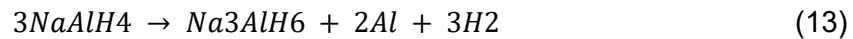


Veden sähkökemiallinen dissosiaatio:



Reaktioyhtälöissä M on metalli tai metalliseos.[45] Kuten taulukosta 1 näkyy, metalli hydrideillä on korkein tiheys sekä energiatiheys vedyn varastoista. Valitettavasti vedyn vapauttaminen metallihydrideistä vaatii korkean lämpötilan, jopa 900 °C riippuen metallihydridistä, joka on ongelmallista, sillä se vaatii energiaa ja PEM polttokenno toimii vain 100 °C asti. Metallihydridien absorptio ja emissio kinetiikka ovat myös hitaita, joka tekee varaston täyttämistä ja tyhjentämistä hidasta [32].

Kompleksihydridit muodostuvat, kun vetyatomi muodostaa kovalenttisen sidoksen koordinaatiokehän keskimmäisen atomin kanssa sähkövarauksettomassa molekyylissä, jonka stabiloi kationi. [46]. Kuten taulukosta 1 näkyy, natriumalumiinihydridillä on keskivertoa parempi tiheys ja energiatiheys. Natriumalumiinihydridin vety vapautuu kahden reaktion seurauksena:



Nämä reaktiot tapahtuvat suhteellisen matalassa lämpötilassa 185 °C. Kuten kaavasta 13 nähdään, näiden reaktioiden jälkeen vetyä jää vielä natriumhydridiin. Jotta natriumhydridiin jäävä vety saataisiin vapautettua, tarvittaisiin 425 °C lämpötilaa. Tämän takia natriumhydridiin jäävää vetyä pidetään usein peruuttamattomana reaktiona, sillä usein ei ole sen arvoista vapauttaa siihen jäänyttä vetyä. Kompleksihydrideillä on metallihydridien tavoin hidas absorptio ja emissio kinetiikka, joka hidastaa vedyn varastoimista ja vapauttamista kompleksihydrideissä. [32,40]

Kuten taulukossa 1 näkyy, fyysisessä adsorboinnissa lämpötila on matala, vain 77 K ja painettakin on jonkin verran, 30-80 bar riippuen yhdisteestä. Näistä vaatimuksista huolimatta fyysisessä adsorboinnissa on erittäin huono energiatiheys. Näin ollen fyysisen adsorbointi ei ole hyödyllistä vedyn varastoimista varten.

Orgaaninen nestemäinen vedynkantaja muodostuu, kun vety reagoi orgaanisen molekyylin kanssa, jolta puuttuu vetyä. Tämän vedyn vapauttamiseen tarvitaan energiaa ja se tehdään voimalassa tai ajoneuvossa. Nestemäisen orgaanisen vedynkantajan isoin etu on sen helppohko siirtäminen kaasumaiseen ja nestemäiseen vetyyn verrattuna. Esimerkkinä tästä helppohkosta siirtämisestä toimii metyylysykloheksaani. Metyylysykloheksaania saadaan, kun lisätään tolueeniin vetyä. Tolueeni sekä metyylysykloheksaani ovat nestemäisiä 20 °C lämpötilassa [48]. Tämän lisäksi tolueeniä käytetään jo teollisella skaalalla ja sen massatuotanto on vakiintunutta teknologiaa. Tämän lisäksi Metyylysykloheksaani on tarpeeksi samanlaista bensen kanssa, että sitä voidaan siirtää jo olemassa olevaa bensainfrastruktuuria pitkin. Metyylysykloheksaaniin isoin ongelma on se, että vedyn vapauttamisessa käytettävää katalyysaattoria ei ole saatu tarpeeksi stabiiliksi. [48].

