Tampereen yliopisto

Juho Huhtala

UUSIUTUVAN ENERGIAN VARASTOINTI VETYNÄ JA LÄMPÖNÄ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Elokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Juho Huhtala: Uusiutuvan energian varastointi vetynä ja lämpönä
Renewable energy storage as hydrogen and heat
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan opintosuunta
Elokuu 2024

Uusiutuvat energiantuotantomuodot ovat keskeisessä roolissa hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä, minkä vuoksi niiden tuotantokapasiteettia halutaan kasvattaa merkittävästi tulevaisuudessa. Lisäksi fossiilisista polttoaineista halutaan päästä eroon, joten tilalle täytyy kehitellä korvaavia hiilidioksidivapaita ratkaisuja. Uusiutuvista energiantuotantomuodoista erityisesti aurinko- ja tuulivoiman tuotanto riippuvat täysin vallitsevista sääolosuhteista. Vaihteleva uusiutuva energia tarvitsee siis rinnalleen energian varastointia. Uusiutuville energiantuotantomuodoilla tuotettua sähköenergiaa voidaan varastoida tai muuntaa toiseen energiamuotoon myöhempää käyttöä varten.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään uusiutuvan energian varastointia vedyksi ja lämmöksi. Työssä keskitytään erityisesti aurinko- ja tuulivoimalla tuotettuun vihreään vetyyn, sen varastointiin sekä varastoinnin haasteisiin. Lisäksi työssä käsitellään lämpöenergian varastointia, siihen liittyviä kaukolämpösovelluksia sekä sähköistyvää kaukolämpöä. Lopuksi käydään läpi vielä uusia teknologioita, joita vetyyn ja lämpöenergian varastointiin liittyy sekä otetaan katsaus Suomen tilanteeseen uusiutuvan energian varastoinnin projektien osalta.

Vetyä on esitetty ratkaisuksi fossiilisten polttoaineiden sijalle sekä energiavarastoksi vedyn sisältämän suuren energiasisällön vuoksi. Vihreää vetyä voidaan tuottaa päästöttömästi veden elektrolyysissä eri elektrolyysiteknologioilla. Vetyä voidaan varastoida fysikaalisilla tai materiaalipohjaisilla menetelmillä. Fysikaalisista menetelmistä yleisin varastointitekniikka on vedyn paineistaminen ja säilöminen painesäiliöihin. Yksi potentiaalinen materiaalipohjainen varastointimuoto on vedyn sitominen metallihydridiin. Vedystä voidaan myös jatkojalostaa polttoaineita, kuten metaania ja ammoniakkia, raskaan liikenteen tai laivaliikenteen käyttöön. Vedyn varastointiin liittyy kuitenkin paljon haasteita vedyn pienen molekyylikoon vuoksi.

Lämpöä varastoidaan yleisimmin kaukolämpöverkoissa eristettyihin kuumavesisäiliöihin eli kaukolämpöakkuihin. Kaukolämmön sähköistymisen vuoksi uusiutuvilla tuotantomuodoilla tuotettua sähköä voidaan varastoida lämmöksi sähkökattiloilla, joiden yhteydessä on lämpövarasto. Uusiutuvan energian varastointi lämpönä on yhtenä tekijänä mahdollistamassa siirtymisen eroon fossiilisista polttoaineista kaukolämmön tuotannossa. Ennen kuin vetyä voidaan alkaa laajemmin hyödyntämään teollisuudessa, on ratkaistava, kuinka vetyä tulisi varastoida ja kuljettaa toimivalla tavalla.

Avainsanat: uusiutuva energia, vety, vedyn varastointi, lämpövarasto, kaukolämpö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. SÄÄRIIPPUVAINEN SÄHKÖNTUOTANTO 3
2.1 Tuulivoima 3
2.2 Aurinkoenergia 5
3. VETY ENERGIANKANTAJANA 7
3.1 Vedyn tuotantomuodot 7
3.2 Vedyn varastointimenetelmät 9
3.3 Haasteet ja mahdollisuudet 12
3.4 Suomen vetyprojektien nykytilanne 13
4. LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI 15
4.1 Uusiutuvan energian lämmön lähteet 15
4.2 Lämpöenergian varastointimenetelmät 16
4.3 Tuntuvan lämpövaraston hyödyntäminen kaukolämmössä 18
5. ENERGIANVARASTOINTITEKNOLOGIOIDEN TULEVAISUUS 20
5.1 Uudet innovaatiot ja kehittyvät teknologiat 20
5.2 Energian varastoinnin rooli Suomessa 21
6. JOHTOPÄÄTÖKSET 24
LÄHTEET 26

.

1. JOHDANTO

Maailmassa puhutaan tällä hetkellä hyvin paljon ilmastonmuutoksesta ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä. Energiantuotanto on yksi suurimmista kasvihuonekaasujen aiheuttajista maailmassa. Noin 80 % ilmaston lämpenemistä aiheuttavista kasvihuonekaasuista tulevat energian tuotannosta, kulutuksesta sekä liikenteestä Suomessa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022). Aihe on ollut vahvasti esillä mediassa ja onkin alettu puhua niin sanotusta energiakriisistä. Suomi on aloittanut kansallisen ilmasto- ja energiastrategiansa toteuttamisen, jossa pyritään hiilineutraaliin Suomeen vuoteen 2035 mennessä. Sama tavoite on EU:lla vuoteen 2050 mennessä. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022)

Hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi on hyvin tärkeää, että luovutaan fossiilisista polttoaineista ja siirrytään kohti uusiutuvia energiantuotantomuotoja. Uusiutuvat energian tuotantomuodot ovat olleet hyvin voimakkaassa kasvussa viime vuosien aikana. Tuulivoiman ja aurinkosähkön teknologioiden kehitys ja yleistyminen ovat mahdollistaneet taloudellisesti kannattavan uusiutuvan energian tuotannon. Tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotanto vaihtelee kuitenkin täysin sääolojen mukaan, mikä tuo sähköverkkoon epästabiiliutta. Säästä riippuvien sähkön tuotantomuotojen lisääntyessä energiajärjestelmä tarvitsee energiavarastoja, joihin ylimääräistä tuotantoa voidaan syöttää ja myöhemmin käyttää sääolosuhteiden ollessa epäsuotuisat sähköntuotannolle.

Vetytalous on yksi jo pitkään esillä ollut mahdollinen ratkaisu uusiutuvan energian varastointiin. Vetytalous käsittää vedyn tuotannon, varastoinnin sekä kuljetuksen. Vetytaloudesta puhuttaessa tarkoitetaan siis järjestelmää, jossa vety on pääasiallinen energiankantaja. Tavoitteena vetytaloudessa on, että vetyä tuotettaisiin suurilta osin helposti saatavilla olevista uusiutuvista energialähteistä. (Abe et al., 2019) Vetyä, joka valmistetaan elektrolyysissä uusiutuvilla tuotantomuodoilla tuotetulla sähköllä, kutsutaan vihreäksi vedyksi (Ajanovic et al., 2022). Tässä työssä keskitytäänkin lähinnä vihreän vedyn tarkasteluun.

Toinen energiasektorilla merkittävästi noussut trendi ovat sähkökattilat ja lämpöenergian varastointi. Kaukolämpö on yksi merkittävä, paljolti vielä polttoon perustuva ilmapäästöjen aiheuttaja. Fossiilisten polttoaineiden polttamista halutaan vähentää, joten kaukolämmön tuottamiseen tarvitaan uusia ”vihreitä” ratkaisuja. Kaukolämpö on alkanut sähköistyä sähkökattiloiden käyttöönoton myötä. Sähkökattiloita ajetaan pääasiassa uusiutuvilla

tuotantomuodoilla tuotetulla sähköllä, jolloin tuotannosta ei synny kasvihuonekaasuja. Sähkökattiloissa lämmitetty vesi voidaan viedä suoraan kaukolämpöverkkoon tai varastoida kaukolämpöakkuun.

Työn tavoitteena on selvittää, kuinka vety ja lämpöenergian varastointi olisivat ratkaisemassa kasvavan uusiutuvan energian ylituotannon varastointia. Työssä käsitellään vihreän vedyn eri tuotanto- sekä varastointimenetelmiä, vedyn mahdollisuuksia ja haasteita. Uusiutuvan energian varastointi on rajattu vedyn ja lämpöenergian varastointiin. Työssä käydään läpi myös lämpöenergian varastointimenetelmiä sekä kaukolämmön sähköistymistä. Työ tarkastelee muun muassa sähkökattiloilla tuotetun lämpöenergian varastointia kaukolämpö- ja hiekka-akkuihin.

Luvussa 2 käydään lyhyesti läpi säästä riippuvat sähköenergian tuotantomuodot. Luvussa 3 käsitellään vedyn valmistusta elektrolyysilaitteistoilla, vedyn varastointimenetelmiä, varastoinnin haasteita sekä vetyprojekteja Suomessa. Lämpöenergian varastointiin ja kaukolämmön sähköistymiseen perehdytään luvussa 4. Luvussa 5 käsitellään tulevaisuuden teknologioita sekä Suomen tulevaisuuden roolia energian varastoinnissa. Viimeisenä lukuna 6 on työn johtopäätökset.

2. SÄÄRIIPPUVAINEN SÄHKÖNTUOTANTO

Uusiutuvista energialähteistä tällä hetkellä voimakkaimmin kasvussa ovat tuulivoima ja aurinkoenergia. Niillä tuotetun sähköenergian määrä riippuu voimakkaasti vallitsevista sääolosuhteista. Kun tuulee, sähköä on paljon saatavilla, kun taas aurinko paistaa, aurinkopaneelit tuottavat hyvin sähköenergiaa. Kun ei tuule, yleensä paistaa aurinko ja toisin päin. Sääriippuvaiset tuotantomuodot siis täydentävät hyvin toisiaan. Tämän vuoksi aurinkoenergiaa onkin alettu rakentamaan myös tuulipuistojen yhteyteen. Parhaimmillaan sähköä on suotuisten sääolosuhteiden vuoksi saatavilla hyvin paljon, jolloin tuotanto ylittää kulutuksen ja tarvitaan varastointikeinoja, mihin ylimääräinen sähkö voidaan varastoida. (Haanpää, 2022) Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi tuulivoiman ja aurinkoenergian periaatteet sekä katsaus Suomen tilanteeseen.

