



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Mikael Karvonen

Vedyn käyttö säätövoiman tuotannossa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Sähkö- ja energiatekniikka, kandidaatin tutkielma
Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Mikael Karvonen		
Tutkielman nimi:	Vedyn käyttö säätövoiman tuotannossa		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma		
Opintosuunta:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Teemu Ovaska		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	29

TIIVISTELMÄ:

Vetytalouden avulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita energiantuotannossa. Vetyä voidaan käyttää monessa käyttötarkoituksessa. Sitä voitaisiin hyödyntää sähköverkon tasapainottamiseksi säätövoiman tuotannossa. Sähköistyvässä yhteiskunnassa, missä nojaututaan sähköntuotannossa yhä enemmän sääolosuhteista riippuvaiselle aurinko- ja tuulivoimalle, säätövoimalle on yhä enemmän tarvetta.

Tutkimuksen tavoitteena on arvioida sitä, olisiko vedyllä mahdollista tuottaa säätövoimaa sähköverkon tasapainottamiseksi sähkön tuotannon ja kysynnän vaihdellessa nopeasti sähköistyvässä yhteiskunnassa. Työssä hyödynnettiin aiemmin tehtyjä tutkimuksia ja raportteja.

Tutkimuksen perusteella elektrolyysiteknologian kehittyminen ja esimerkiksi biokaasuprosessin hyödyntäminen voivat parantaa vedyn tuotannon kannattavuutta. Kannattavampi tuotanto mahdollistaisi vedyn käytön säätövoimana, sillä uusien energiaratkaisujen yleistymistä rajoittaa usein niiden korkea hinta. Lisäksi vetytalouden laajuus tarjoaa vetyä hyödynnettäväksi myös esimerkiksi raskaassa liikenteessä ja teollisuudessa. Tuotannon kasvaessa vedyn hinnan voidaan odottaa laskevan, mikä parantaa sen kilpailukykyä suhteessa muihin polttoaineisiin.

AVAINSANAT: sähköntuotanto, säätövoima, vetytalous

Sisällys

1	Johdanto	5
2	Vedyn tuottaminen uusiutuvalla energialla	7
2.1	Vedyn historiaa	8
2.2	Vedyn ominaisuuksia	9
2.3	Elektrolyysi	11
2.4	Vedyn tuottaminen hyödyntämällä biokaasuprosessia	14
2.5	Vedyn varastointi ja siirto	15
3	Vedyn mahdollisuudet sähköntuotannossa	16
3.1	Miksi säätövoimaa tarvitaan	16
3.2	Vedyn tarpeellisuus säätövoimana	18
3.3	Muita energiantantajia säätövoiman tuotannossa	21
4	Muut käyttökohteet vedylle	23
4.1	Vedyn käyttö liikenteessä	23
4.2	Vedyn käyttö teollisuudessa	24
5	Johtopäätökset	25
6	Yhteenveto	27
	Lähteet	28

Kuvat

- Kuva 1. Yleiskuva vedyn vaihtoehtoisista arvoketjuista (Sivill ja muut, 2022, s. 21). 8
- Kuva 2. Sähkön kokonaiskulutuksen huipputeho ja tuotantokapasiteetti huippukuormituksella Suomessa (Huttunen ja muut, 2022, s. 150). 18
- Kuva 3. Tuulivoimatuotannon osuus kokonaiskysynnästä eri skenaarioissa Suomessa (Sivill ja muut, 2022, s. 192). 19

Taulukot

- Taulukko 1. Vedyn fyysiset ominaisuudet (Godula-Jopek, 2015, s. 20). 10
- Taulukko 2. Vertailu vedyn ominaisuuksista suhteessa muihin polttoaineisiin (Godula-Jopek, 2015, s. 21). 11
- Taulukko 3. Elektrolyysiteknologioiden päätyyppien parametreja (Spoof-Tuomi, 2024, s. 23). 13

1 Johdanto

Uusiutuvalla energialla tuotetulle vedylle on muodostunut 2020-luvulla suuria odotuksia niin teollisuudessa kuin liikenteessä. Eri valtiot ovat tehneet omia suunnitelmia vedyn käytön lisäämiseksi, ja myös Euroopan komissio on määritellyt strategian vetytalouteen. Vedyn tiedetään olevan uusiutuvista energiankantajista parhaiden joukossa, ja sen tuottaminen päästöttömästi on yksinkertaista suhteessa muihin (Sivill ja muut, 2022, s. 17).

Hiilidioksidipäästöjen poistamiseksi sähköntuotannossa tulee hyödyntää mahdollisimman laajasti erilaisia energiankantajia, kuten vetyä ja sen johdannaisia, joista monet tuotetaan sähkökemiallisin reitein (Bhattacharyya ja muut, 2024). Vetyenergian sisällyttäminen osaksi sähköntuotantoa voidaan siis täten pitää mielessä tulevaisuutta ajatellen. Esimerkiksi polttomoottorilla tuotetulla sähköllä on etuja suhteessa aurinko- ja tuulivoimalla tuotettuun sähköön, sillä tuotantomäärä ei ole riippuvainen vallitsevasta säätilasta. Säättövoiman tarpeen voi olettaa kasvavan tulevaisuudessa, sillä aurinko- ja tuulivoiman tuotannon määrää ei voi kasvattaa kysynnän kasvaessa huomattavasti kulutuspiikeissä. Kovimmissa kulutuspiikeissä syntyvän loven voi paikata säättövoimalla (Energiateollisuus, n.d).

Säättövoiman tuotannossa on käytetty useita energiankantajia. Suomessa on käytetty vesivoimaa ja lisäksi sähköä on ostettu muista Pohjoismaista, joissa on tarjolla paljon vesivoimatuotantoa (Energiateollisuus, n.d). Energijärjestelmän saamiseksi päästöttömäksi fossiilipohjaisista polttoaineista tulee päästä eroon. Vetyä voidaan käyttää tulevaisuudessa korvaavana polttoaineena siirryessä pois fossiilisista polttoaineista.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voidaanko vetyä hyödyntää säättövoiman tuottamiseen sähköverkon tasapainottamiseksi tilanteissa, joissa sähkön tuotanto ja kulutus vaihtelevat nopeasti sähköistyvässä yhteiskunnassa. Säättövoiman tuotannossa on perinteisesti käytetty vesivoimaa sekä fossiilisia polttoaineita, kuten maakaasua.

Tutkielma on kirjallisuuskatsaus, ja siinä käydään läpi vetytaloutta ja sen eri osa-alueita aiempiin tutkimuksiin pohjautuen. Tutkimuksissa esitetyistä asioista päätellään, missä kaikkialla vetyä voidaan käyttää, ja nähdäänkö siinä potentiaalia sähköverkon tasapainottamisessa sähköistyvässä maailmassa.