3.3 Vedyn kuljettaminen

Vetyä ei aina haluta tai pystytä käyttämään/varastoimaan valmistamispaikalla, jolloin tulee tarve vedyn kuljettamiselle. Vedyn kuljettamiseen ja jakeluun on kolme pääasiallista tapaa, joista valitaan sopivin riippuen siitä, miten vety on varastoitu. Kuljettamisen ja jakelun kannalta nämä ovat jaoteltu kaasumaiseen vetyyn, nestemäiseen vetyyn, ja materiaali pohjaisiin vedyn kantajiin [49].

Kaasumaisen vedyn kuljettaminen ja jakelu. Kaasuputket sekä paineistetut säiliöt, joita kuljetetaan rekoilla ovat yleisiä tapoja kaasumaisen vedyn kuljettamiseen. Kaasuputkia, jotka ovat tehty vedyn kuljetusta varten on vielä vain vähän. Yhdysvalloissa vetyputkia on 2600 km, Euroopassa 1500 km ja ne ovat suurien vedynkuluttajien kuten jalostamojen ja ammoniakkitehtaiden yhteyksissä. Jotta vetyä pystyttäisiin jakelemaan koko Yhdysvaltojen alueella, tarvittaisiin useita satoja tuhansia kilometrejä näitä vetyputkia. Korkeapaineisia maakaasuputkia ei valitettavasti voi sellaisenaan käyttää vedyn kuljettamiseen. Teoriassa näiden maakaasuputkien sisäpintoja voitaisiin päällystää, jolloin putkesta ei karkaisi yhtä paljon vetyä, tai jo olemassa olevan putken sisään voitaisiin pistää kokonaan uusi putki, mutta käytännössä tämä on hankalaa. Maakaasuputkien muuttaminen vetyputkiksi olisi myös riskialtista, sillä maakaasuputkissa on usein rikkijämiä ja rikki vahingoittaa polttokennoja, jolloin näitä pitkin kuljetettua vetyä ei olisi turvallista käyttää polttokennoissa. [43,44] Paineistettujen säiliöiden kuljettaminen rekoilla on uusien putkien rakentamiseen verrattuna simppelempiä. 250 bar paineessa olevia säiliöitä lastataan rekkaan ja viedään kohteeseen. Rekoilla kuljettamisen huonoina puolina ovat kapasiteetin pienuus, työvoiman tarve ja paineistettujen säiliöiden hinta.

Nestemäisen vedyn kuljetus ja jakelu tapahtuu kryogeenisessä tankissa. Tämä on kustannustehokkain tapa kuljettaa vetyä yli 500 kg/päivä tilauksille, jotka ovat kohtalaisen matkan päässä. Näitä kryogeenisiä tankkeja voidaan kuljettaa joko laivalla tai rekalla. Jotta nestemäisestä vedystä tulisi yleisin tapa kuljettaa vetyä, pitäisi vedyn nesteyttämislaitosten vielä kehittyä huomattavasti.[49]

Materiaalipohjaisten vedynkantajien jakelua tapahtuisi käytännössä vain nestemäisille orgaanisille vedynkantajilla, sillä metallihydrideissä ja kompleksihydrideissä on liikaa huonoja puolia, joita käytiin läpi kappaleessa 3.2. Materiaalipohjaisista vedynkantajista isointa tämänhetkistä potentiaalia osoittaa metyylysykloheksaani ja tolueeni, joilla on potentiaalinen kiertomahdollisuus joka toimisi näin: tolueeni vedytetään vedytyslaitoksessa, josta nyt metyylysykloheksaaniksi muuttunut tolueeni viedään mahdollisen varaston kautta voimalaan, jossa metyylysykloheksaanista käytetään siihen varastoitunut vety ja reaktiotuotteena muodostunut tolueeni palautetaan mahdollisen varaston kautta vedytyslaitokselle, jossa siitä taas tehdään metyylysykloheksaania. Etuna materiaalipohjaisissa vedynkantajissa on niiden turvallisuus, sillä ne eivät tarvitse korkeaa painetta tai matalaa lämpötilaa, jotta vedyn tiheys olisi hyväksyttävällä tasolla. Isoin puute materiaalipohjaisissa vedynkantajissa on stabiiliin katalysaattorin löytäminen/kehittäminen vedyn vapauttamiseen. [41,43]