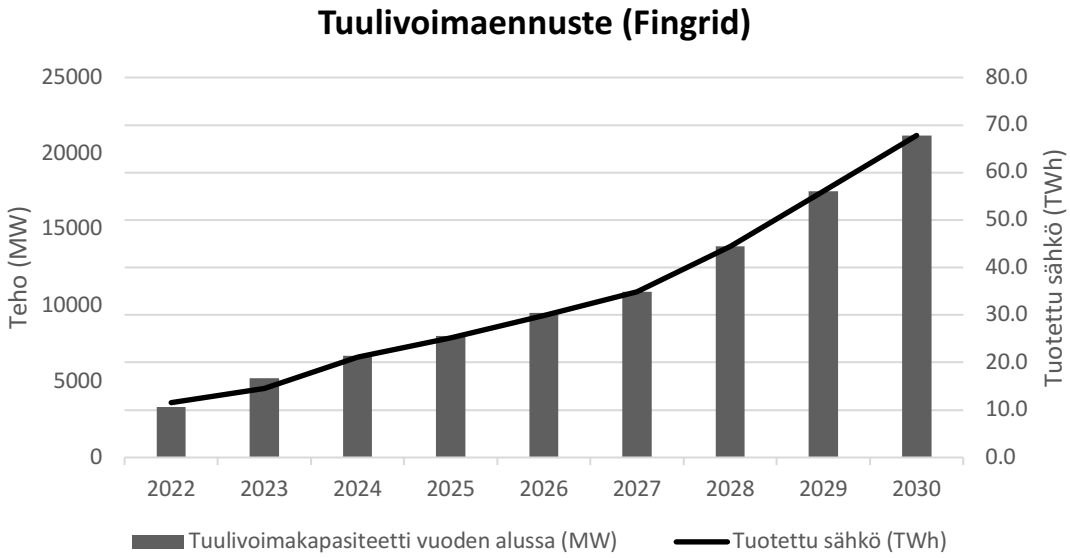
2.1 Tuulivoima

Tuulivoiman tuotanto tuuliturbiineilla perustuu ilmamassan liike-energian muuntamiseen sähköiseksi energiaksi. Tuulivoimalaa suunniteltaessa katsotaan tarkasti, mitkä ovat keskimääräiset tuulennopeudet alueella vuoden aikana. Tuulen nopeus vaihtelee hyvin paljon paikan mukaan. Tuulivoimalan roottori suunnataan aina kohtisuoraan tuulta vasten. Roottori ja naselli eli tuulivoimalan konehuone saadaan käännettyä pienen moottorin avulla oikeaan suuntaan. Roottorin lapojen muotoilulla ja lapakulmien oikealla säädöllä saadaan roottoriin mahdollisimman suuri nostovoima ja tuulesta energiaa tuuliturbiinin pyörimisenergiaksi ja edelleen sähköksi. (Breeze, 2015).

Suomessa suurimmat tuulen nopeudet saavutetaan länsirannikolla meren lähettyvillä. Siksi tuulipuistot ovatkin hyvin voimakkaasti painottuneet länteen. Tuulivoimakapasiteetin kasvu Suomessa on ollut hyvin voimakasta viime vuosien aikana. Tuulivoimasta on tullut yksi merkittävimmistä sähköntuotantomuodoista Suomessa. Vuoden 2023 loppuun mennessä asennettu tuulivoimakapasiteetti oli lähes 7000 MW, mikä on yli puolet koko Suomen sähkötehon tarpeesta päivittäin. Kuvasta 1 nähdään, että tuulivoiman osuus on kasvanut erittäin nopeasti vuodesta 2020 vuoteen 2023 (kasvu 170 %). (Mikkonen, 2023) Tuulivoiman voimakkaan kasvun ja vaihtelevan sähkön saatavuuden vuoksi energian varastointi nähdään houkuttelevana vaihtoehtona sähköverkon tasapainottamiseen.

Kuva 1. *Suomeen asennettu kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti. Muokattu lähteestä (Mikkonen, 2023).*

Fingrid ennustaa liityntäkyselyiden ja sopimusten perusteella Suomen tuulivoimakapasiteetin kasvavan 21000 MW:iin vuoteen 2030 mennessä eli jopa kolminkertaistuvan vuoden 2023 kapasiteetista. Kuvassa 2 on esitetty Fingridin tuulivoimaennuste vuoteen 2030 saakka. Kuvaajasta huomataan, että myös tuotetun sähkön määrä yli kolminkertaistuisi ennusteen toteutuessa, jolloin myös kulutuksen tulisi nousta reilusti. Vuonna 2023 Suomen tuulivoimalat tuottivat sähköä 14,4 TWh, kun sähkön kokonaistuotanto Suomessa oli noin 78 TWh. Fingridin ennusteen mukaan tuotantomäärän kasvu olisi siis lähes viisinkertainen sähköenergian määrän osalta. (Fingrid, 2024)



Kuva 2. *Tuulivoiman kasvuennuste Suomessa. Muokattu lähteestä (Fingrid, 2024).*

2.2 Aurinkoenergia

Auringossa tapahtuvat ydinfuusioreaktiot vapauttavat jatkuvasti aurinkoenergiaa, joka välittyy maan pinnalle sähkömagneettisena säteilynä. Noin 30 % auringosta tulevasta säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen ja loput 70 % imeytyy pääasiassa maan ja meren pintakerrokseen. Kun taivas on pilvetön, auringosta tulee sähkömagneettista säteilyä maan pinnalle noin 1000 W/m^2. (Alva et al., 2018)

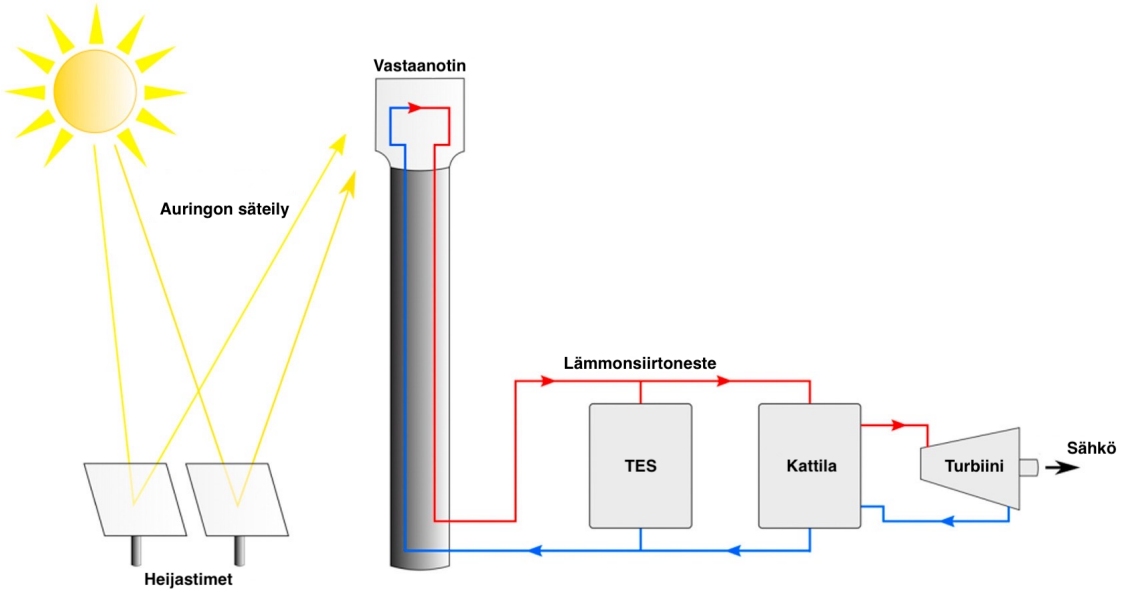
Aurinkoenergiaa hyödyntämällä voidaan tuottaa sähköä kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa tuottaa sähköä auringosta tapahtuu aurinkoenergiaa absorboimalla ja muuntamalla se sähköksi aurinkokennojen avulla. Toinen tapa on tuottaa ensin aurinkoenergiasta lämpöä keskittämällä lämpö yhteen pisteeseen ja käyttämällä saatu lämpö lämpövoimakoneen, kuten höyryturbiinin, pyörittämiseen. (Alva et al., 2018; Sarvar-Ardeh et al., 2024)

Aurinkokennot koostuvat kahdesta eri puolijohdetyypistä, p- ja n-tyypin piistä. P-tyypin pii valmistetaan douppaamalla sitä eli lisäämällä siihen atomeja, kuten booria tai galliumia, joilla on yksi elektroni vähemmän ulommalla energiatasollaan kuin piillä. Koska näillä on yksi elektroni vähemmän kuin piillä, syntyy elektronivakanssi eli ”reikä”. N-tyypin pii valmistetaan lisäämällä siihen atomeja, kuten fosforia, joilla on yksi elektroni enemmän kuin piillä. Fosfori sitoutuu piitä ympäröivien atomiensa kanssa mutta yksi elektroni ei osallistu sidokseen. (American Chemical Society, 2014)

P- ja n-tyypin puolijohteet muodostavat pn-liitoksen, jossa lähellä liitoskohtaa liitoskohdan toisella puolella olevat elektronit siirtyvät liitoskohdan toisella puolella (p-tyypin kerros) oleviin reikiin. Näin liitoksen ympärille syntyy alue, jota kutsutaan tyhjennysalueeksi. Eri puolille syntyy varauserot, jotka luovat sisäisen sähkökentän. Kun p- ja n-tyypin puolet yhdistetään sähköjohtimella, syntyy sähkövirta elektronien siirtyessä p-tyypistä n-tyyppiin. (American Chemical Society, 2014)

Auringosta voidaan tuottaa myös lämpöenergiaa ja varastoida se hetkellisesti myöhempää käyttöä varten. Auringosta voidaan ottaa lämpöenergiaa talteen aurinkokeräimien avulla tai keskitetyllä aurinkovoimalla (engl. Concentrated Solar Power, CSP). CSP-laitos koostuu neljästä pääelementistä: keskittimestä, korkean lämpötilan aurinkovastaanottimesta, nesteen virtausjärjestelmästä ja sähköntuotantoyksiköstä. Keskittäviä teknologioita on monenlaisia, joista kehittyneimpiä ovat paraboliset kaukalokeräimet, lineaariset Fresnel-heijastimet ja paraboliset lautaskeräimet. Keskitetyn aurinkovoimalan yhteyteen voidaan liittää lämpöenergiavarasto, johon voidaan varastoida lämpöenergiaa. Kuvassa 3 on esitetty keskitetty aurinkovoimala, jonka yhteyteen on liitetty lämpöenergiavarasto. Keskitettyä aurinkovoimaa rakennetaan etenkin päiväntasaajan seudulle, missä

auringon säteilyintensiteetti on hyvin suuri ja lämpöenergiaa on mahdollisimman paljon saatavilla. Suomessa aurinkoenergiaa hyödynnetään pääasiassa aurinkokennojen avulla. (Barlev et al., 2011; Pelay et al., 2017)



Kuva 3. *Keskitetty aurinkovoimala, jonka yhteydessä lämpövarasto. Muokattu lähteestä (Pelay et al., 2017).*

Aurinkokennojen hyötysuhde on kasvanut ja kustannukset ovat laskeneet merkittävästi viimeisen 50 vuoden aikana. Tämä on lisännyt aurinkoenergian kannattavuutta huomattavasti ja siksi aurinkovoimaloiden rakentaminen on kiihtynyt voimakkaasti koko maailmassa. (Sarvar-Ardeh et al., 2024) Suomessa aurinkovoimaloihin on alettu investoimaan hyvin voimakkaasti. Aurinkopaneeliratkaisujen hinnat ovat laskeneet sen verran, että aurinkovoima on tällä hetkellä halvin sähkön tuotantomuoto. Aurinkovoimaloita rakennetaan tuulipuistojen yhteyteen, jolloin aurinko- ja tuulivoiman sähkön tuotanto tukevat toisiaan ja verkkoliityntä on helppo tehdä samaan paikkaan. Fingridin mukaan Suomessa voi olla vuoteen 2030 mennessä aurinkovoimaloita 7 GW:n tehon verran. (Kosonen & Breyer, 2019; Haanpää, 2023)

Aurinkoenergian suurin haittapuoli on sen riippuvuus auringon paisteesta. Ongelman ratkaisuksi aurinkolämpövoimaloissa on kaksi vaihtoehtoa: joko poltetaan jotain polttoainetta tai käytetään lämpövarastoa, joista heikon auringon paisteen aikana saadaan lämpöä. Polttoaineen polttaminen aiheuttaa päästöjä, minkä vuoksi lämpövarasto on parempi vaihtoehto ongelmaan. (Pelay et al., 2017)

3. VETY ENERGIANKANTAJANA

Yksi ratkaisu uusiutuvan energian varastointiin tai muuttamiseen toiseen muotoon on vety. Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine ja sillä on kaikista maailman tunnetuista polttoainesta suurin energiasisältö. Lisäksi vety on kevyin, kestävä ja myrkytön alkuaine. Vetyä voidaan tuottaa päästöttömästi ja poltettaessa päästönä syntyy ainoastaan vettä. Vetyä voidaan tuottaa höyryreformoinnilla tai vedestä sähkövirran avulla elektrolyysissä. Tässä luvussa tarkempaan käsittelyyn otetaan vihreän vedyn tuotanto elektrolyysissä. Vedyn energian varastointikapasiteetti on kaksikertainen useimpiin polttoaineisiin verrattuna. Yksi kilo vetyä sisältää noin 120 MJ energiaa, mikä vastaa noin 33,33 kWh. Yhden vetykilon tuottamiseen tarvitaan noin 9 litraa vettä. (Abe et al., 2019; Jang et al., 2022) Tässä luvussa käsitellään vedyn tuotantomenetelmiä, varastointia, mahdollisuuksia sekä haasteita.