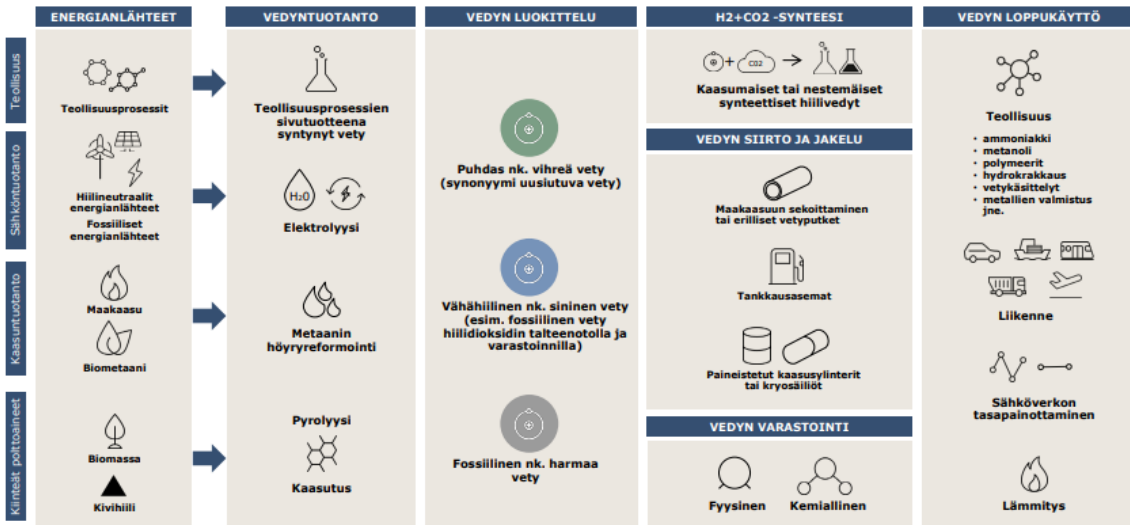
2 Vedyn tuottaminen uusiutuvalla energialla

Tässä luvussa keskitytään vetypolttoaineen tuotantoon uusiutuvalla energialla, sillä se liittyy olennaisesti säätövoiman tuottamiseen vedyllä tulevaisuudessa. Vähäpäästöisen eli vihreän vedyn tuotanto tapahtuu perinteisesti elektrolyysillä. Myös biokaasuprosessissa syntyy oheistuotteena vetyä, jota voidaan hyödyntää vetytaloudessa. Luvussa käydään myös läpi vedyn käytön historiaa, vedyn ominaisuuksia sekä sen siirtoa ja varastointia. Vedyn ominaisuudet polttoaineena ovat erilaiset suhteessa muihin polttoaineisiin. Lisäksi vedyn siirto ja varastointi vaatii oman infrastruktuurin toimiakseen. Nämä asiat tulee ottaa huomioon pohtiessa vedyn käyttöä säätövoiman tuotannossa.

Säätövoiman tuotannossa käytettävä vety valmistetaan ensin. Vedyn valmistaminen kuuluu vetytalouden arvoketjussa alkupäähän. Vetytaloudella tarkoitetaan muun muassa fossiilisten polttoaineiden korvaamista vedyllä. Vetytalouden arvoketjuun kuuluu vedyn tuotanto, varastointi, siirto, mahdollinen jalostaminen ja loppukäyttö (Patronen & Sivill, 2022, s. 9).

Suomessa on paljon vahvuuksia vetytalouden kannalta. Niitä ovat paljon tarjolla oleva edullinen uusiutuva energia, vakaa sähköverkko, teollisen ja energia-alan osaaminen ja biopohjaiset hiilidioksidilähteet. Lisäksi Suomessa on lukuisia kaukolämpöverkkoja, joihin voidaan ohjata vedyn tuotannosta syntyvät hukkalämmöt. On olemassa suuria mahdollisuuksia rakentaa vetytaloudelle arvoketjuja, joiden avulla Suomi pystyisi tavoittelemaan johtavaa asemaa Euroopan vetytaloudessa (Keski-Luopa, 2024, s. 8).

Kuvassa 1 on esitettyä yleiskuva vetytalouden vaihtoehtoisista arvoketjuista. Vedyllä on kuvan mukaisesti monta vaihetta ennen sen loppukäyttöä. Tähän kuuluu energianlähteet, vedyntuotanto, vedyn luokittelu, vedyn siirto ja jakelu, vedyn varastointi sekä vedyn loppukäyttö. Tässä tutkielmassa keskitytään vetytalouden arvoketjussa vedyn tuotantoon elektrolyysillä, vedyn siirtoon ja jakeluun, vedyn varastointiin sekä vedyn loppukäytössä sähköverkon tasapainottamiseen.



Kuva 1. Yleiskuva vedyn vaihtoehtoisista arvoketjuista (Sivill ja muut, 2022, s. 21).

Uusiutuvalla energialla tuotettu vety tehdään elektrolyysiprosessilla. Tässä prosessissa vesimolekyylä hajotetaan vedyn ja hapen sähköenergian avulla. Sähköenergia, mitä käytetään vedyn tuottamiseen, täytyy olla hiilineutraalisti tuotettua. Uusiutuvaa vetyä pystytään tuottamaan jonkin verran suoraan uusiutuvista raaka-aineista. Tällaisia on muun muassa biometaanit sekä biomassa. Biometaanista pystytään erottamaan vetyä höyryreformoinnin avulla, ja biomassasta pyrolyysiprosessin avulla. Tällä hetkellä suurin osa vedystä tuotetaan öljynjalostuksessa ja sitä käytetään enimmäkseen ammoniakki valmistuksessa. Tänä päivänä valtaosa vedystä tuotetaan siis fossiililla polttoaineella (Sivill ja muut, 2022, s. 20).

2.1 Vedyn historiaa

Vedyn käytöllä liikenteessä on pitkä historia. Yksi ensimmäisistä julkisista näytöksistä, missä vedyn potentiaalia on esitetty, tapahtui 1700-luvulla Pariisissa, kun Jacques Charles sekä Nicolas Robert tekivät ensimmäisen miehitytyn lennon. Lento tapahtui vetyilmalla ja se kesti 45 minuuttia ja se päättyi 21 kilometrin päähän aloituspaikasta. Ensimmäinen polttomoottorilla toimiva auto, mikä käytti polttoaineena vedyn ja hapen

seosta rakennettiin Françoise Isaac de Rivazin toimesta vuonna 1807 Sveitsissä. Tämä oli myös ensimmäinen polttomoottorilla toimiva ajoneuvo. Vedyn päätoimisia käyttötarkoituksia 1900-luvulla oli ydinsukellusveneissä, ilmalaivoissa sekä rakettien laukausjärjestelmissä 1960-luvulla. Ensimmäiset tutkimukset nestemäisen vedyn käytöstä rakettien työntövoimana alkoivat Yhdysvalloissa vuonna 1945. Myöhemmin siitä tulikin yleinen vaihtoehto raketeissa sekä laukaisimissa (Godula-Jopek, 2015, s. 20–21).

2.2 Vedyn ominaisuuksia

Vetyä pidetään yhtenä tärkeänä tulevaisuuden energiamuotona, sillä sitä pystytään varastoimaan ja sitä pystytään käyttämään toimivassa olomuodossa. Kun lämpötila on 0 °C ja paine 1 bar vety on kaasumaisessa olomuodossa. Se on hajuton, mauton, myrkytön ja kevyempää kuin ilma. Vetyä on runsaasti maapallolla käytettäväksi ja sitä löytyy joka puolelta maailmankaikeudesta. Pienimpänä atomina se vastaa massan suhteen 75 prosenttia ja tilavuuden suhteen 90 prosenttia kaikesta materiaasta universumissa. Energian kantajana vety ei ole itsessään energian lähde, vaan sitä tuotetaan käyttämällä muita energiamuotoja kuten fossiilisia polttoaineita, uusiutuvia polttoaineita tai ydinenergiaa. Vedyn palamisreaktio hapen kanssa muodostaa vettä, jolloin minkäänlaisia hiilipitoisia kasvihuonekaasuja ei synny (Godula-Jopek, 2015, s. 19).