4. VETY ENERGIAVARASTONA

Edellisessä luvussa käytiin läpi erilaisia tapoja varastoida vetyä. Tässä kappaleessa tutustutaan erilaisiin ominaisuuksiin, joita energiavarastolta tarvitaan, ja miten vetyvarastot pärjäävät näiden ominaisuuksien suhteen. Energiavarastot voidaan jakaa lyhyen-, keskipitkän- ja pitkän aikavälin varastoihin sen perusteella, kuinka kauan energiavaraston tyhjentäminen kestää. Lyhyen aikavälin varastojen tyhjeneminen kestää millisekunneista tunteihin, keskipitkän aikavälin varastojen tyhjeneminen kestää tunnista päivään ja pitkän aikavälin varastojen tyhjeneminen päivistä jopa kuukausiin. Joskus keskipitkän aikavälin varastoja ei huomioida ollenkaan, vaan määritellään pitkän aikavälin varasto alkamaan tunneista eteenpäin [52]. Erilaisia kriteerejä energiavaraston valitsemiseen ovat esimerkiksi hinta, hyötysuhde, kapasiteetti, sijainti ja käyttöikä.

4.1 Vetyvaraston hinta

Vetyvarastojen hinta (€/MWh) vaihtelee huomattavasti riippuen siitä, missä muodossa vetyä varastoidaan [53].

Taulukko 2. Pumpatun vesivoiman, vetyvarastojen ja kompressoidun ilman keskimääräinen sähkön hinta (LCOE levelized cost of electricity) mukaan lukien varastointiaika [53].

VARASTOINTITAPA	HINTA LYHYT-/KESKIPITKÄ-/PITKÄ VARASTOINTIAIKA (€/MWH)
PUMPATTU VESIVOIMA	77/89/326
VETY SUORAAN KAASUVERKOSTOON	361/361/369
VETY LUOLASSA	272/273/280
KOMPRESSOITU ILMA	106/107/235

Taulukossa 2 eri varastointiajat ovat määritetty purkautumisajan mukaan: lyhyen aikavälin varasto purkautuu tunnissa, keskipitkän aikavälin varasto purkautuu 7 tunnissa ja pitkän aikavälin varasto purkautuu 200 tunnissa. Nestemäisen vedyn varastointiin tarkoitettu tankki maksaa 1290 €/MWh, joka on huomattavasti kalliimpaa kuin kaasumaisen vedyn varastointi [54]. Kuten kappaleessa 3.2 todettiin, vedyn varastoiminen metalli- ja kompleksihydrideissä tuo mukanaan ongelmia hitaassa latautumisessa ja purkautumisessa, sekä korkean lämpötilan. Tämän lisäksi metallihydridissä vedyn varastoiminen on

myös kallista; laivoissa vedyn varastoiminen metallihydridissä maksaa halvimmillaan 3400 €/kg, joka tarkoittaa 86 190 €/MWh [55].

4.2 Vetyvarastojen muita ominaisuuksia

Vaikka hinta ja varsinkin energiavaraston kannattavuus ovatkin usein tärkeimmät kriteerit energiavaraston rakentamista varten, myös muilla kriteereillä on vaikutusta. Esimerkiksi aktivointiaika, eli kuinka nopeasti varastosta saadaan sähköä ulos tarvittaessa, on tärkeä kriteeri lyhyen ajan varastoille, joita usein käytetään tehotasapainon hallintaan. Vetyvaraston aktivointiaika on käytännössä polttokennon saaminen käyttövalmiiksi, joka kestää minuutista eteenpäin riippuen polttokennotekniikasta [31]. Polttokennoa voisi myös pitää lämpimänä koko ajan, mutta tämä tietysti käyttää energiaa ja heikentää jo valmiiksi heikkoa 40-70 % sähkö -> vety -> sähkö ketjun hyötysuhdetta [56]. Sähkö -> vety -> sähkö ketjun hyötysuhde riippuu vahvasti valitusta elektrolysaattorista, kuten kapaleessa 3.1 opittiin. Heikko hyötysuhde, minuutin aktivointiaika ja korkea hinta verrattuna pumpattuun vesivoimaan tekevät vedystä epäideaalin lyhyen aikavälin energiavaraston.

