



# Vedyn tuotanto ja käyttö teollisuudessa

Lauri Kirjavainen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2023

Energia- ja ympäristötekniikka (AMK)

Kirjavainen, L

### Vedyn tuotanto ja käyttö teollisuudessa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Toukokuu 2023**, 45 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### Tiivistelmä

Opinnäytetyö toteutettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun toimeksiantona. Toimeksiantaja teetti vedystä opinnäytetyön 2021 talvella ja tämän työn tarkoituksena oli toimia jatko-osana tuolle työlle. Ilmastonmuutoksen hillitseminen hiilidioksidi päästöjä leikkaamalla on ajankohtainen aihe ja sen saavuttamiseen tarvitaan uusia keinoja. Vetytekniikan avulla hiilidioksidi päästöjä voidaan vähentää suuria määriä. Tavoitteena oli tutkia vedyn valmistusmenetelmiä ja saada lopputulos siitä, mikä menetelmästä on paras tulevaisuuden vetyhankkeille, saada tietoa mihin vetyä voidaan käyttää, jotta se palvelee tulevaisuuden hiilidioksidi neutraalisuus tavoitetta sekä tarkastella, missä vedyn tuotanto maantieteellisesti on parasta toteuttaa.

Opinnäytetyö oli kirjallisuuskatsaus vedyn valmistuksesta ja käyttökohteista teollisessa mittakaavassa. Tietoa kerättiin aihetta käsittelevistä artikkeleista ja uutisista. Vetyteknologia ja sen käyttökohteet ovat uusi aihe, jonka vuoksi tiedon keruu keskittyi juuri yllämainittuihin lähteisiin. Kirjallisuutta hyödynnettiin prosessien kuvauksessa. Lähteiden luotettavuutta tarkasteltiin monelta kantilta ja lähteiden taustoihin perehdyttiin.

Tuloksena saatiin tutkimus, joka käsittelee vetyä aina alkuaineesta loppukäyttöpaikkoihin asti. Vedyn valmistukseen täytyy käyttää vihreää sähköä, joka tulee olemaan aurinko- tai tuulivoimalla tuotettua. Vedyn valmistus tullaan toteuttamaan käyttämällä elektrolyysiprosessia. Elektrolyysiprosessissa syntyvä hukkalämpö täytyy hyödyntää, jotta prosessin hyötysuhdetta saadaan nostettua. Hukkalämpö tullaan hyödyntämään kaukolämpöverkkoon. Vedyn suurimmiksi käyttökohteiksi osoittautuvat kemianteollisuus, jossa vedystä jalostetaan polttoaineita ja vihreän teräksen tuotanto. Vetyä voidaan myös käyttää energiavarastona sähköjärjestelmän tasapainotusta varten.

Vety hankkeissa täytyy vedyn elinkaaren tarkastelussa olla huolellinen sen vaikean varastoinnin ja kuljettamisen takia. Vedyn tuotantolaitokset täytyy sijoittaa siten, että alueella on saatavilla riittävästi vihreää sähköä elektrolyysiprosessia varten. Elektrolyysissä syntyvälle hukkalämmölle täytyy olla käyttökohde. Vedyntuotanto tulee sijoittaa sen loppukäytön osalta järkevästi joko niin, että vety saadaan suoraan käyttöön laitokselta tai se voidaan varastoida vetyverkostoon.

### Avainsanat (asiasanat)

Vety, elektrolyysi, hukkalämpö, hiilidioksidi, hyötysuhde

### Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Kirjavainen, L

### **Hydrogen production and use in industry**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 45 pages.

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The thesis was carried out as a commission from Jyväskylä University of Applied Sciences. The client commissioned a thesis on hydrogen in the winter of 2021, and the purpose of this work was to serve as a continuation of that work. Curbing climate change by cutting carbon dioxide emissions is a topical issue and new means are needed to achieve it. With the help of hydrogen technology, carbon dioxide emissions can be reduced in large quantities. The goal was to study hydrogen production methods and get the final result of which of the methods is the best for future hydrogen projects. Get information on what hydrogen can be used for, so that it serves the goal of carbon dioxide neutrality in the future. To examine where hydrogen production is best geographically.

The thesis was a literature review of hydrogen production and applications on an industrial scale. Information was collected from articles and news about the topic. Hydrogen technology and its applications are a new topic, so the collection of information was focused on the sources mentioned above. Literature was used to describe the processes. The reliability of the sources was looked at from many angles, and the background of the sources was studied.

The result was a study that processes hydrogen from the element to the end-use locations. For the production of hydrogen, green electricity must be used, which will be produced by solar or wind power. The production of hydrogen will be carried out using the electrolysis process. The waste heat generated in the electrolysis process must be utilized in order to increase the efficiency of the process. The waste heat will be utilized in the district heating network. The biggest uses of hydrogen turn out to be the chemical industry, where hydrogen is refined into fuels and the production of green steel. Hydrogen can also be used as an energy storage for balancing the electrical system.