Taulukossa 1 on esitetty vedyn ominaisuuksia. Vedyn molekulaarinen paino on hyvin pieni, joten se nousee ilmassa hyvin nopeasti ylöspäin. Tämän vuoksi vety myös vuotaa herkästi sitä varastoitaessa. Vedyn sulamispiste 13,96 K on hyvin alhainen, joten sen saaminen kiinteään olomuotoon vaatii hyvin pienen lämpötilan. Lisäksi kiehumispiste ilmakehässä on 14,0 K. Näin ollen vety on lähes aina kaasumaisessa olomuodossa sitä varastoitaessa sekä käytettäessä. Vetykaasun tiheys on hyvin pieni, joten sitä täytyy varastoida hyvin suuressa paineessa. Vedyn ylempi ja alempi lämpöarvo ovat hyvin korkeita, joten sen energiasisältö painoon nähden on suuri. Vedyn itsesyttymislämpötila on suhteellisen korkea, joten se ei syty kovin herkästi itsestään. Sen sijaan vedyn syttymisrajat hapessa ja ilmassa ovat laajat, jolloin vetyä voidaan käyttää

polttomoottorissa säätövoiman tuotannossa hyvin laihalla seoksella (Godula-Jopek, 2015, s. 20).

Parametri	Arvo	Yksikkö
Molekulaarinen paino	2,016	Mol
Sulamispiste	13,96	K
Kiehumispiste (1 atm paineessa)	14,0	K
Kaasun tiheys (0 °C ja 1 atm)	0,0899	g l ⁻¹
Ylempi lämpöarvo (25°C ja 1 atm)	265,0339	kJ g ⁻¹ mol ⁻¹
Alempi lämpöarvo (25°C ja 1 atm)	241,9292	kJ g ⁻¹ mol ⁻¹
Itsesyttymislämpötila	858	K
Syttymisrajat hapessa	4–94	%
Syttymisrajat ilmassa	4–74	%

Taulukko 1. Vedyn fyysiset ominaisuudet (Godula-Jopek, 2015, s. 20).

Taulukossa 2 on vertailtuna vetykaasun ominaisuuksia 200 bar paineessa suhteessa metanoliin ja dieseliin. Vedyn massakohtainen energiatiheys on kuusinkertainen metanoliin verrattuna, ja yli kaksinkertainen dieseliin verrattuna. Sen sijaan vedyn tilavuuskohtainen energiatiheys on kymmenesosa metanoliin verrattuna ja kahdeskymmenesosa dieseliin verrattuna. Vedyn energiatiheys on metanoliin ja dieseliin verrattuna hyvin erilainen (Godula-Jopek, 2015, s. 21).

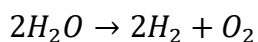
Polttoaine	Massakohtainen energiatiheys (MJ/kg)	Tilavuuskohtainen energiatiheys (MJ/l)
Vetykaasu (200 bar)	120	2,1
Metanoli	19,7	15,7
Diesel	45,3	35,5

Taulukko 2. Vertailu vedyn ominaisuuksista suhteessa muihin polttoaineisiin (Godula-Jopek, 2015, s. 21).

2.3 Elektrolyysi

Elektrolyysiä on käytetty melkein vuosisadan ajan metallurgiassa. Sitä pidetään tänä päivänä myös hyvänä teknologiana vedyn tuottamiseen vedestä. Tässä tapauksessa vesimolekyyli hajotetaan elektrolyysissä vedyksi ja hapeksi. Vety, mikä on tuotettu elektrolyyttisesti, on hyvin puhdasta ja sen puhtausaste on jopa 99,999 tilavuusprosenttia (Spoof-Tuomi, 2024, s. 22).

Kaavassa 1 on esitettyä elektrolyysissä tapahtuva kemiallinen reaktio. Kahdesta vesiatomista syntyy kaksi vetymolekyyliä ja yksi happimolekyyli. Vety- ja happimolekyyli erotetaan toisistaan elektrolyysiprosessissa, jotta ne eivät sekoittuisi keskenään (Spoof-Tuomi, 2024, s. 22).



(Kaava 1)

Elektrolyysikennot muodostavat elektrolyysilaitteiston ytimen. Elektrolyysikennoon kuuluu kaksi elektroodia. Näitä ovat positiivisesti varautunut anodi, sekä negatiivisesti varautunut katodi. Lisäksi elektrolyysikennoon kuuluu elektrolyytti. Kennoreaktio eli reaktiot katodilla ja anodilla syntyvät, kun kennoon johdetaan jännite. Tällöin vesi hajoaa vedyksi ja hapeksi. Veden hyvän sähkönjohtavuuden aikaansaamiseksi tarvitaan elektrolyytti. Elektrolyytti voi olla kiinteä tai nestemäinen. Hapen ja vedyn erottamiseksi

katodilla ja anodilla tapahtuvat reaktiot täytyy eristää toisistaan kalvolla (Spoof-Tuomi, 2024, s. 22).

Taulukossa 3 on esitetty erilaisia elektrolyysiteknologioita sekä niiden ominaisuuksia. Yleisesti ottaen elektrolyysereitä on kolmea erilaista päätyyppiä. Näitä ovat alkalielektrolyysi (AEL), protoninvaihtomembraanielektrolyysi (PEM) ja kiinteäoksidielektrolyysi (SOEL). Suurin näitä teknologioita erottava tekijä on käytetty elektrolyytti sekä toimintalämpötila. AEL sekä PEM toimivat matalassa lämpötilassa, ja ne ovat laajalti saatavilla kaupallisesti. SOEL-teknologiaa ei ole kehitetty yhtä laajasti ja se toimii korkeammassa lämpötilassa (Spoof-Tuomi, 2024, s. 22).

Teknologia	AEL	PEM	SOEL
Elektrolyytti	20–40 m-% KOH	PFSA membraani	Kiinteä oksidi (YSZ)
Toimintalämpötila (°C)	60–90	50–80	700–900
Tyypillinen toimintapaine (bar)	10–30	20–50	1–15
Sähkövirran tiheys (A/cm ²)	0,2–0,8	0,6–2,0	0,3–2,0
Ominaisenergiankulutus, kennosto (kWh _{el} /Nm ³ H ₂)	4,2–4,8	4,4–5,0	> 3,0
Ominaisenergiankulutus, järjestelmä (kWh _{el} /Nm ³ H ₂)	5,0–5,9	5,0–6,5	3,7–4,7
Vedyn puhtausaste (%)	> 99,95	99,99	99,90
Kuorman joustavuus (% nimelliskuormasta)	15–100	0–100	-100/+100
Käynnistysaika kylmänä (min)	60	< 20	> 600
Käynnistysaika lämpimänä (s)	60–300	< 10	900
Järjestelmän vasteaika	sekunteja	millisekunteja	sekunteja
Kennoston elinikä (h)	60000–90000	20000–60000	< 20000
Kennostoyksikön koko	≤ 6 MW	≤ 2MW	5 kW
Teknologian kypsyys	kaupallinen	kaupallinen	demonstraatio
Pääomakustannukset, kennosto (1 MW) (USD/kW)	270	400	< 2000
Pääomakustannukset, järjestelmä (> 10 MW) (USD/kW)	500–1000	700–1400	ei tiedossa

Taulukko 3. Elektrolyysiteknologioiden päätyyppien parametreja (Spoof-Tuomi, 2024, s. 23).