Vetyvaraston kapasiteetti puolestaan on vertaansa vailla, vetyä voidaan varastoida pienistä paineistetuista säiliöistä aina suolakaivokseen asti, jolloin varastoidun vedyn määrä voi nousta jopa GWh tasolle [43]. Vetyvaraston sijainti on varastointitavan perusteella joko sidottu luoliin ja kaasuverkkoon tai vaihtoehtoisesti vetyvarasto voidaan rakentaa haluttuun sijaintiin, jolloin eri käyttötarkoituksiin on mahdollisuus toteuttaa vetyvarasto helpommin, kuin pumpatun vesivoiman varasto. Käyttöikä vetyvarastoilla vaihtelee taas riippuen siitä, mitä vetyvarastoa käytetään. Paineistetulla vetytankilla käyttöikä on noin 25 vuotta, riippuen syklien tiheydestä [57]. Nestemäisellä vedyllä säiliön elinikä voi olla ainakin 45 vuotta, minkä NASA:n 1965 valmiiksi saama kryogeeninen tankki todistaa. NASA:n tankista vaihdettiin eristeet 45 käyttövuoden jälkeen. Nämä vanhat eristeet olivat kuitenkin loistavassa kunnossa ja putkisto sekä tankin sisäinen tuki olivat myös kunnossa viitaten siihen, että tankkia olisi voinut käyttää pidempäänkin ilman eristeen vaihtoa. [58] Metallihydridin käyttöikä vedyn varastona vaihtelee riippuen käytetystä hydridistä ja käyttöolosuhteista. $LaNi_5$ pohjaiset metallihydridit menettävät 23 % vedynvarastointi kyvystään 18100 absorptio/emissio syklin aikana. Olettaen 5 sykliä päivässä tämä olisi hieman alle kymmenen vuotta. [59] Tyhjenneiden kaasukenttien ja suolakäivosten elinikä vetyvarastoina on noin 40 vuotta [60].

5. YHTEENVETO / PÄÄTELMÄT

Tuuli- ja aurinkovoima ovat nopeasti kasvavia sähköntuotantomenetelmiä. Hintansa ja ympäristöystävällisyytensä vuoksi tuuli- ja aurinkovoima kasvavat jopa nopeammin kuin aluksi oli ennustettu. Tämä tuuli- ja aurinkovoiman kasvava osuus sähköverkossa aiheuttaa ongelmia sähkön tasaisen laadun kanssa. Jos näitä ongelmia ei otettaisi huomioon esimerkiksi reserviteholla, voisivat lisääntyvä tuuli- ja aurinkovoima pahimmillaan kaataa suomen sähköverkon vaihtelevalla tuotannollaan. Näistä ongelmista huolimatta tuuli- ja aurinkovoiman määrää halutaan kasvattaa, sillä ne ovat ympäristöystävällisiä ja halpoja.