In hydrogen projects, care must be taken when examining the life cycle of hydrogen because of its difficult storage and transportation. Hydrogen production facilities must be located in such a way that sufficient green electricity is available in the area for the electrolysis process. The waste heat generated in electrolysis must have a use. Hydrogen production should be invested sensibly in terms of its end use. Either so that the hydrogen can be used directly from the plant, or it can be stored in a hydrogen network.

### **Keywords/tags (subjects)**

Hydrogen, electrolysis, waste heat, carbon dioxide, efficiency

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Mitä vihreä vety on? .....</b>	<b>8</b>
2.1	Vety .....	9
2.1.1	Vedyn luokittelu käytetyn valmistus menetelmän mukaan .....	10
2.2	Vihreän sähkön lähteet .....	10
2.2.1	Tuulivoima .....	11
2.2.2	Aurinkoenergia .....	13
2.2.3	Biovoima .....	14
2.2.4	Vesivoima.....	15
<b>3</b>	<b>Vedyn valmistaminen, käyttökohteet, sijainti .....</b>	<b>16</b>
3.1	Vedyn valmistus .....	16
3.2	Käyttökohteet.....	21
3.2.1	Ammoniakin valmistus.....	23
3.2.2	Liikenne.....	25
3.2.3	Synteettinen metaani ja metanoli .....	26
3.2.4	Terästeollisuus .....	27
3.2.5	Muita käyttö kohteita .....	30
3.3	Sijainti.....	31
3.4	Esimerkkejä Suomen vety hankkeista .....	34
<b>4</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätöset tuloksista .....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>37</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>39</b>

## Kuviot

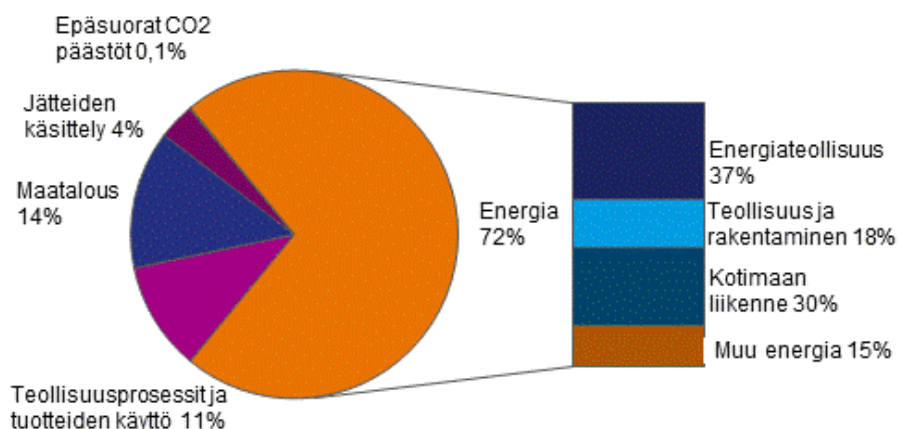
Kuvio 1. Suomen hiilidioksidipäästöt sektoreittain (Suomen virallinen tilasto 2021.).....	6
Kuvio 2. Vihreän sähkön tuotanto Suomessa Vuonna 2021. (Tilastokeskuksen maksuttomat tilastotietokannat 2021.) .....	11
Kuvio 3. Tuulivoima Suomessa (Tuulivoima Suomessa n.d.) .....	12
Kuvio 4. Vesivoimalan toimintaperiaate. (Vesivoima n.d.).....	15
Kuvio 5. alkalielektrolyysilaitteisto. (Elektrolyysi n.d, muokattu).....	18
Kuvio 6. Kaukolämpöverkon lämpötila ulkolämpötilan mukaan. (Kaukolämpölaitteet n.d.) ....	20
Kuvio 7. Vedyn kokonais käyttö Euroopassa vuonna 2015. (Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J., Hurskainen, J 2020.).....	22
Kuvio 8. Haber-Boschin menetelmä (Cheema, I 2019, muokattu) .....	24
Kuvio 9. Masuunin rakenne. (Clark, J 2015.).....	28
Kuvio 10. Nordic hydrogen route (Media. n.d.) .....	32
Kuvio 11. Suomen kaasun siirtoverkosto (Kaasun siirtoverkosto n.d.) .....	33

# 1 Johdanto

Ilmastonmuutos näkyy maailmalla monin eri tavoin. Ilmastonmuutoksen seurauksia, joita on havaittu ovat merenpintojen nousu, merien happamuuden nousu sekä luonnon monimuotoisuuden heikentyminen. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat vaikuttaneet Eurooppaan siten, että ääriolosuhteita esiintyy entistä useammin. Ääriolosuhteita ovat esimerkiksi helleaallot ja tulvat. (Mitä hiilineutraalisuus tarkoittaa? 2022.)