Alkalielektrolyysi on elektrolyysiteknikoista kaikista yleisin. Sitä on testattu ja käytetty kaikista eniten. AEL toimii siten, että anodi ja katodi upotetaan nestemäiseen alkaliseen liuokseen, joka on useimmiten kaliumhydroksidi (KOH). Sen pitoisuus on 20–40

massaprosenttia. Alkaliseen liuokseen on asetettu huokoinen välikalvo, minkä tarkoitus on estää hapen ja vedyn sekoittuminen siten, että kuitenkin ionit pystyvät kulkeutumaan sen läpi. Riittävän suuri jännite aikaansaa kemiallisen reaktion alkalisen liuoksen molekyyliä lopputuloksena vety- (H^+) ja hydroksidi-ioneja (OH^-). Katodilla pelkistyy kaasumaista vetyä, kun vetyionit vastaanottavat elektroneja. Happea ja vetyä syntyy, kun hydroksidi-ionit hapettuvat kulkiessaan kalvon läpi anodille. Anodista elektronit siirtyvät ulkoiseen piiriin (Spoof-Tuomi, 2024, s. 23).

Euroopassa on runsaasti alueita, joissa uusiutuvan energian tuotantoa voidaan kasvattaa, ja koko Suomi kuuluu näihin alueisiin. Sähköntuotannon lisäystä voitaisiin hyödyntää elektrolyysissä, jolloin ylimääräiseksi jäänyttä sähköä käytettäisiin vedyntuotannossa. Toisin sanoen vihreän sähkön tuotannon määrän kasvaessa ylimääräistä sähköä tulisi olemaan tulevaisuudessa saatavilla (Kakoulaki ja muut, 2020). Tällöin elektrolyysit toimisivat joustavana kuormana, joka itsessään toimisi säätövoimana ja tasapainottaisi sähköverkkoa.

2.4 Vedyn tuottaminen hyödyntämällä biokaasuprosessia

Suomessa muodostuu merkittäviä määriä biokaasuprosessiin soveltuvia biomassoja. Nämä muodostavat teoreettisen energiapotentiaalin, ja tähän voidaan laskea mukaan myös vedystä saatava energia. Vedyn osuus tästä on noin 5 %. Kaikkea tästä ei voida hyödyntää, mutta hyödynnettävissä olevan vetyenergian määrä on huomattava (Tähti & Rintala, 2010, s. 29).

Biokaasuprosessissa, jossa mikro-organismit hajottavat orgaanista ainesta biokaasuksi, syntyy välituotteena vetyä. Tämän prosessin olosuhteet voidaan säätää siten, että osa orgaanisesta aineksesta hajoaa vedyksi. Tällöin prosessin lopputuotteena on vetyä ja metaania (Tähti & Rintala, 2010, s. 1).

2.5 Vedyn varastointi ja siirto

Vetyä pitää varastoida sen tuotannon ja loppukäyttäjän välillä. Sivutuotteena syntyneen vedyn varastointi kestää useimmiten korkeintaan muutamia minuutteja. Näissä niin kutsutuissa välivarastoissa vetyä varastoidaan jopa 250–300 bar paineessa. Välivarastointiin menee ylimääräistä sähköä, koska vety varastoidaan korkeampaan paineeseen kuin tuotanto- ja loppukäyttöprosesseissa. Vety läpäisee herkästi materiaaleja, mistä syntyy häviöitä. Tämä tulee ottaa huomioon vedyn pitkäaikaisvarastoinnissa (Sivill ja muut, 2022, s. 191).

Vedyn kyky läpäistä materiaaleja aiheuttaa häviöitä myös vedyn siirrossa. Vetyä voidaan siirtää samankaltaisesti putkistossa kuin maakaasua, mutta sitä häviää jatkuvasti putkiston seinämien läpi. Häviöiden on arvioitu olevan erään tutkimuksen mukaan 0,77 % sataa kilometriä kohden. Maakaasun siirrossa häviöitä ilmenee lähinnä putkistojen rikkoutumisten tai materiaalivaurioiden yhteydessä (Sivill ja muut, 2022, s. 191).

3 Vedyn mahdollisuudet sähkötuotannossa

Suomessa tuotetaan sähköä monella eri tuotantotavalla ja energianlähteellä. Tärkeimmät lähteet sähkön tuotantoon ovat ydinvoima, vesivoima, puupolttoaineet sekä tuulivoima. Vuonna 2025 96 % Suomen sähkötuotannosta tehtiin hiilidioksidineutraalisti. Suomessa on vesivoimalla tuotettua säätövoimaa rajatusti maanpinnan vähäisten korkeuserojen vuoksi (Energiateollisuus, n.d).

Vaikka vetyä on pidetty ensisijaisesti polttoaineena liikennekäytössä, sillä on paljon potentiaalia käytettäväksi lukuisissa muissa käyttötarkoituksissa, kuten sähköverkon tasapainottamisessa. Vety ja sähköenergia liittyvät toisiinsa olennaisesti. Tulevaisuuden vetytaloudessa tätä kaksisuuntaista energianmuuntoa voidaan hyödyntää huomattavasti (Grasman, 2013, s. 2).

Jotta sähköverkko toimii luotettavasti vähähiilisissä sähköjärjestelmissä, energian muunto- ja varastointiratkaisut tulevat olemaan merkittävässä roolissa. Energian varastointiratkaisuja tarvitaan sekä lyhytaikaiseen kuin myös pidempiaikaiseen käyttöön. Varastointiin tarvittava aika voi vaihdella sekunnin murto-osista päiviin tai viikkoihin asti (Bhattacharyya ja muut, 2024).

Vetyä voidaan muuntaa takaisin sähköksi tilanteissa, joissa uusiutuvaa energiaa ei ole saatavilla oletettua pidempään. Sähkön tarjonnan ylittäessä kysynnän, vedyn tuottaminen auttaa myös täyttämään teollisuuden tarpeita (Bhattacharyya ja muut, 2024). Vetyä voidaan siis käyttää sähköverkon tasapainottamisen lisäksi myös teollisuuden energiatarpeissa.