Yksi ratkaisu vaihtelevaan tuotantoon on energian varastointi silloin kun tuotanto ylittää kulutuksen ja energiavaraston käyttäminen, kun kulutus ylittää tuottamisen. Energiavarastoa voitaisiin käyttää sähkön tuottamiseen silloin kun tuotanto on vähäistä ja vaihteluiden tasaamiseen tuuli- ja aurinkovoiman kanssa, jolloin sähkön laatu ei kärsi yhtä paljon. Vety on yksi tavoista varastoida sähköenergiaa. Vetyä voidaan varastoida erilaisilla tavoilla, mutta paras tapa tällä hetkellä on kaasuna luolissa. Kaasumaisen vedyn valmistamiseen hyödynnetään elektrolyysiä, joka on hiilidioksidipäästötöntä, jos siihen käytetty sähkö on vihreää. Tätä tuotettua vetyä voidaan sitten varastoida ja käyttää myöhemmin sähköntuottamiseen. Valitettavasti prosessilla sähkö -> vety -> sähkö on heikko hyötysuhde, vain noin 50 % PEM elektrolysaattorilla, joka on tällä hetkellä käytetyin polttokenno. Tästä syystä edellytyksenä vedyn käyttämiselle hyödyllisenä varastona isossa mittakaavassa tuuli- ja aurinkovoimalle olisi isompi kapasiteetti sähköntuotantoa kuin nyt on. Toinen ongelma vedylle varastona on sen hinta, sillä lyhyellä aikavälillä vety on huomattavasti kalliimpi kuin pumpattu vesivoima ja huomattavasti hitaammin käytettävissä kuin akut. Pitkälläkin aikavälillä vety on kalliimpaa kuin kompressoitu ilma. Vedyn varastoinnin hinnat riippuvat voimakkaasti siitä, miten ja missä muodossa vetyä varastoidaan. Vedyn hyvänä puolena on, että varasto sille voidaan rakentaa paikkoihin, jotka eivät välttämättä sovi muille energianvarastoille.

Vedyllä voisi tänä päivänäkin olla käyttöä sähkön varastona vaikeissa tapauksissa, joissa hinnalla ei ole niin väliä, tai jos muut tavat eivät ole järkevästi toteutettavissa. Esimerkiksi sähköverkosta irti olevalla luonnonsuojelualueella, jonne ei tästä syystä voi rakentaa tuulivoimaa, aurinkopaneelit olisivat varjossa ja aggregaatti tuottaa liikaa päästöjä. Tällöin paras ratkaisu voisi hyvinkin olla vetyvarasto ja polttokenno.

Tulevaisuudessa kun teknologia kehittyy SOEC kennojen osalta tai PEM kennojen hinnat laskevat tarpeeksi, tulee vedystä oikein kilpailukykyinen energianvarasto tuuli- ja aurinkovoimalle. Sitä ennen vety energianvarastona tarvitsee rahallista tukea valtiolta tai EU:lta ollakseen kannattava rakentaa. Vaihtoehtoinen tapa vihreän vedyn hyödyntämiseen sähköverkon kannalta olisi synteettisen metaanin valmistaminen, jota sitten voitaisiin käyttää polttoaineena kaasuturbiineissa. Tässä työssä ei olla käsitelty synteettistä metaania, sillä kun vedystä valmistetaan synteettistä metaania ei vety enää ole energianvarastona vaan siitä tehty synteettinen metaani on. Synteettisellä metaanilla etuna olisi jo olemassa oleva maakaasuverkko ja kaasuturbiinit, joissa synteettistä metaania voitaisiin käyttää.

Työn tehtävänä oli selvittää, millainen varasto vety on tuuli- ja aurinkovoimalle. Teknologinen osaaminen löytyy vedyn käyttämiseen energianvarastona, mutta useimmissa tapauksissa vety on tällä hetkellä liian kallis ratkaisu energianvarastoksi ollakseen kilpailukykyinen verrattuna akkuihin, pumpattuun vesivoimaan tai kompressoituun ilmaan. Vety on siis mahdollinen mutta usein taloudellisesti kannattamaton varasto tuuli- ja aurinkovoimalle, ja sillä on potentiaalia tulla suosituksi energianvarastointimuodoksi teknologian kehittyessä ja hintojen madaltuessa. Jatkotutkimusta tarvittaisiin elektrolysaattoreiden tulevasta hintakehityksestä, mahdollisuuksista käyttää polttokennoja ja vetyä sähköverkon säätövoimana ja vedyn käytöstä energianvarastona verrattuna perinteisimpiin käyttökohteisiin kuten teräksen valmistamiseen.