3.1 Vedyn tuotantomuodot

Vetyä valmistetaan yleisimmin maakaasusta höyryreformoinnin avulla. Höyryreformoinnissa vedestä ja metaanista saadaan reformoitua korkeassa lämpötilassa hiilidioksidia ja vetyä. Reformoinnissa syntyy kuitenkin paljon hiilidioksidipäästöjä, minkä vuoksi se ei ole ympäristöystävällinen tapa tuottaa vetyä. Höyryreformoinnilla tuotettua vetyä kutsutaan harmaaksi vedyksi, mikä tarkoittaa, että vedyn tuottamiseen on käytetty fossiilisia polttoaineita. (Ajanovic et al., 2022; Carapellucci & Giordano, 2020)

Vihreää vetyä tuotetaan veden elektrolyysissä uusiutuvalla energialla tuotetusta sähköstä. Elektrolyysiteknologioita vedyn valmistamiseksi on useita erilaisia. Elektrolyysiteknologiat voidaan jakaa kolmeen yleisimpään teknologiaan, jotka ovat alkalielektrolyysi (ALK), protoninvaihtokalvoelektrolyysi (PEM) sekä kiinteäoksidikenno (SOEC). Näistä teknologioista alkalinen ja PEM-teknologia ovat jo kaupallisessa käytössä, mutta SOEC on vielä kehitysvaiheessa ja kalleutensa vuoksi vielä vähän käytetty teknologia. Eri teknologioiden hyötysuhde vaihtelee välillä 70–90 %. SOEC on kuitenkin lupaava tulevaisuuden teknologia, koska sen hyötysuhde yltää jopa 90 %:iin. (Jang et al., 2022; Pashchenko, 2024)

Kokonaisreaktio on jokaisessa teknologiassa samanlainen, mutta ero tulee anodilla ja katodilla tapahtuvissa reaktioissa. Kokonaisreaktiossa vesi hajoaa hapeksi ja vedyksi:

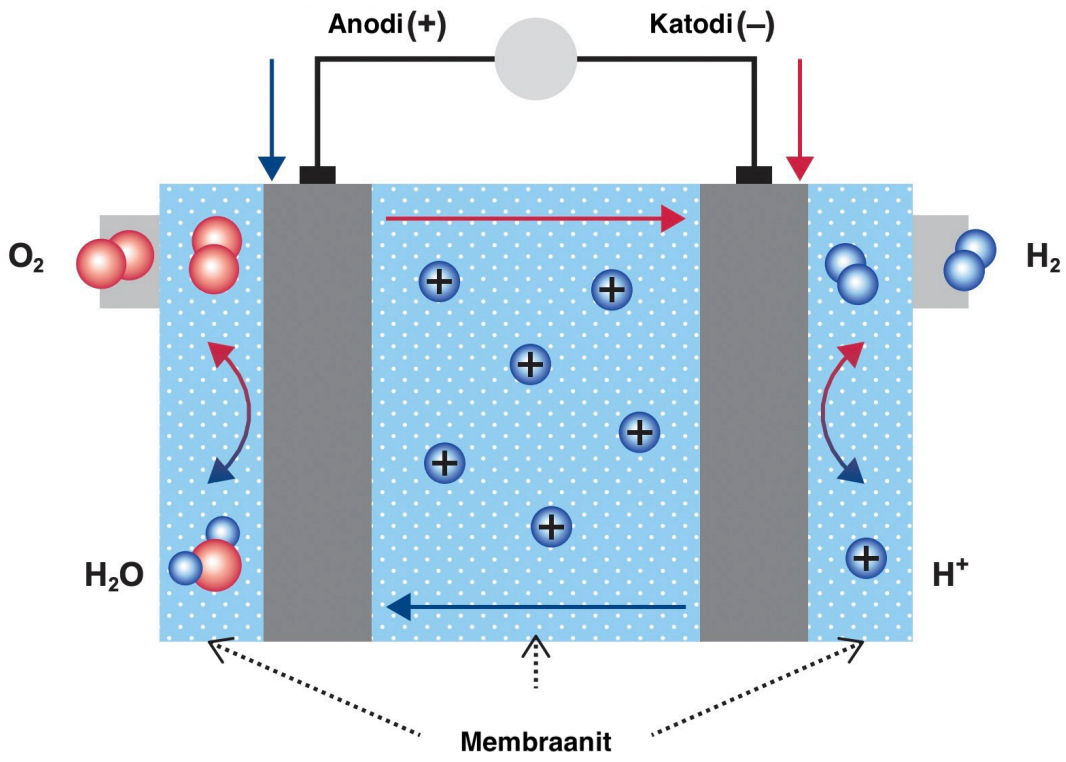
$$\mathrm{H_2O} \rightarrow \frac{1}{2}\mathrm{O_2} + \mathrm{H_2} \tag{1}$$

Reaktiossa vapautunut happi päästetään ilmakehään tai varastoidaan ja käytetään teollisuuden prosesseissa tai lääketieteessä. (Pashchenko 2024; IRENE 2022)

Yleisin ja käytetyin elektrolyysiteknologia on alkalielektrolyysi. Alkaliteknologiaa on eniten tutkittu ja käyttöä on optimoitu. Alkalielektrolyysikennoston rakenne on yksinkertainen ja kestävä sekä helppo valmistaa. Laitteisto toimii 70–90 °C:n lämpötilassa ja 1–30 baarin paineessa. Hyötysuhde on 70–80 % välillä eli 20–30 % syötetystä energiasta karkaa hukkalämpönä ilmaan. Elektrolyyttinä alkalielektrolyysissä käytetään natriumhydroksidia. Prosessi ei vaadi kalliita katalyyttejä, minkä vuoksi laitteiston tuotantokustannukset ovat pienet verrattuna muihin teknologioihin. Ongelmina alkalielektrolyysilaitteistossa on rajoitettu sähkövirran tiheys, joka johtuu ohmisista häviöistä sekä kuplien muodostumisesta elektrodien pinnalle. Laitteisto reagoi siis hitaasti jaksottaiseen sähkön syöttöön, minkä vuoksi se ei välttämättä ole riittävän joustava säästä riippuvan sähköntuotannon hyödyntämiseen. (Jang et al., 2022; Pashchenko, 2024; Yu et al., 2021)

Toinen jo kaupallisessa käytössä oleva lupaava elektrolyysiteknologia vihreän vedyn tuotantoon on protoninvaihtokalvoelektrolyysi (engl. Proton Exchange Membrane, PEM). PEM-elektrolyysissä vedestä hajotetut protonit siirretään protoninvaihtokalvon kautta anodilta katodille ja elektronit siirtyvät ulkoisen piirin kautta. Kiinteät polymeerit toimivat elektrolyysissä samanaikaisesti elektrolyyttinä sekä kalvoina. Polymeerien rakenne on kompakti, mikä on eduksi laitteiston pienentämisen kannalta. Pienempi elektrolyysilaitteisto voi vähentää laitoksen rakennuskustannuksia. Kuva 4 on kaaviokuva PEM-elektrolyysilaitteistosta ja sen keskeisestä toiminnasta. (Schmidt et al., 2017)

PEM-elektrolyysi toimii matalassa 50–80 °C:n lämpötilassa 20–200 baarin paineessa. Verrattuna alkalielektrolyysiin PEM voi toimia suuremmalla virrantiheydellä ja tuottaa puhtaampaa (99,99 %) vetyä. Puhtaampaa vetyä on hyvä käyttää myöhemmin esimerkiksi polttokennoissa, joissa vety muutetaan takaisin sähköksi käänteisellä elektrolyysillä. PEM-elektrolyysissä katalyyttinä käytetään platinaa, jota on melko vähän saatavilla. Suurimpana ongelmana onkin laitteiston korkea hinta. PEM-elektrolyysi on kuitenkin teknologioista soveltuvin vihreän vedyn tuotantoon. (Jang et al., 2022; Pashchenko, 2024)



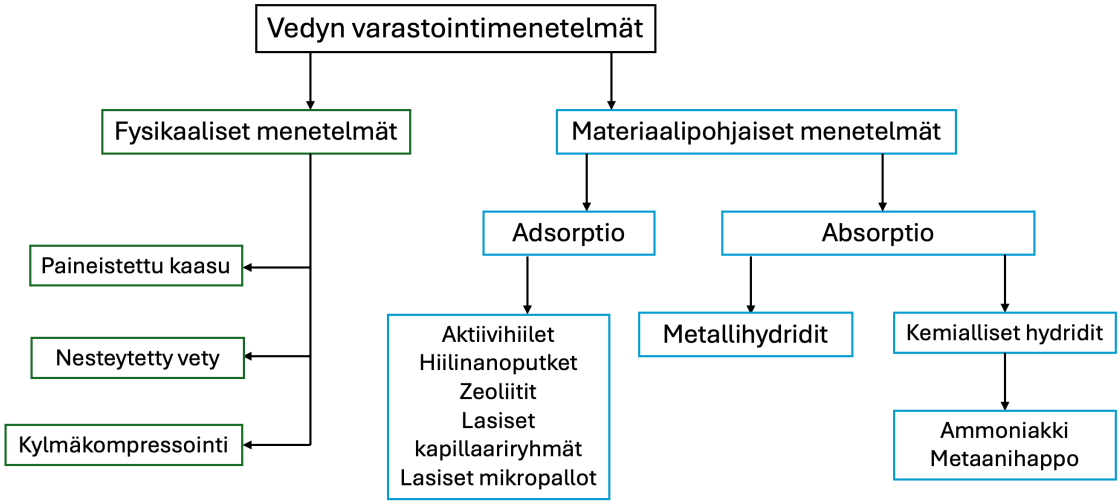
Kuva 4. *Kaaviokuva PEM-elektrolyysilaitteistosta. Muokattu lähteestä (MIT Energy Initiative, 2022).*

Kiinteäoksidielektrolyysi (engl. Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) toimii huomattavasti korkeammassa lämpötilassa kuin alkali- ja PEM-elektrolyyserit. SOEC on vielä eniten kehitysvaiheessa oleva teknologia. Lämpötila kennostossa täytyy pitää 700–850 °C:n välillä. Toisaalta SOEC toimii matalassa 1 baarin paineessa. Korkean lämpötilan ansiosta SOEC-teknologialla voidaan saavuttaa korkeampi energiatehokkuus eli sähköenergiaa tarvitaan vähemmän veden hajottamiseen elektrolyysissä. (Jang et al., 2022; Schmidt et al., 2017) SOEC kennoston hyötysuhde voi olla yli 90 %. SOEC-järjestelmissä käytetään elektrolyyttinä keraamisia aineita, jotka kestäisivät hyvin korkeita lämpötiloja. Materiaalitekninen kehitystyö ja laitteiston käyttölämpötilan alentaminen ovat merkittävässä roolissa teknologian kaupallistamiseksi. (Pashchenko, 2024; Schmidt et al., 2017).