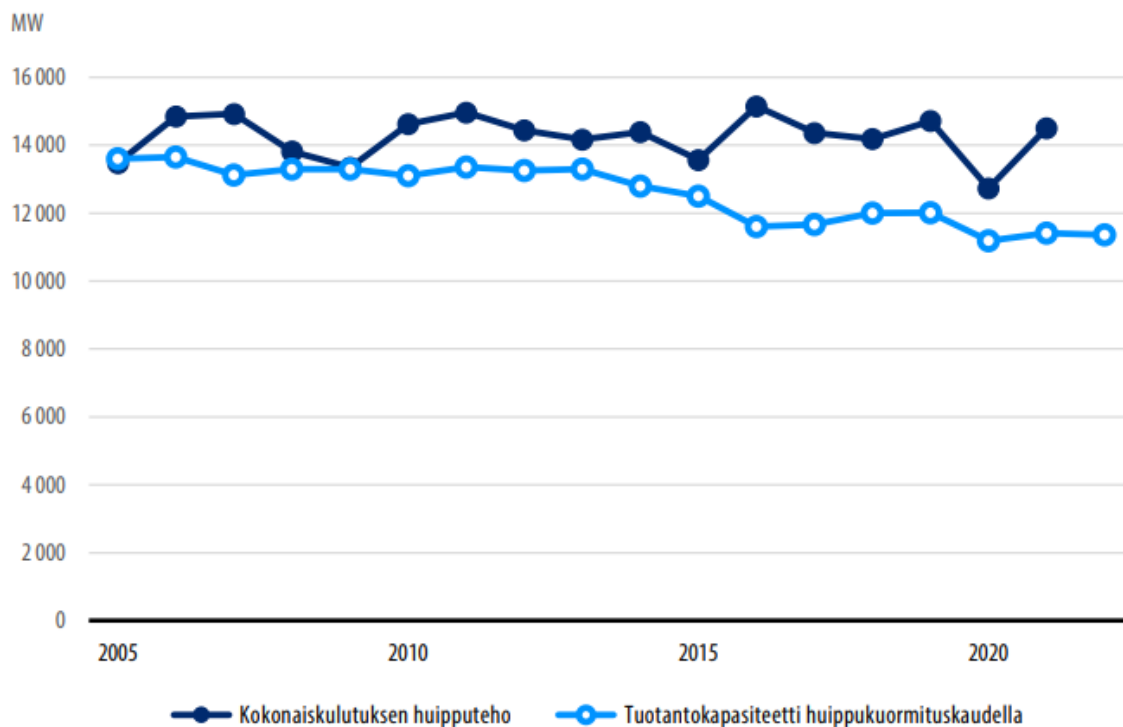
3.1 Miksi säätövoimaa tarvitaan

Säätövoiman tarkoituksena on hallita sähkön tuotannon ja sen kulutuksen vaihteluita. Sähköverkossa tulee olla koko ajan saman verran sähköä tuotannossa kuin sitä myös

kulutetaan. Säättövoiman avulla voidaan myös varautua myös häiriötilanteisiin (Energiateollisuus, n.d).

Säättötarpeen odotetaan lisääntyvän tulevaisuudessa Länsi- ja Pohjois-Euroopassa, sillä suuri määrä sähköntuotantoa, joka perustuu lämpövoimaan, on poistumassa samaan aikaan kuin sään mukaan vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian osuus kasvaa. Säättövoiman lisääntyvään tarpeeseen vaikuttaa myös yhteiskunnan sähköistyminen (Energiateollisuus, n.d).

Kuvassa 2 on esitettyä sähkön kokonaiskulutuksen huipputeho ja tuotantokapasiteetti huippukuormituksella Suomessa. Säättövoiman tarve huippukulutuksella on kuvaajien erotus. Kuvan perusteella säättövoiman tarve on kasvanut vuosien aikana, sillä sähkön tuotantokapasiteetti on laskenut tasaisesti 20 vuoden aikana samaan aikaan, kun kokonaiskulutuksen huipputeho on pysynyt samalla tasolla. Kokonaiskulutuksen huipputehon voidaan kuitenkin kasvavan huomattavasti tulevaisuudessa yhteiskunnan sähköistymisen vuoksi, jolloin säättövoiman tarve kasvaa edelleen (Huttunen ja muut, 2022, s. 150).



Kuva 2. Sähkön kokonaiskulutuksen huipputeho ja tuotantokapasiteetti huippukuormituksella Suomessa (Huttunen ja muut, 2022, s. 150).

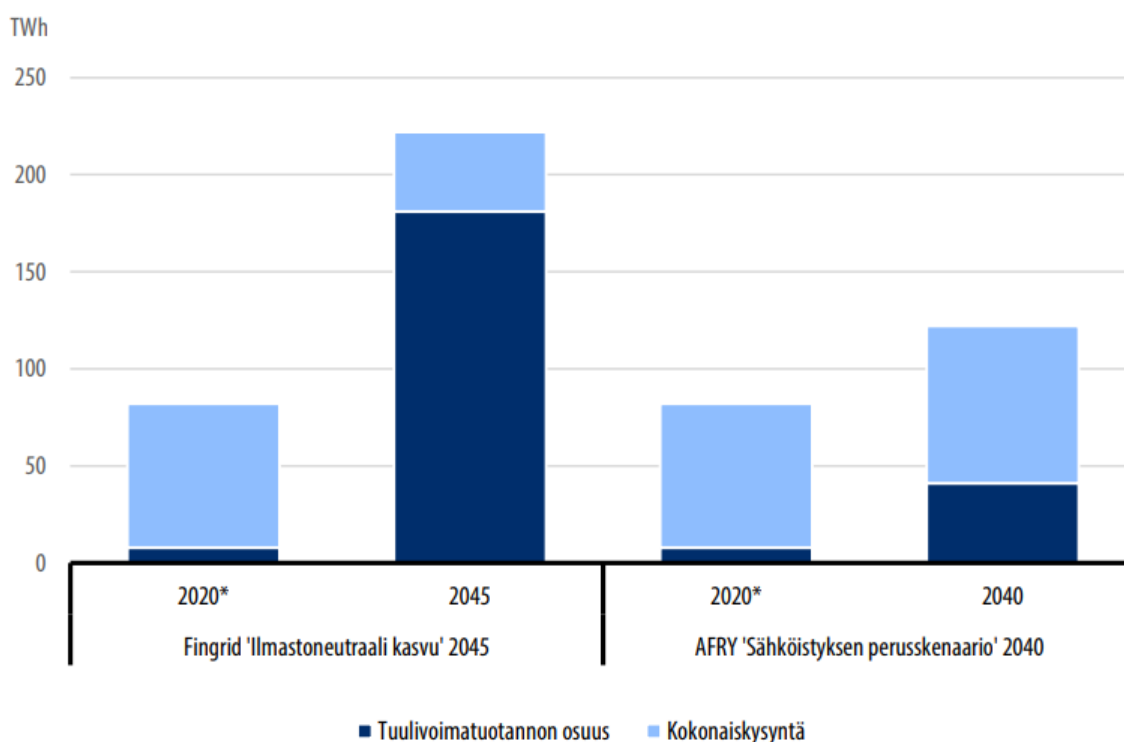
Suomi on tuontiriippuvainen sähköstä, jolloin häiriötilanteet sähköjakelussa voivat vaikuttaa merkittävästi sähkön riittävyyteen. Sähkön kulutus on suurimmillaan talvikuukausina. Vaikka vuonna 2022 voimaloiden nimellinen sähköntuotantokapasiteetti oli 17 500 MW, todellinen käytettävissä oleva sähköntuotantokapasiteetti oli alle 12 000 MW. Tämä johtuu siitä, että kaikkea kapasiteettia ei pystytä käyttämään tietyllä ajanhetkellä, sillä tuotantoon vaikuttaa esimerkiksi sääolot ja vesitilanne (Huttunen ja muut, 2022, s. 149).

3.2 Vedyn tarpeellisuus säätövoimana

Uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön osuuden kasvu aiheuttaa merkittävää vuorokausivaihtelua verkkoon syötetyssä tehossa niiden luontaisen säästä johtuvan epäsäännöllisyyden vuoksi (Bhattacharyya ja muut, 2024). Suomessa sähköntuotanto tulee yhä enemmän pohjautumaan etenkin maatuulivoimaloihin, mutta myös merituulivoimaloihin sekä aurinkosähköpaneeliin (Sivill ja muut, 2022, s. 192). Sähkön

tuotannon vuorokausivaihteluiden takia syntyy jaksoja, jolloin tuotanto ylittää kysynnän tai päinvastoin, mikä edellyttää joko kuormituksen hallintaa, tai varageneraattoreiden kytkemistä sähköverkkoon (Bhattacharyya ja muut, 2024).