LÄHTEET

- [1] Eurostat, Renewable energy statistics, päivitetty 16.12.2025. Saatavissa (viitattu 10.1.2026): https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
- [2] Euroopan tilintarkastustuomioistuin, Tuuli- ja aurinkovoima sähköntuotannossa, päivitetty 6.6.2019. Saatavissa (viitattu 10.1.2026) <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/wind-solar-power-generation-8-2019/fi/>
- [3] International Renewable Energy Agency, Renewable Energy Statistics 2025, International Renewable Energy Agency, IRENA; 2025, 11-17 s.
- [4] International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Statistics 2024, International Renewable Energy Agency, IRENA; 2024, 7-13 s.
- [5] Ren Y, Suganthan N, Srikanth N, Ensemble methods for wind and solar power forecasting A state-of-the-art review. Renewable & sustainable energy reviews, Vol.50, Oct 2015 pp.82-91.
- [6] Nwagu CN, Ujah CO, Kallon DVV, Aigbodion VS, Corrigendum to Integrating solar and wind energy into electricity grid for improved power accessibility. Unconventional Resources, Vol.6, Apr 2025, p.100164.
- [7] Suomen Tuulivoimayhdistys, Tuulivoimatuotanto kasvoi 41 prosenttia vuonna 2022, päivitetty 12.1.2023. Saatavissa (viitattu) 12.1.2026. <https://suomenuusiuutuvat.fi/tuulivoimatuotanto-kasvoi-41-prosenttia-vuonna-2022/>
- [8] Kana Padinharu DK, Li G, Zhu Z, Wang P, Clark R, Azar Z, Comparison of direct-drive Vernier wind generators for potential use at ≥ 10 MW power level. IET electric power applications, Vol.18 No.10, Oct 2024, pp.1279-1292.
- [9] Borge Díez D, Icaza-Álvarez DO, Wind turbines: technology, applications and efficiency. 1st ed. New York, New York: Nova Science Publishers, Vol.18, No.11, Jun 2025, p.2746.
- [10] Chiras DD, Sagrillo M, Woofenden I, Wind power basics. 1st ed. Gabriola Island, BC, Canada: New Society Publishers, 2010, 32 s.
- [11] Ragheb, Magdi, Ragheb, Adam, "Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio" In Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. London-IntechOpen. 2011, 19–29. s
- [12] Vestas Wind Systems A/S, V236-15MW, päivitetty 27.10.2021. Saatavissa (viitattu 8.3.2022) <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW>
- [13] Dongfang Electric, The World's largest 26 MW Offshore Wind Turbine Rolls Off the Line, päivitetty 11.6.2024. Saatavissa (viitattu 22.8.2025) <https://dew.dongfang.com/en/info/1017/1109.htm>
- [14] Power Technology, The world's 10 biggest wind turbines, päivitetty 1.1.2014. Saatavissa (viitattu 14.3.2022) <https://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-biggest-wind-turbines-4154395/>