3.2 Vedyn varastointimenetelmät

Vedyn varastointimenetelmät voidaan karkeasti jakaa fysikaaliseen ja materiaalipohjaiseen varastointiin. Fysikaalisiin menetelmiin lukeutuvat paineistettu kaasu, nestemäinen vety ja vedyn kylmäkompressoiminen. Fysikaalisista menetelmistä paineistettu kaasu on tällä hetkellä eniten käytössä oleva teknologia. Materiaalipohjaisessa vedyn varastoin-

nissa vety on sidottu toiseen aineeseen. Materiaalipohjaiseen varastointiin kuuluvat metallihydridit sekä vedystä jalostetut liikenteen polttoaineet, kuten metaani ja ammoniakki. Fysikaalinen adsorptio zeoliitteihin, hiilimateriaaleihin ja lasisiin mikropalloihin ovat uudempia vedyn varastointiteknologioita. (Moradi & Groth 2019) Kuvassa 5 esitellään vedyn yleisimmät varastointimenetelmät sekä joitain vähemmän tutkittuja menetelmiä.



Kuva 5. *Vedyn varastointimenetelmät. Muokattu lähteestä (Hassan et al., 2021).*

Yleisimmin vetyä varastoidaan fyysisesti paineistetun vetykaasun muodossa painesäiliöihin. Vedyn tiheys on todella pieni, joten sen varastointi vaatii korkean paineen ja alhaisen lämpötilan. Polttokennosovellukset, joissa vety voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi, vaativat, että vety paineistetaan 350–700 baarin paineeseen. Paineistetun vedyn varastointisäiliöihin käytetään perinteisesti terästä ja alumiinia. Paremman lujuuden ja iskunkestävyyden takaamiseksi kevyempi ratkaisu on kuitenkin käyttää hiilikuituvahvisteista muovikomposiittisäiliötä. (Abe et al., 2019; Hassan et al., 2021) Vetyä voidaan kuitenkin varastoida painesäiliöihin verrattain pieniä määriä (enintään muutama MWh) (Matos et al., 2019). Sen vuoksi uusia varastointimenetelmiä etsitään ja kehitetään koko ajan.

Yksi vaihtoehto paineistetun vedyn varastointiin ovat suuret luolastot, joihin vetyä voitaisiin varastoida suurempia määriä. Näiden potentiaalia tutkitaan paljon ja luolastot voisivat toimia kausivarastoina vedylle. Suuret luolastot, kuten vanhat suolakaivokset tai tyhjentyneet maakaasukentät voisivat olla hyviä vaihtoehtoja luolavarastoille. Vety vaatii hyvät tiivistykset, jotta se ei läpäise luolan seinämiä ja karkaa luolasta. Suolaluolastot ovat tässä mielessä hyviä vedyn varastointiin, koska suola hylkii vetyä ja on erittäin kaasutiivistä. Maanalaisiin suolaluolastoihin voitaisiin varastoida vetyä jopa 500 000 m^3 200 baarin paineessa, mikä vastaa noin 167 GWh:n varastointikapasiteettia ja on sähkönä noin 100 GWh. (Matos et al., 2019; Tarkowski et al., 2024; Zivar et al., 2021)

Vedyn fyysiseen varastointiin liittyvä toinen tapa on varastoida vetyä nestemäisessä olomuodossa eristettyihin säiliöihin. Nestemäisenä vety on tiheämpää, mutta vedyn nesteyttäminen vaatii ääriolosuhteet ja paljon energiaa. Nestemäisen vedyn kiehumispiste on 20 K eli -253,15 °C normaalissa ilmanpaineessa eli 1,013 baarin paineessa. (Abe et al., 2019; Moradi and Groth, 2019)

Vedyn kylmäkompressoinnissa vety paineistetaan 150 baariin alhaisessa -233 °C:n lämpötilassa. Lämpötila lasketaan lähelle nesteytyslämpötilaa, jotta vedyn tiheys saataisiin mahdollisimman korkeaksi ja näin saavutettaisiin mahdollisimman hyvä varastointiteho. Kylmäkompressoinnin haasteena on se, että painesäiliö pitäisi saada eristettyä niin hyvin, että vety pysyy koko ajan hyvin alhaisessa lämpötilassa. (Hassan et al., 2021)

Vedyn fysikaalinen varastointi edellyttää siis korkeita paineita tai hyvin matalia lämpötiloja, jotta vetyyn voitaisiin saavuttaa riittävä varastointitiheys. Korkeisiin paineisiin ja lämpötiloihin liittyvät omat riskinsä. Tämän vuoksi on esitetty vaihtoehtoisia materiaalipohjaisia varastointiteknologioita, joilla voidaan saavuttaa suuri vedyn varastointikapasiteetti kohtuullisissa paineissa ja lämpötiloissa. (Hassan et al., 2021)

Yksi lupaavimmista materiaalipohjaisista vedyn varastointimenetelmistä on metallihydridit. Metallihydrideillä voidaan saavuttaa suuri vedyn tilavuuden energiatiheys ja hyvä varastointihyötysuhde. Useilla metalleilla on kyky absorboida vetyä kohtalaisessa paineessa ja lämpötilassa. Metallihydrideissä vety sitoutuu vahvoilla kemiallisilla sidoksilla metalliin. Metallihydrideistä voidaan vapauttaa vetyä joko kuumentamalla tai hydrolyysillä eli veden kanssa reagoimalla. Vedyn varastointi ja vapauttaminen metallihydrideistä on suhteellisen yksinkertaista. Kun vetyä halutaan metallihydridiin, se paineistetaan ja tapahtuu eksoterminen reaktio, joka muodostaa metallihydridin. Vety voidaan vapauttaa metallihydridistä endotermisessä reaktiossa korkeassa lämpötilassa ja suhteellisen alhaisessa paineessa. Metallihydridien vetykäsittelyn yhteydessä käytettävät paineet ovat yleensä melko pieniä, korkeintaan 100 baaria. Paine on siis huomattavasti alhaisempi kuin paineistetun kaasun säiliöissä. Alhaisemmat paineet tekevät siis metallihydrideistä turvallisemman vaihtoehdon vedyn varastointiin. (Abe et al., 2019; Andersson & Grönkvist, 2019; Hassan et al., 2021)

Adsorptio on pintaprosessi, jossa molekyyli siirtyy kaasusta tai nesteestä kiinteälle pinnalle. Adsorptiossa vetymolekyylit sitoutuvat materiaalin pintaan van der Waals -sidoksilla, jotka eivät kuitenkaan ole erityisen pitäviä sidoksia. Adsorptioon perustuvia vedyn varastointiin käytettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi hiilipohjaiset materiaalit, hiilinanoputket ja zeoliitit. Menetelmät ovat suhteellisen uusia löytöjä ja vaativat vielä tutkimusta, ennen kuin niitä voisi hyödyntää laajemmin. (Andersson & Grönkvist, 2019)

3.3 Haasteet ja mahdollisuudet

Vedyn varastointi on kompleksinen asia, vetymolekyylien pienen koon vuoksi. Vetymolekyylit voivat pitkällä aikavälillä läpäistä esimerkiksi teräksisen painesäiliön seinämiä ja haurastuttaa materiaaleja. Vety voi päästä karkaamaan säiliöistä tai paine laskee ja vedyn energiatiheys pienenee. Lisäksi korkeisiin paineisiin liittyy turvallisuusriskejä, kuten vuoto-, räjähdys- ja palovaara. (Andersson & Grönkvist, 2019; Moradi & Groth, 2019)

Painesäiliöt ovat yksi lupaavimmista teknologioista vedyn varastointiin kaupallisissa sovelluksissa. Teknologia voitaisiin toteuttaa suhteellisen pienellä infrastruktuurilla. Painesäiliöihin liittyy kuitenkin korkeissa paineissa ongelma vedyn läpäistessä materiaalia. Komposiittiastiat voisivat olla pitävä ratkaisu vedyn painesäiliöiksi. Komposiittisäiliöiden huokoisuuden vuoksi säiliötä vahvistetaan hiilikuidulla, jotta astialle saadaan riittävä lujuus. Nykyaikaisten komposiittien lujuus-painosuhde on yli 1,5-kertainen verrattuna metalliin. (Hassan et al., 2021)

Vaikuttaa siltä, ettei vedyn varastointi pitkällä aikavälillä ole taloudellisesti kannattavaa luolastoihin. Suurena haasteena on rajoitettu maantieteellinen sijainti. Luolastoja ei ole saatavilla kaikkialla, eikä etenkään kaupunkien ja asutuskeskuksien läheisyydessä. Luolastojen louhiminen ei myöskään ole taloudellisesti järkevä vaihtoehto vedyn varastointiin. Loppujen lopuksi varastointikapasiteetti on kokonaisuudessaan melko pieni, jos otetaan huomioon kätevästi hyödynnettävien luolastojen pieni määrä maailmassa. (Matos et al., 2019; Tarkowski et al., 2024; Zivar et al., 2021)

Suurin haaste nestemäisessä varastoinnissa on, kuinka vety saadaan pidettyä koko ajan hyvin alhaisessa lämpötilassa myös kuljetuksen aikana. Sama ongelma on vedyn kylmäkompressoinnissa, sillä erolla, että vedyn ei kuitenkaan tarvitse olla nestemäisessä olomuodossa. Nykyisellä tekniikalla vedyn nesteyttämiseen kuluu energiaa lähes 40 % vedyn energiasisällöstä. Vedyn nesteyttäminen ja pitäminen nestemäisenä on myös hyvin kallista. (Abe et al., 2019; Moradi & Groth, 2019)

Jotta kuljetusongelma ratkeaisi, on esitetty niin sanottu Power-to-X-teknologiaa. Teknologiassa sähköstä tehdään ensin vetyä, joka jalostetaan sitten liikenteen polttoaineiksi, esimerkiksi metanoliksi tai ammoniakiksi. Teknologiaa on ehdotettu erityisesti raskaan liikenteen ja laivaliikenteen käyttöön. Metanolia voitaisiin valmistaa vedystä ja hiilidioksidista synteesin avulla polttoaineeksi. (Burre et al., 2020)

Yksi suurimmista haasteista vetytaloudelle on vedyn varastointiin liittyvät riskit ja ongelmat. Keskeisin ongelma on vedyn hyvin alhainen energiatiheys, minkä vuoksi sitä on lähes mahdoton varastoida normaalissa muodossaan. Vety vie myös paljon tilaa suh-

teessa energiasisältöön, vaikka vety paineistettaisiin. Metallihydridit voisivat tulevaisuudessa olla todella hyvä energiatiheä vaihtoehto vedyn varastointiin. Heikkoutena metallihydrideissä on niiden verrattain suuri massa, mikä hankaloittaa kuljetusta. (Kumar et al., 2022)

Vedyn tuotannon ohella vedyn valmistusprosessissa elektrolyysillä syntyy paljon hukkalämpöä, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi kotitaloussovelluksiin, kaukolämpöön sekä joihinkin teollisuussovelluksiin. Kiinteäoksidikennosto käyttää korkeaa lämpötilaa, joten siitä saatua hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi metalliteollisuudessa. (Kovač, Paranos & Marciuš, 2021)

Vetyyn liittyy myös paljon hyödynnettäviä mahdollisuuksia. Vety ei tuota hiilidioksidipäästöjä, kun sitä poltetaan tai käytetään polttokennoissa. Vety on hyvin tärkeässä roolissa teräksen tuotannon hiilidioksidipäästöjen alentamisessa. IEA:n raportin mukaan ainoastaan terästeollisuudesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt olivat noin 1,4 tonnia hiilidioksidia yhtä terästonnia kohden. Teräksen tuotannossa vetyä voidaan käyttää malmin pelkistykseen hiilipelkistyksen sijaan, joka vähentäisi hiilidioksidipäästöjä merkittävästi. (IEA, 2024; Ishaq et al., 2022; Zhang et al., 2021)

Vetyä voidaan muuttaa takaisin sähköksi polttokennoissa. Polttokennot toimivat ikään kuin käänteisellä elektrolyysillä, jossa anodille syötetään vetyä ja katodille happea. Polttokennossa tapahtuu reaktio, jossa vety ja happi yhdistyvät synnyttäen sähkövirran ja vettä. Polttokennoja voidaan käyttää suoraan sähköntuotantoon polttokennoautoissa tai kaukolämmössä. Vihreää vetyä muutettaessa polttokennoissa takaisin sähköksi prosessista aiheutuu erittäin suuret häviöt. Polttokennojen käyttö sähköntuotantoon ei siis ole erityisen kannattavaa alhaisen hyötysuhteen vuoksi. Tarpeen tullen vedyn käyttö polttokennoissa on kuitenkin yksi vaihtoehto sähköntuotannolle. (Ishaq et al., 2022; Ajanovic et al., 2022; Giner-Sanz et al., 2018)

3.4 Suomen vetyprojektien nykytilanne

Suomessa on käynnistetty viime vuosien aikana hyvin monia vetyprojekteja, joissa tavoitteena on tuottaa puhdasta vetyä sellaisenaan tai muunnettuna polttoaineiksi. Kun sähköenergiaa muunnetaan energiamuodosta toiseen, kuten vedyksi ja edelleen polttoaineiksi, puhutaan laajaan käyttöön vakiintuneesta termistä Power-to-X (Burre et al., 2020).