Kuvassa 3 on esitettyä tuulivoimatuotannon osuus kokonaiskysynnästä eri skenaarioissa Suomessa. Yhteiskunnan sähköistyksen myötä kokonaiskysynnän odotetaan kasvavan moninkertaiseksi vuoden 2020 tasosta vuoteen 2045 mennessä. Lisäksi sääolosuhteista riippuvan tuulivoimantuotannon osuus oletetaan kasvavan huomattavasti suhteessa muihin (Sivill ja muut, 2022, s. 192).



Kuva 3. Tuulivoimatuotannon osuus kokonaiskysynnästä eri skenaarioissa Suomessa (Sivill ja muut, 2022, s. 192).

Vedyntuotanto on integroitava järjestelmään tavalla, joka mahdollistaa fossiilisten ja ydinvoimalaitosten peruskuormatuotannon. Tällöin tulee välttää uusiutuvien energialähteiden tuotannon rajoittamista, mutta energian varastointikapasiteetin tarve tulee minimoida (Bhattacharyya ja muut, 2024).

Suurin osa Suomessa käytettävästä säätövoimasta ostetaan muista Pohjoismaista, joissa on paljon hyvin saatavilla olevaa vesivoimantuotantoa (Energiateollisuus, n.d). Vesivoimaa on käytetty Pohjoismaissa yleisesti tuotannon sekä hintavaihteluiden tasaajana. Käytettävissä oleva vesivoima ei kuitenkaan riitä kattamaan tarvittavaa säätövoiman tarvetta, kun energiankäytössä nojataan yhä enemmän sähkөөn. Sähkön käytön odotetaan kasvavan tulevaisuudessa huomattavasti (Sivill ja muut, 2022, s. 191).

Fingrid on tehnyt Suomen vetytalouden kehityksestä kolme eri skenaariota. Skenaarioissa on oletettuna se, että Suomi tavoittaa asettamansa hiilineutraaliustavoitteensa. Lisäksi fossiiliset polttoaineet korvattaisiin enimmäkseen sähköllä, jonka vuoksi sähkön kysyntä kasvaisi merkittävästi nykyisestä. Suomeen oletetaan myös syntyvän paljon sähköä kuluttavaa teollisuutta. Jokaisen skenaarion mukaan Suomeen rakennettaisiin merkittävästi lisää uusiutuvaa sähköntuotantoa, kuten maatuulivoimaa, jolloin vedyn tuotannon määrää voitaisiin kasvattaa. Lisäksi vedyn siirtämiseen rakennettaisiin putkistoja Suomesta joko Ruotsiin ja Keski-Eurooppaan, Pohjois-Ruotsiin tai vain Suomen alueelle. Ulkomaille rakennettujen putkistojen avulla vetyä voitaisiin tällöin viennin lisäksi tuoda tarvittaessa Suomeen. Vedyn varastointiin rakennettaisiin vetyvarastoja, jolloin vetyä voitaisiin käyttää helpommin sähköntuotannossa (Fingrid & Gasgrid Finland, 2023, s. 26–28).

Vedyn tuotantopotentiaali saadaan hyödynnettyä vain, jos sähköverkkoa vahvistetaan. Tämä johtuu siitä, että ilman uusiutuvan energian tuotannonlisäystä ja sähkönsiirtoverkon mahdollistamaa sähkönsiirtoa, vihreän vedyn tuottaminen on kallista ja tehotonta. Vedyn kilpailukyvyyn mahdollistamiseksi vedyn tuotanto ja kuluttaminen samassa paikassa on oleellista (Fingrid & Gasgrid Finland, 2023, s. 13).

Vetyä voitaisiin käyttää polttoaineena esimerkiksi kaasuvoimaloissa. Kaasuturbiinissa vetyä käytetään polttokammion polttoaineena, ja vedyn palaminen tuottaa kuumia kaasuja, jotka pyörittävät turbiinia. Turbiiniin on yhdistettynä generaattori, joka tuottaa

sähköä. Vety toimii teknisesti hyvin polttoaineena turbiinissa, ja sen käyttö vähentää päästöjä huomattavasti suhteessa perinteisesti käytettäviin fossiilipohjaisiin polttoaineisiin, kuten maakaasuun (Alhuyi Nazari ja muut, 2022).

Kaasuturbiinien hyvänä puolena on se, että ne voidaan käynnistää nopeasti. Tämä osaltaan vaikuttaa niiden toimivuuteen säätövoiman tuotannossa, ja kaasuturbiineja onkin käytetty perinteisesti sähköverkon tasapainottamisessa. Vedyllä toimivat kaasuturbiinit voidaan integroida muiden energiajärjestelmien kanssa, jolloin vaihtelevaa uusiutuvan sähkön tuotantoa tasapainotetaan (Alhuyi Nazari ja muut, 2022).

3.3 Muita energiantantajia säätövoiman tuotannossa

Säätövoimaa tuotetaan useimmiten voimalaitoksilla, jotka pystyvät nopeasti lisäämään ja vähentämään energiantuotantoaan vastatakseen hetkellisiä sähkönkulutuksen muutoksia. Säätövoiman tuotannossa on perinteisesti käytetty vesivoimaa sekä kaasuturbiineja. Vesistöt, jotka sijaitsevat merenpinnan yläpuolella sisältävät huomattavan määrän potentiaalienergiaa, ja ne toimivat täten energiavarastoina. Vesistöistä voidaan ohjata tarpeen mukaan vettä vesivoimalaitoksiin, joita voidaan helposti ja nopeasti käynnistää, säätää sekä pysäyttää. Suurin osa sähköverkon tasapainottamiseksi tuotetusta säätövoimasta Suomessa perustuu tänä päivänä vesivoimaan (Energiateollisuus, n.d).

Nykyaikaisia litiumioniakkuja voidaan käyttää sähköverkossa saatavilla olevan ylijäämäsiähkön varastoimiseen. Niistä kyetään saamaan aikaiseksi korkeat purkunopeudet. Niiden lataamiseen menee kuitenkin paljon aikaa, mikä on riippuvainen akun hetkellisestä varaustilasta. Tämän takia niiden kyky vastaanottaa ylimääräistä sähköä sekä niiden kulumisnopeus ja kokonaiskäyttöikä huononee (Bhattacharyya ja muut, 2024).

Akkuihin voidaan luottaa lyhytaikaisen säätövoiman tuotantoon. Niin kutsuttu Power-to-hydrogen-ratkaisu, jossa vedyllä tuotetaan sähköä, mahdollistaa pidempikestoisen

varastoinnin. Tämä johtuu siitä, että vetyä pystytään varastoimaan huomattavasti pidempään kuin akkuihin pystytään varastoimaan energiaa ilman merkittäviä häviöitä. Akut soveltuvat tyypillisesti energian varaamiseen 2–6 tunnin ajaksi (Bhattacharyya ja muut, 2024).