- [15] Energiavirasto, Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvoi 45 prosenttia vuonna 2020, päivitetty 17.6.2021. Saatavissa (viitattu 10.3.2022) <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-kasvoi-45-prosenttia-vuonna-2020-pientuotantoa-lahes-300-megawattia>
- [16] Aldo Di Carlo, Enrico Lamanna, Narges Yaghoobi Nia, Photovoltaics, In: EPJ Web of Conferences, Vol.246, 2020, p.5.
- [17] National Laboratory of the Rockies, Best Research-Cell Efficiency Chart, päivitetty 3.4.2025. Saatavissa (viitattu 28.6.2025) <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [18] Patterson JD, Aydin M, Crotwell AM, Pétron G, Severinghaus JP, Krummel PB, Reconstructing atmospheric H₂ over the past century from bi-polar firn air records, Climate of the past, Vol.19, No.12, Dec 2023, pp.2535–2550.
- [19] U.S Department of Energy, Hydrogen Production Processes, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-processes>
- [20] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Natural Gas Reforming, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [21] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Biomass Gasification, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>
- [22] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Electrolysis, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [23] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Biomass Derived Liquid Reforming, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026). <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-derived-liquid-reforming>
- [24] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Photobiological, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photobiological>
- [25] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Photoelectrochemical Water Splitting, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photoelectrochemical-water-splitting>
- [26] U.S Department of Energy, Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting, päivitetty 17.3.2026. Saatavissa (viitattu 9.4.2026) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- [27] Li W, Wang H, Shi Y, Cai N, Performance and methane production characteristics of H₂O–CO₂ co-electrolysis in solid oxide electrolysis cells, International journal of hydrogen energy, Vol.34, No.25, Aug 2013, pp.11104–11109.
- [28] Pashchenko D, Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? Renewable energy, Vol.223, Mar 2024, p.120033
- [29] Alberto B, Estimating the efficiency of a PEM electrolyzer fed by a PV plant in NEOM City. Solar Energy Advances Vol 4, 2024, p.100072.
- [30] Dolf G, Emanuele T, Raul M, Hydrogen: A renewable energy perspective, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Sep 2019, pp.26–34

- [31] Tuinema BW, Adabi E, Ayivor PKS, Suarez VG, Liu L, Perilla A, Modelling of large-sized electrolyzers for real-time simulation and study of the possibility of frequency support by electrolyzers, *IET Gener, Transm Distrib*, Vol.14, No10, May 2020, pp.1985-1992
- [32] Muhammad R. Usman, Hydrogen storage methods: Review and current status, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 167, Oct 2022, p.112743.
- [33] Preuster P, Alexander A, Wasserscheid P, Hydrogen storage technologies for future energy systems, *Annu Rev Chem Biomol Eng*, Vol8. No.1, Jun 2017, pp.445-471.
- [34] Rivard E, Trudeau M, Zaghbi K, Hydrogen storage for mobility: a review, *Materials*, Vol.12, No.12, Jun 2019, p.1973.
- [35] Barthelemy H, Weber M, Barbier F, Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives, *Int J Hydrogen Energy*, Vol.42, No.11, Mar 2017, pp.7254-7262.
- [36] Zhou L, Zhou YP, Sun Y, Enhanced storage of hydrogen at the temperature of liquid nitrogen, *Int J Hydrogen Energy*, Vol.29, No.3, Mar 2004, pp.319-322.
- [37] Du XM, Wu ED, Physisorption of hydrogen in A, X and ZSM-5 types of zeolites at moderately high pressures, *Chin J Chem Phys*, Vol.19, No.5, Oct 2006, pp.457-462.
- [38] Langmi HW, Ren J, North B, Mathe M, Bessarabov D, Hydrogen storage in metal-organic frameworks: a review, *Electrochim Acta*, Vol.128, May 2014, pp.368-392.
- [39] Usman MR, Cresswell D, Options for on-board use of hydrogen based on the methylcyclohexane-toluene-hydrogen system, *Int J Green Energy*, Vol.10, No.2, Jan 2013, pp.177-189
- [40] Khafidz NZA, Yaakob Z, Lim KL, Timmiati SN, The kinetics of lightweight solidstate hydrogen, *Int J Hydrogen Energy*, Vol.41, No.30, Aug 2016, pp.13131-13151.
- [41] Nour UM, Awad S, Yusup S, Sufian S, Technical evaluation of current hydrogen storage technologies for vehicles, *J Appl Sci*, Vol.10, No.12, Jun 2010, pp.1200-1203
- [42] Moradi R, Groth KM, Hydrogen storage and delivery: review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, *Int J Hydrogen Energy*, Vol44, No.23, May 2019, pp.12254-12269.
- [43] Ahmed M. Elberry, Jagruti Thakur, Annukka Santasalo-Aarnio, Martti Larmi, Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.46, No.29, Apr 2021, pp.15671-15690.
- [44] Zhu S, Shi X, Yang C, Li Y, Li H, Yang K, Hydrogen loss of salt cavern hydrogen storage, *Renewable energy*, Vol.218, Dec 2023, p.119267.
- [45] Sakintuna B, Lamari-Darkrim F, Hirscher M, Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review, *Int J Hydrogen Energy*, Vol.32, No.9, Jun 2007, pp.1121-1140.
- [46] Graetz J, New approaches to hydrogen storage, *Chem Soc Rev*, Vol.38, No.1, Jan 2009, pp.73-82.
- [47] Zaluska A, Zaluski L, Ström-Olsen JO, Sodium alanates for reversible hydrogen storage, *Journal of alloys and compounds*, Vol.298, No.1, Feb 2000, pp.125-134.
- [48] Okada Y, Sasaki E, Watanabe E, Hyodo S, Nishijima H, Development of dehydrogenation catalyst for hydrogen generation in organic chemical hydride method, *Int J Hydrogen Energy*, Vol.31, No.10, Aug 2006, pp.1348-1356.
- [49] Rahimpour MR, Makarem MA, Kiani P, *Hydrogen Transportation and Storage*. 1st ed. Milton: Taylor & Francis Group; 2025. 3-15 s.