Yhdet suurimmista Suomen vetyprojekteista ovat Ren-Gas Oy:llä, jolla on suunnitteilla kuusi vihreän vedyn ja liikennepolttoaineiden tuotantolaitosta Suomeen. Laitoksissa on

tarkoitus tuottaa lisäksi kaukolämpöä tuotantoprosessien hukkalämmöistä. Liikennepolttoaineet, kuten e-metaani ovat tarkoitus saada raskaan liikenteen sekä laivaliikenteen polttoaineiksi. Esimerkiksi Tampereen Tarastenjärvelle suunnitellulle laitokselle Työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt 45,8 miljoonan euron tukisumman. Koko suunniteltu investointi on 162 miljoonaa euroa. Laitoksen vedyn tuotantokapasiteetti alkuvaiheessa olisi 20 MW ja laitos tuottaisi metaania raskaan liikenteen käyttöön 160 GWh, lisäksi kaukolämpöverkkoon syötettäisiin hukkalämpöä noin 160 GWh. (Rautkivi, 2022)

Toinen suuri vetyprojekti Suomessa on P2X Solutions Oy:llä. Yrityksen vedyn tuotantolaitos on jo rakenteilla Harjavallassa ja laitos avautuu käyttöön syksyllä 2024. Laitoksen tuotantokapasiteetti on 20 MW. Hanke sisältää lisäksi metanointilaitoksen, jossa tuotetaan uusiutuvaa synteettistä metaania liikenteen polttoaineeksi. Myöhemmin tavoitteena on myös talteen otetun hiilidioksidin avulla jatkojalostaa vetyä synteettiseksi metanoliksi. P2X Solutions Oy:llä on suunnitteilla hieman suuremman kokoluokan vihreän vedyn tuotantolaitoksia myös Joensuuhun sekä Ouluun. Yritys tavoittelee 1 GW:n vedyntuotantokapasiteettia vuoteen 2031 mennessä. (P2X Solutions Oy, 2022)

Hyvin moni Suomen vetyhankkeista on lykkääntynyt siten, että rakentamisen aloitusta on siirretty myöhemmäksi. Useissa hankkeissa on todettu epävarmuuksia liittyen vetytalouden kannattavuuteen ja kehittymättömään markkinatilanteeseen. Myös nousseet korot ja kokonaisinvestointikustannukset ovat olleet esteenä hankkeiden etenemiselle. (Mäntylä et al., 2023)

4. LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI

Hyvä vaihtoehto uusiutuvan energialähteiden vaihtelevan energiantuotannon tasoittamiseen on lämpöenergian varastointi (engl. Thermal Energy Storage, TES). Lämpövarasto sisältää tavallisesti korkean tai matalan lämpötilan lämmön varastoinnin jollakin aikavälillä, päivänsisäisenä, viikoittaisena tai kausittaisena varastointina. Lämpöenergian varastointiin on useita erilaisia menetelmiä. Yleensä TES-järjestelmät jaotellaan kolmeen luokkaan valitun varastointimateriaalin mukaan. (Alva et al., 2018; Pelay et al., 2017) Tässä luvussa käsitellään joitain lämmön lähteitä, kaukolämpövarastoja sekä lämpöenergian varastointimuotoja, joita voidaan kytkeä uusiutuvan energian tuotantoon ja varastointiin.

4.1 Uusiutuvan energian lämmön lähteet

Auringosta saatavaa lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen usealla eri lämmönkeräintekniikalla. Aurinkokeräimien avulla auringosta voidaan saada talteen lämpöenergiaa, jota voidaan käyttää myöhemmin esimerkiksi lämpimänä vetenä. Tällaisia keräinjärjestelmiä on mahdollista asentaa esimerkiksi omakotitalon katolle, jolloin päivällä auringon paistaessa vesi lämpenee käyttöä varten. Keskitetyssä aurinkovoimassa auringon säteet heijastetaan peilien tai keräimien avulla ja keskitetään yhteen pisteeseen. Yleensä auringosta saadulla lämmöllä vesi kuumennetaan höyryksi ja ajetaan turbiinilla sähköksi. (Barlev et al., 2011) Pienemmän mittakaavan käytössä myös Suomessa on aurinkolämpölaitoksia, jossa aurinkokeräimien avulla lämpöä otetaan talteen auringosta ja lämpö syötetään kaukolämpöverkkoon. (Savon Sanomat, 2020)

Maapallo on itsessään suuri lämpöenergiavarasto, jossa lämpöenergiaa on valtavasti sitoutuneena maapallon ohuen kuoren alle vaippaan sekä ulko- ja sisäytimeen. Lämpöenergiaa voidaan saada maaperästä syvän porakaivon avulla. Tätä maaperästä saatavaa lämpöenergiaa kutsutaan geotermiseksi energiaksi. Geoterminen energiaa pidetään uusiutuvana, koska energialähde säilyy, vaikka sitä kerättäisiin hyvin suuria määriä koko maailman energiatarpeen tyydyttämiseksi. Poraaminen syvälle maankuoreen on haastavaa ja siksi porauksia tehdään paljon tektonisille alueille, joissa geotermistä fluidia on saatavilla. Toisin kuin aurinkoenergiaa, geotermistä energiaa on saatavilla ympäri vuorokauden. (Alva et al., 2018)

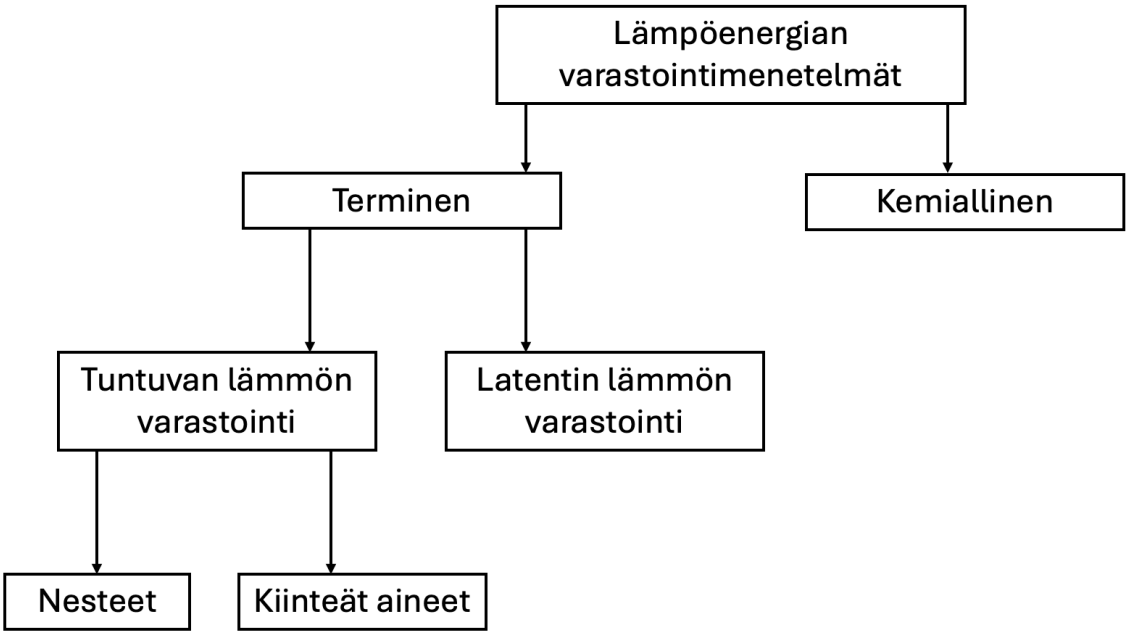
Lämpöä voidaan tuottaa myös suoraan sähköstä sähkökattiloilla sähkövastusten avulla. Sähkökattilat toimivat samalla periaatteella kuin vedenkeitin. Kun esimerkiksi tuulivoimaa tai aurinkosähköä on saatavilla ylimäärin, voidaan ylimääräisellä sähköllä ajaa sähkökattiloita, joissa lämmitetään vettä. Kuuma vesi voidaan varastoida lämpövarastoon myöhempää käyttöä varten tai syöttää suoraan kaukolämpöverkkoon. Sähkökattiloilla on ollut Suomessa vahva kasvutrendi viime vuosien aikana. (Energia uutiset, 2023)

Teollisuuden tuotantolaitoksissa eri tuotteiden valmistuksen aikana syntyvä hukkalämpö karkaa yleensä ympäristöön. Hukkalämpöjen hyödyntämisestä voitaisiin saada merkittävä määrä lämpöä talteen. Hukkalämmön talteenottolähteitä ovat esimerkiksi rauta- ja terästehtaiden uunit, lasinsulatusuunit sekä kaasuturbiinien ja höyrykattiloiden savukaasut. Vedyn tuotannosta aiheutuvan hukkalämmön talteenotto on myös yksi mahdollinen lämmönlähde tulevaisuudessa. EU:ssa teollisuuden hukkalämmön osuus teollisuuden kuluttamaa energiaa kohti on 22,2 %. (Alva et al., 2018)

4.2 Lämpöenergian varastointimenetelmät

Lämpöenergian varastointiin voidaan käyttää eri materiaaleja, eristettyjä säiliöitä, maanalaisia onkaloita tai luolastoja. Tällä hetkellä on kolmenlaisia yleisesti tunnettuja TES-järjestelmiä: tuntuvan lämpöenergian varastointi, latentin lämmön varastointi sekä kemiallinen lämmön varastointi. Näistä kehittynein järjestelmä on tuntuvan lämpöenergian varastointi. Kuvassa 6 on esitelty lämpöenergian varastointimenetelmien jaottelu. Tuntuvan lämmön varasto voi toimia lyhytaikaisena tai pitkäaikaisena, eli niin sanottuna kausivarastona. (Alva et al., 2018)