Energiankantajien lisäksi sähköverkon tasapainottamista voidaan tehdä kysyntäjoustolla. Älykkäillä teknologioilla, kuten automaattisilla ohjausjärjestelmillä voidaan säätää sähkönkulutusta vastaamaan vaihtelevaa sähköntuotantoa. Kysyntäjousto perustuu kuluttajan näkökulmasta sähkönhinnan vaihteluihin. Sähkön tuotannon ollessa korkealla sähkön hinta on alhainen, jolloin kuluttajan on kannattavaa käyttää enemmän sähköä ja mahdollisesti varastoida sitä esimerkiksi akkujärjestelmiin. Sähkön hinnan ollessa korkealla kuluttaja on motivoitunut käyttämään vähemmän sähkölaitteita. Nykyaikaisten älykkäiden sähkölaitteiden ja ohjausjärjestelmien avulla tämä sähkönkulutuksen optimointi pystytään automatisoimaan. Näin ollen sähköverkon tasapainottamiseksi ei aina tarvita säätövoimaa, vaan tasapainottamista pystytään tekemään myös loppukäytön puolella (energiateollisuus, n.d).

4 Muut käyttökohteet vedylle

Vetyä voidaan käyttää sähköntuotannon lisäksi myös liikenteessä sekä teollisuudessa. Vetyä on perinteisesti pidetty erityisesti hyvänä polttoaineena liikenteessä. Tässä osiossa käydään läpi sitä, missä käyttötarkoituksissa vetyä käytetään ja missä sitä voitaisiin hyödyntää enemmän.

4.1 Vedyn käyttö liikenteessä

Vedyssä on merkittävää potentiaalia käytettäväksi liikenteen polttoaineena (Nieminen, 2024, s. 10). Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan polttoaineena vetymootoreissa ja polttokennoissa sekä jalostettuna niin kutsutuiksi sähköpolttoaineiksi. Näitä ovat muun muassa ammoniakki, metanoli, metaani, kerosiini, diesel ja bensiini. Lentoliikenteessä käytetään tulevaisuudessa todennäköisesti kerosiinia, kun taas meriliikenteessä käytetään ammoniakkia ja metanolia. Raskaassa tieliikenteessä tullaan todennäköisesti käyttämään suoraan vetyä (Sivill ja muut, 2022, s. 183).

Liikenteen sähköistämisellä on ongelmana se, että erityisesti pidemmillä matkoilla tarvittavien akkujen tarvitseva tila ja niiden tuoma lisäpaino haittaavat merkittävästi ajoneuvon hyötysuhdetta. Vetypolttainetta käyttävillä ajoneuvoilla tätä ongelmaa ei olisi (Nieminen, 2024, s. 10).

Suomi on sitoutunut vähentämään liikenteen päästöjä vähintään 50 % vuoteen 2030 mennessä. Liikenteen tulisi olla hiilidioksidivapaa vuoteen 2045 mennessä. Olennaista liikenteen siirtymisessä hiilidioksidivapaaksi on jakeluvaihtoehdot, joiden avulla ohjataan käytettyjä polttoaineita uusiutuvaan suuntaan (Sivill ja muut, 2022, s. 184).

Vetyautojen yleistymisen ongelmana on se, että niitä ei valmisteta suuressa mittakaavassa ennen kuin asiakkailta on riittävästi tankkausmahdollisuuksia. Vetyautoja taas tulee olla riittävästi, jotta tankkausasemia olisi kannattavaa rakentaa.

Tankkausasemia on ollut pitkään suunnitteilla, ja niistä on ollut kiinnostuneita erityisesti raskaan kaluston toimijat (Nieminen, 2024, s. 10).

4.2 Vedyn käyttö teollisuudessa

Terästeollisuudessa voidaan hyödyntää vetyä huomattavasti matkalla fossiilivapaan teräksen tuotantoon. Suomessa on terästeollisuuden kannalta kaksi keskeistä toimipaikkaa. SSAB Raahe valmistaa raakarautaa, jota jalostetaan teräkseksi. Outokumpu Tornio valmistaa ruostumatonta terästä kierrätysteräksestä sekä ferrokromista. SSAB on ilmoittanut tavoitteekseen siirtyä fossiilivapaaseen teräksen tuotantoon vuoteen 2030 mennessä. Outokumpu on asettanut tavoitteekseen mm. korvata fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla. Terästeollisuudessa olisi mahdollisuuksia hyödyntää vetyä, jos se nähdään kilpailukykyiseksi. Tällä hetkellä sitä ei ole kuitenkaan ollut kovin paljon suunnitelmissa (Sivill ja muut, 2022, s. 185–186).

Kemianteollisuudessa käytetään tänä päivänä paljon fossiiliperäistä vetyä. Uusiutuvan tai vähähiilisen vedyn käytön lisääminen tuotannossa olisi hyödyllistä kestävämmän teollisuuden aikaansaamiseksi. Suomessa Nesteen Porvoon jalostamo käyttää eniten vetyä kemianteollisuudessa. Neste on saanut EU-rahoitusta vihreän vedyn käytön lisäämiseksi, mutta vuonna 2022 yhtiö ei ollut asettanut tavoitetta hiilineutraalisuuden tavoittamiseksi tuotannossaan (Sivill ja muut, 2022, s. 186).

5 Johtopäätökset

Vety on ominaisuuksiltaan toimiva polttoaine korvaamaan fossiilisia polttoaineita monissa eri käyttötarkoituksissa. Vedyn energiasisältö on painoonsa nähden suuri, joten sitä voidaan käyttää tehokkaasti polttomoottoreissa ja kaasuturbiineissa. Kaasuturbiinit ovat yksi parhaista vaihtoehdoista, mitä voidaan hyödyntää vedyn käytössä säätövoiman tuotannossa.

Vetyä voidaan valmistaa elektrolyysillä vedestä, jota löytyy maapallolta erittäin runsaasti. Tämän vuoksi vedyn tuotannon määrää voidaan kasvattaa aina tarpeen mukaan. Elektrolyysi on toiminnaltaan yksinkertainen, ja siihen on kehitetty toimivia menetelmiä kuten AEL, PEM ja SOEL. SOEL on vielä kehitysvaiheessa, ja siinä on tulevaisuutta ajatellen potentiaalia vihreän vedyn tuottamiseksi sen korkean hyötysuhteen vuoksi. SOEL-tekniikan kaupallistumisen jälkeen vedyn tuottaminen olisi kannattavampaa, jolloin kiinnostus sen hyödyntämisestä säätövoiman tuotannossa kasvaisi huomattavasti. Vetyä tuottaessa elektrolyysillä voidaan myös osaltaan tasapainottaa sähköverkkoa, sillä tietyllä ajanhetkellä olevaa ylimääräistä sähköä voidaan ohjata sen tuotantoon. Elektrolyysin lisäksi vetyä voitaisiin valmistaa hyödyntämällä biokaasuprosessia, joka olisi hyvä tapa hyödyntää kiertotaloutta.

Vedyn varastoinnissa on omat haasteensa, jotka tulee ottaa huomioon suunnitellessa vetytaloutta. Vety tulee varastoida hyvin korkeassa paineessa sen pienen molekulaarisen painon takia. Vety läpäisee herkästi materiaaleja, jonka vuoksi syntyy häviöitä. Tämän takia vedyn pitkäaikainen varastointi on hankalaa, mutta ei mahdotonta. Sama ongelma tulee vastaan myös vedyn siirtämisessä esimerkiksi putkistoissa. Vedyn tuotanto ja loppukäyttö on siksi järkevintä tehdä lähellä toisiaan. Säätövoiman tuotanto vedyllä on yksi hyödyllisistä tavoista sijoittaa tuotanto, varastointi ja loppukäyttö samaan paikkaan. Silloin vetyä ei tarvitsisi siirtää pitkiä matkoja.