- [50] Moradi R, Groth KM, Hydrogen storage and delivery: review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, *Int J Hydrogen Energy*, Vol.44, No.23, May 2019, pp.12254-12269
- [51] Lipiäinen S, Lipiäinen K, Ahola A, Vakkilainen E, Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy, *International journal of hydrogen energy*, Vol.48, No.80, Sep 2023, pp.31317-31329.
- [52] Loiy A, Onur T, Derek B, An investigation of optimum PV and wind energy system capacities for alternate short and long-term energy storage sizing methodologies, *International Journal of Energy Research*, Vol.43, No.1, Jan 2019, pp.204-218.
- [53] Klumpp, Florian, Comparison of pumped hydro, hydrogen storage and compressed air storage for integrating highshares of renewable energies- Potential, cost-comparison and ranking, *Journal of Energy Storage*, Vol.8, Nov 2016, pp.119-128.
- [54] Kistner L, Bensmann A, Minke C, Hanke-Rauschenbach R, Comprehensive techno-economic assessment of power technologies and synthetic fuels under discussion for ship applications, *Renewable & sustainable energy reviews*, Vol.183, Sep 2023, p.113459
- [55] Danebergs J, Deledda S, Can hydrogen storage in metal hydrides be economically competitive with compressed and liquid hydrogen storage?, A techno-economical perspective for the maritime sector, *International journal of hydrogen energy*, Vol.50, Jan 2024, pp.1040-1054.
- [56] Khakimov R, Moskvina A, Zhdaneev O, Hydrogen as a key technology for long-term & seasonal energy storage applications, *International journal of hydrogen energy*, Vol.68, May 2024, pp.374-381.
- [57] Bionaz D, Marocco P, Ferrero D, Sundseth K, Santarelli M, Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications, *Energy reports*, Vol.8, Nov 2022, pp.5080-5092.
- [58] J. P. Sass, G. Carmouche, R. Hunter, B. Meneghelli, R. E. Obregon, and J. E. Fesmire, Operational history of liquid hydrogen tank with glass bubbles insulation, *Cryogenic Engineering Conference Tucson*, Sep 2015, pp.1-10.
- [59] Boris P Tarasov, Mikhail S Bocharnikov, Yuri B Yanenko, Pavel V Fursikov, Konstantin B Minko and Mykhaylo V Lototsky, Metal hydride hydrogen compressors for energy storage systems: layout features and results of long-term tests, *JPhys Energy*, Vol.2, No.2, Apr 2020, p.24005.
- [60] Fangxuan C, Zhiwei M, Hadi N, Bailian C, Mohamed M, Jolante V, Capacity assessment and cost analysis of geologic storage of hydrogen: A case study in Intermountain-West Region USA, *International journal of hydrogen energy*, Vol.48, No.24, Mar 2023, pp.9008-9022.