Tuntuvan lämmön varastointi on yksinkertaisin tekniikka, jossa nestemäistä tai kiinteää väliainetta lämmitetään tai jäähdytetään. Menetelmää voidaan käyttää sekä pitkäaikaiseen että lyhytaikaiseen varastointiin. Yleisimmin käytetty väliaine on kuuma vesi, joka on todettu kustannustehokkaaksi teknologiaksi lämpöenergian varastointiin. Vesi on myrkytön ja palamaton materiaali ja sitä on helposti saatavilla. Sitä voidaan käyttää kaikissa kolmessa olomuodossa riippuen varastointityypistä. Jäätä käytetään kylmävarastoissa. Veden haittapuolia ovat kuitenkin korkea höyrynpaine ja vedestä aiheutuva korroosio. Muita materiaaleja, joita varastointiin voidaan käyttää ovat esimerkiksi luonnonkivet (hiekka, marmori, graniitti, savi) sekä polymeerit. Tuntuvan lämmön varastointi on kustannustehokasta ja ympäristöystävällistä, koska siinä ei käytetä myrkyllisiä kemikaaleja. (Ould Amrouche et al., 2016; Sarbu & Sebarchievici, 2018)



Kuva 6. *Lämpöenergian varastointimenetelmät yleisesti. Muokattu lähteestä (Sarbu & Sebarchievici, 2018)*

Veden käyttö tuntuvan lämmön varastoinnissa on edullista ja teknologia on yksinkertainen. Kuumavesisäiliöiden tehokkuutta voidaan parantaa entisestään varmistamalla veden optimaalinen kerrostuminen säiliössä sekä säiliön tehokas lämpöeristys. Ongelmana kuumassa vedessä on sen kiehumispiste, joka on suhteellisen alhainen korkean lämmön sovelluksiin. Jotta vedestä saadaan kuumempaa, täytyy säiliö paineistaa tai vesi höyrystää. Vedellä on kuitenkin suuri ominaislämpökapasiteetti, laaja saatavuus, kemiallinen stabiilius ja alhaiset kustannukset, mitkä tekevät vedestä oivallisen materiaalin lämmön varastointivälineeksi. (Sarbu & Sebarchievici, 2018)

Latentin lämmön varastointi perustuu käytössä olevan materiaalin faasimuutokseen vakiolämpötilassa. Faasimuutoksen aikana materiaalista vapautuu tai se sitoo lämpöenergiaa. Varastoitunut lämpömäärä on yleensä faasimuutoksen latenttilämpöä eli sulamistai höyrystymislämpöä. Latentin lämpöenergian varastointiin käytetään faasimuutosmateriaaleja (engl. phase change materials, PCM), joiden faasimuutos tapahtuu pienellä lämpötila-alueella, lähellä faasimuutoslämpötilaa. PCM:n haittapuolena on niiden alhainen lämmönjohtavuus (yleensä 0,2–0,8 W/m K), mikä johtaa hyvin hitaaseen faasimuutosprosessiin. (Alva et al., 2018; Pelay et al., 2017)

Kolmas lämmönvarastointiteknologia on termokemiallinen TES-teknologia, joka perustuu palautuviin kemiallisiin reaktioihin. Reaktioissa reagoivien aineiden molekyylikonfiguraatio muuttuu. Aurinkolämpöä voidaan käyttää endotermisen kemiallisen reaktion käynnistämiseen, minkä jälkeen se varastoidaan kemiallisen potentiaalin muodossa. Purkau-

tumisen aikana varastoitu lämpö voidaan ottaa talteen käänteisellä eksotermisellä reaktiolla. Etuna termokemiallisissa varastoissa on niiden suuri energiatiheys verrattuna latenttivarastoihin. Termokemialliseen lämmön varastointiin voidaan käyttää myös metallihydridejä, karbonaatteja sekä ammoniakkia ja useita muita aineita. Etuja kemiallisen lämmön varastoinnissa ovat pitkä varastointiaika sekä pienet lämpöhäviöt. Teknisinä haasteina teknologiassa on kuitenkin dehydrataatioreaktion hitaus sekä varastointimateriaalissa tapahtuva sintraatuminen ja rakeiden kasvu. Kemiallinen lämpöenergian varastointi vaatii siis vielä lisää tutkimuksia ja jatkojalostamista ennen kaupallista käyttöä. (Alva et al., 2018; Pelay et al., 2017)

4.3 Tuntuvan lämpövaraston hyödyntäminen kaukolämmössä

Vaihtelevan sähköntuotannon ja uusiutuvien tuotantomuotojen kasvun sekä edullisen sähkön vuoksi kaukolämpö on alkanut osittain sähköistymään. Sähkön ollessa halpaa, sitä voidaan käyttää sähkökattiloissa, joissa lämmitetään vettä kaukolämpöverkkoon. Puhutaan niin sanotusta power-to-heat-järjestelmästä, jossa sähkö muunnetaan lämmöksi. Jakeluverkossa oleva vesi voi siis toimia lämpövarastona, jos sähköä käytetään kaukolämmön syöttölämpötilan nostamiseen ja laskemiseen, esimerkiksi lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden avulla. Kaukolämpöverkot voivat siis tarjota yhden ratkaisun sähköverkon tasapainottamiseen. (Kouhia et al., 2019; Sarbu & Sebarchievici, 2018; Schweiger et al., 2017)

Hyvin yleisesti kaukolämpöverkkoon liitetään myös tuntuvan lämmön varastoja, yleisimmin kuumavesisäiliöitä. Kuumavesisäiliöistä saadaan tehokkaita varmistamalla optimaalinen kerrostuminen säiliössä sekä tehokas lämpöeristys. Lämminvesivaraajat, joita käytetään puskurivarastona käyttöveden toimituksessa, ovat yleensä 500 litran ja useiden kuutiometrien välillä. Tällaista lämpövarastoa voidaan käyttää myös aurinkolämpölaitteistoissa käyttöveden lämmittämiseen. Suuria lämminvesisäiliöitä käytetään aurinkolämmön kausivarastointiin yhdessä kaukolämpöjärjestelmien kanssa. Järjestelmien tilavuus voi olla jopa useita tuhansia kuutiometrejä. (Sarbu & Sebarchievici, 2018; Schweiger et al., 2017)

Päivänsisäiseen varastointiin käytetään perinteistä eristettyä terässäiliötä. Lämpöhäviöitä tällaisesta lämpövarastosta ei juurikaan synny ja sitä on helppo säätää. Esimerkiksi Tampereella lämpövarastojen koko voisi olla välillä 100–2000 MWh. Viikkotason varastointiin tarvittaisiin jo 10 GWh:n tai suurempi varasto. (Tampereen Energia, 2023)

Vaasassa on otettu käyttöön Suomen suurin sähkökattila-lämpövarastoyhdistelmä 2023 vuoden lopulla. Lämpövaraston ja sähkökattiloiden yhdistelmä mahdollistaa sähkön varastoinnin lämmöksi. Sähkökattiloiden kokonaisteho laitoksessa on yhteensä 160 MW ja lämmön varastointikapasiteettia on 11 GWh:n edestä. Sähkökattilaa voidaan säätää erittäin nopeasti. Kun tuulisähköä on paljon saatavilla, lämpöä tuotetaan sähköllä. Lämpö johdatetaan lämpövarastoon, joka kykenee säilömään sitä suuria määriä. Lämpövarastoluolien koko on yhteensä 210 000 kuutiometriä. Lataus- ja purkutehoa kaukolämpöakussa on 110 MW, mikä riittää noin 4–20 vuorokaudeksi riippuen purkutehosta. Alun perin luolat on rakennettu öljyn säilytykseen 1970-luvulla. (Suutarinen, 2023; Vaasan Voima, 2023)

Suomalainen yritys Polar Night Energy on kehittänyt tuntuvan lämmön varastointia hyödyntävän hiekka-akun, jossa aurinko- ja tuulienergialla hiekkamassan ydin lämmitetään sähkövastuksilla kuumaksi noin 500 °C:seen. Hiekka-akun hyötysuhde on jopa 95 % ja teho 100 MW, todellisessa skenaariossa hyötysuhde olisi noin 85 %. Energiakapasiteetti on 20 GWh. Järjestelmä perustuu hiekan keskellä kulkevaan suljettuun ilmakanavaan, jossa kiertävä ilma lämmitetään sähkövastuksella. Lämpöä voidaan varastoida hiekka-akkuun pitkiäkin aikoja. Tulevaisuudessa olisi tarkoituksena rakentaa suurempiakin, jopa 200 MW:n lämmitysteholla toimivia hiekka-akkuja. Tampereen energia on esittänyt polttoon perustumattoman kaukolämmön -selvityksessään hiekka-akun huonoksi puoleksi sen, että hiekka-akkua ei voi ladata muulla kuin sähköllä, kun perinteistä kaukolämpöakkua voidaan ladata myös biomassalla tai hukkalämmöllä. Lisäksi hiekka-akku on kalliimpi vaihtoehto kuin perinteinen sähkökattilan ja kaukolämpöakun yhdistelmä. (Polar Night Energy; Tampereen Energia, 2023; Jaakkola, 2024)

5. ENERGIANVARASTOINTITEKNOLOGIOIDEN TULEVAISUUS

Vety tulee toimimaan tulevaisuudessa tavalla tai toisella uusiutuvan energian varastoinnissa. Useita vetyprojekteja on jo nyt käynnissä Suomessa. Vedyn tuotannon edellytyksenä on kuitenkin riittävän suuri määrä ylimääräistä sähköä, joten sähköntuotannon tulee kasvaa reilusti Suomessa uusiutuvan sähkön riittävyyden takaamiseksi vedyn laajamittaiseen tuotantoon. Lämpövarastoja käytetään jo kaukolämpöakkujen muodossa kaukolämpöverkoissa. Kausivarastoja, joihin lämpöä voitaisiin varastoida pidemmäksi aikaa, on suunnitteilla ja rakenteilla Suomessa. Tässä luvussa käydään läpi hieman uusia innovaatioita, joita vetyyn ja lämpövarastoihin liittyy. Lisäksi tarkastellaan Suomen roolia energian varastoinnissa sekä vetytaloudessa.

5.1 Uudet innovaatiot ja kehittyvät teknologiat

Vedyn valmistukseen ja varastointiin on esitelty tutkimuksissa useita uusia menetelmiä. Eräässä tutkimuksessa on esitetty, että vetyä voitaisiin valmistaa biokemiallisessa tai valopohjaisella menetelmällä fotokatalyysin avulla. (Acar et al., 2019)

Biokemiallisissa menetelmissä biovetyä tuotetaan biofotolyysin, valokäymisen tai keinotekoisen fotosynteesin avulla. Valosta riippuvaiset biologiset vedyntuotantoprosessit noudattavat samoja periaatteita kuin levien ja kasvien fotosynteesi. Biokemiallisissa vedyn valmistusmenetelmissä yleensä bakteerit toimivat vedyn tuottajina. Biofotolyysissä mikrolevät ja syanobakteerit vangitsevat aurinkoenergiaa ja tuottavat vetyä vedestä ja hiilidioksidista. Valokäymisessä bakteerit tuottavat vetyä erilaisista hiililähteistä käyttäen valoenergiaa. Pimeäfermentoinnissa anaerobiset bakteerit tuottavat vetyä orgaanisesta aineesta käyttämällä jätettä hyödykseen. (Akhlaghi & Najafpour-Darzi, 2020)

Elektrolyysin ja fotokatalyysin yhdistelmässä aurinkoenergia absorboituu toiseen tai molempiin fotoelektrodeihin. Reaktorissa käytettävät puolijohteet toimivat samalla periaatteella kuin aurinkokennot, ja ne muuttavat aurinkoenergian ensin valovirraksi, jonka jälkeen vedyksi tai myöhemmissä vaiheissa ammoniakiksi. (Acar et al., 2019)