Vedyllä on paljon mahdollisuuksia sähköntuotannossa, ja sitä voitaisiin käyttää sähköjärjestelmän tasapainottamisessa. Säätövoima on perinteisesti nojannut

vesivoimaan, jota on hyvin rajallisesti saatavilla. Säättövoiman tarpeen voidaan odottaa lisääntyvän huomattavasti yhteiskunnan sähköistymisen ja tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon epäjohdonmukaisuuksien vuoksi. Tämän tutkimuksen perusteella vetytalouden mukaan tuominen säättövoiman tuotantoon olisi hyvä ratkaisu sähköjärjestelmän luotettavuuden ja monipuolisuuden varmistamiseksi myös tulevaisuudessa. Suurin osa Suomessa käytettävästä säättövoimasta ostetaan Pohjoismaista, jossa on paljon hyvin saatavilla olevaa vesivoimantuotantoa. Tästä päätellen uusia ratkaisuja säättövoiman tuotantoon Suomessa voisi nähdä hyödyllisenä, jotta sähköä ei tarvitsisi ostaa ulkomailta.

Säättövoimaa voisi tuottaa myös varaamalla energiaa akkujärjestelmiin, joihin varastoitaisiin sähköverkossa saatavilla olevaa ylijäämä sähköä. Niistä pystytään purkamaan sähköverkkoon nopeasti paljon energiaa, mutta ne soveltuvat vain lyhytaikaiseen sähköverkon tasapainottamiseen. Tämän vuoksi energian varastoiminen vetypolttoaineeseen mahdollistaisi huomattavasti pidempiaikaisen säättövoiman tuottamisen esimerkiksi isomman voimalaitoksen jäädessä ulos sähköverkosta.

Tutkimuksen perusteella vedyn käyttöä säättövoiman tuotannossa voidaan pitää tarpeellisena, sillä yhteiskunnan sähköistyessä, ja monien lämpövoimaan perustuvien sähköntuotantotapojen poistuessa käytöstä, säättötarpeen odotetaan lisääntyvän. Samaan aikaan sään mukaan vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian osuus kasvaa sähköntuotannossa, mikä lisää sähkönjakelun epävarmuutta. Lisäksi Suomessa on vesivoimalla tuotettua säättövoimaa rajatusti maanpinnan vähäisten korkeuserojen vuoksi. Vesivoimaa ei ole tarpeeksi käytettävissä vastatakseen säättövoiman kasvavaa kysyntää yhteiskunnan sähköistyessä.

6 Yhteenveto

Energiasektorin saamiseksi hiilidioksidipäästöttömäksi tarvitaan uudenlaisia ratkaisuja nykyisten fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi. Vetytaloudella olisi paljon potentiaalia täyttämään Suomen ja Euroopan unionin asettamat päästötavoitteet. Elektrolyysillä valmistetulla vihreällä vedyllä on ominaisuuksiltaan hyvät lähtökohdat niin sähköverkon tasapainottamisessa, liikenteessä kuin teollisuudessa.

Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida sitä, olisiko vedyllä mahdollista tuottaa säätövoimaa sähköverkon tasapainottamiseksi sähkön tuotannon ja kysynnän vaihdellessa nopeasti sähköistyvässä yhteiskunnassa. Tutkimuksen toteuttamiseksi hyödynnettiin saatavilla olevia aiempia tutkimuksia ja raportteja. Näistä tehtiin johtopäätöksiä vetytalouden mahdollisuuksista.

Tutkimuksen pohjalta voidaan päätellä, että elektrolyysiteknologian kehittyessä, ja esimerkiksi biokaasuprosessia hyödyntämällä, vetyä voitaisiin tuottaa kannattavammin kuin tänä päivänä. Vedyn tuotannon kannattavuuden lisääntyessä sitä voitaisiin hyödyntää säätövoiman tuotannossa, koska uusien energiaratkaisujen yleistymisen esteenä on usein niiden kalleus. Lisäksi vetytalouden laajuuden vuoksi vetyä voidaan käyttää monessa muussakin käyttötarkoituksessa, niin kuin raskaassa liikenteessä sekä teollisuudessa, koska vedyntuotannon ollessa suurta, voidaan sen hinnan olettaa laskevan huomattavasti alhaisemmaksi lisäten sen kilpailukykyä suhteessa muihin polttoaineisiin.

Vedyn käytöstä säätövoiman tuotannossa on melko vähän tutkimustietoa. Tämän vuoksi tarkkoja kannattavuuslaskelmia on vaikea tehdä. Vedyntuotantoteknologioiden kehittyessä sen voidaan kuitenkin olettaa olevan toimiva ratkaisu muiden joukossa sähköverkon tasapainottamiseksi.

Lähteet

- Alhuyi Nazari, M., Fahim Alavi, M., Salem, M. & El Haj Assad, M. (2022). Utilization of hydrogen in gas turbines: a comprehensive review. *International Journal of Low-Carbon technologies*. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac025>
- Bhattacharyya, R., Singh, K. K., Bhanja, K., Grover, R. B. (2024). Using electrolytic hydrogen production and energy storage for balancing a low carbon electricity grid: Scenario assessments for India. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100131>
- Energiatallisuus. Sähköntuotanto. (n.d). Noudettu 4.4.2026 osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/>
- Fingrid & Gasgrid Finland. (2023). Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina. Noudettu 10.5.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2023/sahkon--ja-vedynsiirron-kehitys-luo-perustan-tulevaisuuden-puhtaalle-energiajarjestelmalle-ja-vetytalouden-kasvulle/>
- Godula-Jopek, A. & Stolten, D. (2015). Hydrogen production: by electrolysis. Noudettu 20.4.2026 osoitteesta <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527676507>
- Grasman, S. (2013). Hydrogen energy and vehicle systems.
- Huttunen, R., Kuuva, P., Kinnunen, M., Lemström, B. & Hirvonen, P. (2022). Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. *Työ- ja elinkeinoministeriö*. <http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>
- Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J. & Jäger-Waldau, A. (2020). Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *European Commission*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
- Nieminen, I. (2024). Vetytalous ja tuotannon sivuvirtojen hyödyntäminen Kaakkois-Suomessa. *LAB-ammattikorkeakoulu*. <http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-951-827-484-4>

Patronen, J. & Sivill, L. (2022). Valtion rooli vetytaloudessa: Loppuraportti. *Työ- ja elinkeinoministeriö & Afry Management Consulting Oy.*

<http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-756-4>

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://www.urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2>

Spoof-Tuomi, K. (2024). Vihreän vedyn tuotanto – Raaka-aineet ja tuotantomenetelmät. ”Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa” -hanke Osaraportti T1.1a. *Vaasan yliopisto.*

<https://www.uwasa.fi/fi/tutkimus/hankkeet/vep-vetytalouden-mahdollisuudet-ruokaketjussa>

Tähti, H. & Rintala, J. (2010). Biometaanin ja -vedyn tuotantopotentiali Suomessa. *Jyväskylän yliopisto.* <http://www.urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-4043-0>