Käytännössä biokemialliset menetelmät eivät sovi suuremman kokoluokan vedyn tuotantoon yhtä hyvin kuin elektrolyysi. Vetyä voi olla mahdollista valmistaa sähkön avulla elektrolyysissä hyvin korkeallakin hyötysuhteella. SOEC-laitteiston hyötysuhde voi yltää jopa yli 90 %:iin. Vedyn tuottaminen SOEC-laitteistolla vaatii korkean lämpötilan, mistä

aiheutuu paljon hukkalämpöä, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa. Tämän vuoksi uusia elektrolyysiteknologioita kehitetään ja koetetaan löytää ratkaisu, jonka avulla laitteistot voitaisiin saada kaupalliseen käyttöön. (Jang et al., 2022; Schmidt et al., 2017)

Vedyn varastointi on kompleksinen asia ja sen vuoksi sitä on tutkittu hyvin paljon. Uusia menetelmiä on kehitelty, joiden avulla vetyä voidaan varastoida moniin eri materiaaleihin. Uudet materiaalipohjaiset menetelmät, joissa vetyä varastoidaan huokoisiin materiaaleihin ovat yksi keino saada vetyä varastoitua. Tekniikat ovat vielä kuitenkin kaukana suuren mittakaavan käytöstä, koska kaikki kokeet on tehty pienissä mittakaavoissa ja varastoinnin suorituskyky ei ole ollut riittävän hyvä. (Moradi & Groth, 2019)

Lämpöenergian varastoinnissa tullaan tulevaisuudessa menemään pidemmälle latentin lämmön varastoinnissa, jossa hyödynnetään faasimuutosmateriaaleja. Eri materiaalit sopivat sulamispisteensä mukaan, joko lämpöenergian varastointiin korkeissa tai matalissa lämpötiloissa. Esimerkiksi suolojen sulamispisteet ovat korkeita, joten ne soveltuvat hyvin korkean lämpötilan varastointisovelluksiin. (Alva et al., 2018)

Suomen Vantaalle on suunnitteilla maailman suurin lämmön kausivarasto. Lämmön kausivarasto louhitaan maan alle Vantaan peruskallioon. Kolmen suuren tunnelin kokonaistilavuus on peräti 1100000 m^3. Maan alaiset tunnelit täytetään kuumalla vedellä, jonka lämpötila pystytään maanalaisen paineen vuoksi nostamaan jopa 140 °C:seen, ilman että vesi höyrystyy. Kausivaraston lämmön varastointikapasiteetti on kaiken kaikkiaan 90 GWh. Lämpövaraston yhteyteen rakennetaan myös kaksi 60 MW:n sähkökattilaa. Arvion mukaan hanke tulisi maksamaan noin 200 miljoonaa euroa ja sille on myönnetty 19 miljoonan euron investointituki työ- ja elinkeinoministeriöltä. (Ristolainen, 2024)

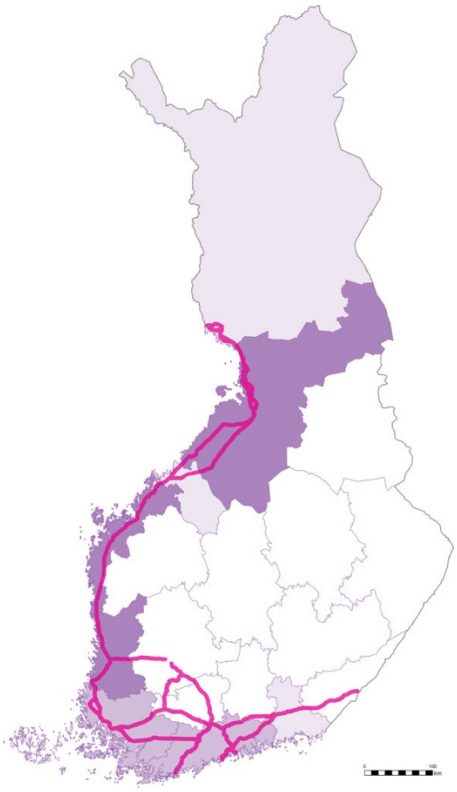
5.2 Energian varastoinnin rooli Suomessa

Suomen tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä. Uusiutuvan energian tuotannon lisäämisellä ja siihen kytketyillä energian varastoinnilla on erittäin merkittävä rooli tavoitellessa hiilineutraaliutta. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisun ”Hiilineutraali Suomi – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia” mukaan Suomi valmistautuu ja varautuu kattavasti koko arvoketjun osalta vetyratkaisujen käyttöönottoon siinä vaiheessa, kun ne saavuttavat kaupallisen kannattavuuden. Linjauksiin sisältyy myös edistää puhtaan vedyn tuotantokapasiteetin syntyä. Vuodelle 2030 tavoitteena on vedyntuotantokapasiteetti vähintään 1000 MW. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023)

Suomessa on hyvät edellytykset vihreän vedyn tuotannolle edullisen uusiutuvan energian, vakaan sähköverkon sekä vahvan energia-alan osaamisen vuoksi. Valtioneuvoksen vedystä tehdyn periaatepäätöksen mukaan Suomi tavoittelee Euroopan johtavaa asemaa vetytaloudessa läpi koko arvoketjun. Vety voi olla merkittävässä roolissa suomalaisen teollisuuden kasvihuonekaasujen vähentämisessä, ja siksi vetytaloutta halutaan viedä eteenpäin. (Sivill et al., 2022; Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023)

Vetytalouden edistäminen vaatii voimakkaita poliittisia ohjaustoimenpiteitä edistyäkseen. Vetytalouteen ei voida siirtyä ennen kuin teknologia kehittyy siten, että vetytalous on kannattavaa sekä turvallista. Lisäksi vetytalous vaatii uusiutuvaa sähköä moninkertaisesti verrattuna tämänhetkiseen sähköntuotantoon. Vedyn kysyntä tulevaisuudessa ei myöskään ole täysin varmaa. Esimerkiksi raskas liikenne voi sähköistyä, jolloin vedylle ja siitä jalostettaville polttoaineille ei ole välttämättä kysyntää. (Sivill et al., 2022)

Gasgrid Finland sai vuonna 2022 valtiolta tehtäväkseen edistää vetytaloutta viemällä vetyinfrastruktuurin kehitystä eteenpäin mahdollisimman nopeasti. Gasgrid on juuri julkaissut alustavat suunnitelmat kansalliselle vedynsiirtoverkolle. Alustavien suunnitelmien mukaan vetyverkko rakennettaisiin pääasiassa Suomen länsirannikolle ja Etelä-Suomeen. Kuvassa 7 on esitetty kartalla Suomen vedynsiirtoverkon alustavat suunnitelmat. Valtaosa tuulivoimahankkeista sijaitsee länsirannikolla ja suuri osa hiilidioksidipäästöistä syntyy Etelä-Suomessa, joten vetyverkon rakentaminen olisi aluksi otollisinta näille alueille. Kansallisen vetyverkon kehityksen tavoiteaikatauluna on vuosi 2030, jolloin vetyinfrastruktuuri ja vetymarkkina olisivat jo toiminnassa. (Gasgrid, 2024)



Kuva 7. *Gasgridin kansallisen vetyverkon alustava suunnitelma. (Gasgrid, 2024)*

Kaukolämpö on viime vuosien aikana alkanut vauhdilla sähköistyä Suomessa. Halpojen sähkön hintojen vuoksi on kannattavaa tuottaa sähköä halvoilla tunneilla sähkökattiloilla. Kun sähkökattilan yhteyteen liitetään lämpövarasto, se mahdollistaa sähkön varastoinnin lämmöksi. Lämmön varastoinnilla tulee olemaan tärkeä rooli osana kaukolämpöverkkoja ja siirtymässä kohti polttoon perustumatonta kaukolämmön tuotantoa. Uusiutuvilla tuotantomuodoilla tuotettua sähköä voidaan tulevaisuudessa varastoida yhä suurempia määriä lämmöksi. Esimerkiksi Vantaalle rakenteilla olevaan lämpövarastoon voidaan varastoida lämpöä sähkökattiloiden avulla yhteensä 120 MW:n teholla. (Ristolainen, 2024)

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tehdä katsaus uusiutuvan energian varastointimenetelmiin vedyn ja lämmön osalta. Uusiutuvan energian varastointi tulee olemaan jollain tavalla välttämätöntä tulevaisuudessa, jotta epätasaista ja säästä riippuvaa tuotantoa saadaan tasapainotettua ja sähkön hinta pysyisi sopivana. Vetytaloudella, kaukolämmön sähköistymisellä ja lämpövarastoilla tulee olemaan vahva rooli energian varastoinnissa jo lähivuosien aikana. Kehitys vaatii kuitenkin paljon toimenpiteitä, koska uusiutuvan sähkön tuotantoa tarvittaisiin moninkertaisesti verrattuna tämänhetkiseen ja vihreän vedyn tuotantolaitoksia ei Suomessa juurikaan vielä ole.

Vihreää vetyä voidaan tuottaa suuressa kokoluokassa veden elektrolyysissä eri teknologioilla. Tällä hetkellä toimivin teknologia, joka joustaa sähkön tuotannon mukaan on PEM-elektrolyysi. Toinen mahdollinen tulevaisuuden elektrolyysiteknologia vihreän vedyn valmistukseen on SOEC-elektrolyysi, joka mahdollistaisi prosessiin korkeamman hyötysuhteen. Lisäksi prosessissa syntyvä hukkalämpö hyödynnettäisiin teollisuudessa.

Vetyä tulisi varastoida jollakin tavalla, jotta vety voisi toimia energiavarastona uusiutuville energialähteille. Erilaisia vedyn varastointimenetelmiä on tutkittu ja löydetty paljon, mutta vedyn varastointiin liittyy haasteita vedyn pienen molekyylikoon ja energiatiheyden vuoksi. Vety voi esimerkiksi läpäistä terästä, minkä vuoksi terässäiliöt eivät ole varmin ratkaisu vedyn varastoimiseksi.

Perinteisesti vetyä on varastoitu säiliöihin paineistettuna kaasuna. Säiliömateriaaleja kehitetään siihen suuntaan, että vety säilyisi säiliössä sisällä mahdollisimman hyvin. Vedyn varastointi nestemäisenä on haasteellista hyvin alhaisen lämpötilan vuoksi. Alhaisen lämpötilan ylläpitäminen vaatii paljon energiaa ja jatkuvaa ylläpitoa, minkä vuoksi se ei ole paras vaihtoehto suuren kokoluokan varastointiin. Uusia menetelmiä vedyn varastoimiseksi tutkitaan ja kehitetään koko ajan. Vedyn varastointi metallihydrideihin on menetelmä, joka on nostamassa päätään. Ainoana suurempana haasteena metallihydrideissä on niiden suuri massa.

Vihreän vedyn tuotannon ja varastoinnin laajamittaisen käytön aloittaminen vaatii vielä poliittisia toimia sekä tukia, jotka mahdollistaisivat investointipäätösten tekemisen ja toteuttamisen. Lisäksi vetytalous vaatii vielä moninkertaisesti enemmän uusiutuvan energian tuotantoa sekä kysyntää teollisuudelta ja yrityksiltä, jotta vetyprojektit etenisivät. Tarvitaan vielä aikaa, jotta vedyn laajamittaiselle tuotannolle on edellytykset sekä tar-

peeksi kysyntää. Jos vedystä valmistetaan polttoaineita liikenteen käyttöön, niin itse vedyn varastointiongelma ratkeaa. Polttoaineiden riittävyyden takaamiseksi vedyn tuotantoa tarvittaisiin kuitenkin valtavia määriä.

Lämpöenergian varastointi voidaan nykypäivänä liittää hyvin uusiutuvan energian yhteyteen sähkökattiloiden ja lämpövarastojen yhdistelmien avulla. Kaukolämpöverkoissa hyödynnetään tuntuvan lämmön varastointia kaukolämpöakkujen muodossa. Lämpövarastosovelluksissa hyödynnetään yleensä varastointiaineena kuumaa vettä. Nykyisin on alettu puhua myös kausivarastoista, joihin lämpöä pystytään varastoimaan hyvin suuria määriä pitkäksi aikaa. Kausivarastot rakennetaan tyypillisesti maan alle louhittuihin luoliin, jolloin paine kasvaa suuremmaksi kuin normaali ilmanpaine ja veden lämpötilaa voidaan kasvattaa suuremmaksi veden höyrystymättä.

Uusiutuvan energian varastoinnin tulevaisuus näyttää lupaavalta etenkin lämpöenergian varastoinnin kannalta. Suuren koko luokan lämpövarastoja on jo käytössä ja rakenteilla. Vedyn varastointiin liittyy vielä ongelmia ratkaistavaksi. Uusiutuvaa energiaa tulee saada varastoitua tulevaisuudessa kuitenkin jollakin tavalla. Vety sekä lämmön varastointi ovat potentiaalisia vaihtoehtoja uusiutuvan energian varastointiin kohti vähähiilisempää yhteiskuntaa.

LÄHTEET

Abe, J.O., Popoola, A.P.I., Ajenifuja, E., Popoola, O.M., 2019. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. Int. J. Hydrog. Energy 44, 15072–15086. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068

Acar, C., Bicer, Y., Demir, M.E., Dincer, I., 2019. Transition to a new era with light-based hydrogen production for a carbon-free society: An overview. Int. J. Hydrog. Energy 44, 25347–25364. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.010

Ajanovic, A., Sayer, M., Haas, R., 2022. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. Int. J. Hydrog. Energy, Hydrogen Society 47, 24136–24154. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094

Akhlaghi, N., Najafpour-Darzi, G., 2020. A comprehensive review on biological hydrogen production. Int. J. Hydrog. Energy 45, 22492–22512. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.182

Alva, G., Lin, Y., Fang, G., 2018. An overview of thermal energy storage systems. Energy 144, 341–378. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037

American Chemical Society, 2014. How a Solar Cell Works. Saatavissa (viitattu 30.4.2024): https://www.acs.org/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html

Andersson, J., Grönkvist, S., 2019. Large-scale storage of hydrogen. Int. J. Hydrog. Energy 44, 11901–11919. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063

Barlev, D., Vidu, R., Stroeve, P., 2011. Innovation in concentrated solar power. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 95, 2703–2725. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.05.020

Breeze, P., 2016. Wind Power Generation. San Diego: Elsevier Science & Technology. https://doi.org/10.1016/C2014-0-04850-2

Breyer, C., Kosonen, A., 2019. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. LUT-yliopisto. Saatavissa (viitattu 16.4.2024): https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa

Burre, J., Bongartz, D., Brée, L., Roh, K., Mitsos, A., 2020. Power-to-X: Between Electricity Storage, e-Production, and Demand Side Management. Chem. Ing. Tech. 92, 74–84. https://doi.org/10.1002/cite.201900102

Carapellucci, R., Giordano, L., 2020. Steam, dry and autothermal methane reforming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis. J. Power Sources 469, 228391. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228391

Fingrid, 2024. Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q1 2024. Saatavissa (viitattu 30.4.2024): https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q1-2024/

Gasgrid, 2024. Gasgrid julkaisi alustavat suunnitelmat kansalliselle vedynsiirtoverkolle vauhdittamaan vetytalouden kehitystä. Saatavissa (viitattu 7.5.2024): https://gasgrid.fi/2024/04/23/gasgrid-julkaisi-alustavat-suunnitelmat-kansalliselle-vedynsiirtoverkolle-vauhdittamaan-vetytalouden-kehitysta/

Giner-Sanz, J.J., Ortega, E.M., Pérez-Herranz, V., 2018. Statistical analysis of the effect of temperature and inlet humidities on the parameters of a semiempirical model of the internal resistance of a polymer electrolyte membrane fuel cell. Journal of Power Sources 381, 84–93. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.093

Haanpää, S., 2023. Merituuli- ja aurinkovoimalat vauhdinotossa. Fingrid-lehti. Saatavissa (viitattu 16.4.2024): https://www.fingridlehti.fi/merituuli-ja-aurinkovoimalat-vauhdinotossa/

Haanpää, S., 2022. Tuulesta ja auringosta sähköä samassa voimalassa. Fingrid-lehti. Saatavissa (viitattu 8.5.2024): https://www.fingridlehti.fi/tuulesta-ja-auringosta-sahkoa-samassa-voimalassa/

Hassan, I.A., Ramadan, H.S., Saleh, M.A., Hissel, D., 2021. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives. Renew. Sustain. Energy Rev. 149, 111311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311

Huttunen, R., Kuuva, P., Kinnunen, M., Lemström, B., Hirvonen, P., 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriö. http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0

IEA, 2023. Direct CO2 intensity of the iron and steel sector in the Net Zero Scenario, 2010-2030. IEA. Saatavissa (viitattu 20.2.2024): https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-intensity-of-the-iron-and-steel-sector-in-the-net-zero-scenario-2010-2030

IRENA, 2020. Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolysers to meet the 1.5C climate goal. Saatavissa (viitattu 19.3.2024): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf

Ishaq, H., Dincer, I., Crawford, C., 2022. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. Int. J. Hydrog. Energy, SI: Progress in Hydrogen Production, Storage and Distribution (Ahmadi) 47, 26238–26264. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149

Jaakkola, H., 2024. Lämpöä ja sähköä hiekasta? Energia Uutiset. Saatavissa (viitattu 6.5.2024): https://www.energiauutiset.fi/kategoriat/tuotanto/lampoa-ja-sahkoa-hiekasta.html

Jang, D., Kim, J., Kim, D., Han, W.-B., Kang, S., 2022. Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies. Energy Convers. Manag. 258, 115499. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115499

Joronen, J., Salhoja, P., Seppälä, V., Vähätiitto, J., 2023. Uusi selvitys polttoon perustumattomaan ja hiilinegatiiviseen kaukolämpöön siirtymisestä. Tampereen Energia. Saatavissa (viitattu 6.2.2024): https://www.tampereenenergia.fi/julkaisut/uusi-selvitys-polttoon-perustumattomaan-ja-hiilinegatiiviseen-kaukolampoon-siirtymisesta-2023/

Kouhia, M., Laukkanen, T., Holmberg, H., Ahtila, P., 2019. District heat network as a short-term energy storage. Energy 177, 293–303. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.082

Kumar, A., Daw, P., Milstein, D., 2022. Homogeneous Catalysis for Sustainable Energy: Hydrogen and Methanol Economies, Fuels from Biomass, and Related Topics. Chem. Rev. 122, 385–441. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00412

Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P.P., 2019. Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. J. Energy Storage 21, 241–258. https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023

Mikkonen, A., 2024. Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa (viitattu 14.3.2024): https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-2023

MIT Energy Initiative, 2022. The Future of Energy Storage. Saatavissa (viitattu 18.3.2024): https://energy.mit.edu/research/future-of-energy-storage/

Moradi, R., Groth, K.M., 2019. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. Int. J. Hydrog. Energy 44, 12254–12269. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041

Mäntylä, J., Hukkanen, V., 2023. Yle selvitti: Vetyhankkeiden piti tuoda Suomeen paljon töitä ja rahaa, mutta nyt moni projekti yhtäkkiä sakkaa. Yle Uutiset. Saatavissa (viitattu 8.5.2024): https://yle.fi/a/74-20065871

Ould Amrouche, S., Rekioua, D., Rekioua, T., Bacha, S., 2016. Overview of energy storage in renewable energy systems. Int. J. Hydrog. Energy 41, 20914–20927. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243

Pashchenko, D., 2024. Green hydrogen as a power plant fuel: What is energy efficiency from production to utilization? Renew. Energy 223, 120033. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120033

Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., Rood, M., 2017. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. Renew. Sustain. Energy Rev. 79, 82–100. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.139

Polar Night Energy. Technology. Polar Night Energy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.5.2024): https://polarnightenergy.fi/technology

Polar Night Energy. What is a sand battery? Polar Night Energy. Saatavissa (viitattu 3.5.2024): https://polarnightenergy.fi/sand-battery

Rautkivi, M., 2022. Nordic Ren-Gas Oy:n Power-to-Gas- hankkeelle myönnetty historian suurin vihreän siirtymän energiainvestointituki. Ren-Gas Oy. Saatavissa (viitattu 2.5.2024): https://ren-gas.com/ajankohtaista/nordic-ren-gas-oyn-power-to-gas-hankkeelle-myonnetty-historian-suurin-vihrean-siirtyman-energiainvestointituki/

Ristolainen, L., 2024. Vantaan Energia aloittaa maailman suurimman lämmön kausivaraston ”Varannon” rakentamistyöt Vantaalla. Vantaan Energia Oy. Saatavissa (viitattu 7.5.2024): https://www.vantaanenergia.fi/vantaan-energia-aloittaa-maailman-suurimman-lammon-kausivaraston-varannon-rakentamistyot-vantaalla/

Sarbu, I., Sebarchievici, C., 2018. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability 10, 191. https://doi.org/10.3390/su10010191

Sarvar-Ardeh, S., Rashidi, S., Rafee, R., Li, G., 2024. Recent advances in the applications of solar-driven co-generation systems for heat, freshwater and power. Renew. Energy 225, 120256. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.12025

Savon Sanomat. 2020. Suomen suurimpiin kuuluva aurinkolämpövoimala käynnistyi Kuopiossa – kesäaikaan lämpöä irtoaa koelaitoksesta noin 100 omakotitalon tarpeeseen. Saatavissa (viitattu 2.5.2024): https://www.savonsanomat.fi/paikalliset/3084720

Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., Few, S., 2017. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. Int. J. Hydrog. Energy 42, 30470–30492. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045

Schweiger, G., Rantzer, J., Ericsson, K., Lauenburg, P., 2017. The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems. Energy 137, 661–669. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.075

Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., Patronen, J., 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston kanslia. http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2

STT. 2023. Suomen suurin käytössä oleva sähkökattila-lämpövarastoyhdistelmä sijatsee Vaasassa. Vaasan Sähkö Oy. Saatavissa (viitattu 2.5.2024): https://www.sttinfo.fi/tiedote/70057672/suomen-suurin-kaytossa-oleva-sahkokattila-lampovarastoyhdistelma-sijatsee-vaasassa?publisherId=58661976

Suutarinen, M., 2023. Suomen suurin sähkökattila-lämpövarastoyhdistelmä käyttöön Vaasassa. Vaasan Voima. Saatavissa (viitattu 6.5.2024): https://www.vaasan-voima.fi/suomen-suurin-sahkokattila-lampovarastoyhdistelma-kayttoon-vaasassa/

Tarkowski, R., Lankof, L., Luboń, K., Michalski, J., 2024. Hydrogen storage capacity of salt caverns and deep aquifers versus demand for hydrogen storage: A case study of Poland. Appl. Energy 355, 122268. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122268

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023. Valtioneuvoston periaatepäätös vedystä. Valtioneuvosto. http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-990-8

Yu, Z.-Y., Duan, Y., Feng, X.-Y., Yu, X., Gao, M.-R., Yu, S.-H., 2021. Clean and Affordable Hydrogen Fuel from Alkaline Water Splitting: Past, Recent Progress, and Future Prospects. Adv. Mater. 33, 2007100. https://doi.org/10.1002/adma.202007100

Zhang, X., Jiao, K., Zhang, J., Guo, Z., 2021. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World. Journal of Cleaner Production 306, 127259. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259

Zivar, D., Kumar, S., Foroozesh, J., 2021. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. Int. J. Hydrog. Energy, Hydrogen Separation, Production and Storage 46, 23436–23462. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138