Ilmaston lämpeneminen johtuu syntyvistä hiilidioksidipäästöistä. Hiilidioksidipäästöjä rajoittamalla ilmaston lämpiäminen rajoitetaan 1,5 asteeseen. Euroopan tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Monet maat ovat asettaneet omia tavoitteita hiilineutraalisuuden suhteen. Suomen tavoite hiilineutraalisuuteen on vuosi 2035. Hiilineutraalisuus tarkoittaa sitä, että kaikki tuotettu hiilidioksidi saadaan sidottua hiilinieluihin. Suurimpia hiilinieluja Suomessa ovat metsät. Kaikki hiilidioksidi mitä ei saada hiilinieluihin täytyy jättää tuottamatta tai tehdä jollain toisella menetelmällä, joka mahdollistaa prosessin hiilineutraalisuuden.

Suomen hiilidioksidipäästöt sektoreittain on kuvattu kuviossa 1 vuodelta 2021. Energia sektorin jakauma on eriteltynä kuvion oikeaan reunaan. Kuviosta nähdään, että suurin osa hiilidioksidipäästöistä Suomessa syntyy teollisuudesta, liikenteestä ja energiateollisuudesta.



Kuvio 1. Suomen hiilidioksidipäästöt sektoreittain (Suomen virallinen tilasto 2021.)

Vedyn oletetaan olevan suuressa asemassa hiilidioksidipäästöjen leikkaamiseen. Vetyä voidaan valmistaa täysin hiilineutraalisti eikä se saastuta ilmastoa. Vedyllä on monia ominaisuuksia, joilla nykyisiä hiilidioksidia tuottavia prosesseja voidaan muuntaa täysin hiilineutraaleiksi tai vähentää hiilidioksidi päästöjä merkittävästi. Vetyä voidaan myös käyttää suoraan polttoaineena energiantuotannossa, mutta sen ominaisuudet ja tuotantotekniikka tekevät siitä ennemmin hyvän energia-varaston tai prosessiin korvaavan aineen.

Suomen suurimmat hiilidioksidipäästöjen tuottajat ovat SSAB ja Neste. Heidän hiilidioksidi päästönsä ovat yli 10 % Suomen hiilidioksidi päästöistä. Nämäkin prosessit voidaan muuttaa vedyn avulla käytännössä kokonaan hiilineutraaleiksi ja tuolloin olisi merkittävä tekijä, jotta Suomen tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä toteutuisi. (Kostiainen, J 2022.) Vetyä tuotetaan tällä hetkellä pääosin fossiilisista polttoaineista, mutta vetyä on myös mahdollista tuottaa täysin hiilineutraalisti elektrolyysiprosessin avulla.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella prosesseja, joihin vihreää vetyä voidaan käyttää sekä miten sitä tuotetaan ja missä tuotantoa kannattaa toteuttaa. Työssä käytiin läpi koko tuotantoketju aina vety atomista loppukäyttöpaikkaan asti sekä sitä, mitä se vaatii ollakseen kannattavalla esitettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi. Työn tarkoituksena oli tutkia vihreää vetyä, koska se mahdollistaa monen sektorin hiilidioksidi päästöjen vähentämisen ja hiilineutraalin vedyn käytön. Vety teknologialla on kuitenkin omat haasteensa ja niihin paneudutaan työn eri osissa vaiheittain.

Vedyn potentiaalista tulevaisuuden energialähteenä on ollut paljon puhetta, mutta käytännön teot ovat edelleen vähäisiä. Tästä syystä vedystä on teetetty paljon opinnäytetöitä viime vuosina. Tämän työn toimeksiantaja JAMK teetti aiheesta talvella 2021 opinnäytetyön. Työn toteutti Simo Matikainen. Matikainen (2021) tarkasteli työssään tarkasti vedyn valmistus prosesseja ja tämä työ toteutettiin Matikaisen työn jälkeen. Tämän vuoksi tässä työssä ei tarkasteltu vedyn valmistusproesseja yhtä syvällisellä tasolla vaan käytiin läpi vedyn yleisimmät ja potentiaalisimmat valmistusmenetelmät. Tässä työssä keskityttiin vedyn käyttöpaikkoihin ja maantieteelliseen sijaintiin.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan, millaista tietoa aiheesta on saatavilla ja haetaan vastauksia tutkimuskysymyksiin (Kunnela, A 2022). Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli tuottaa toimeksiantajalle tietoa vedyn käyttökohteista ja saada vastaus seuraaviin kysymyksiin: Miten, milloin ja missä vedyn tuotanto on kannattavinta? Mitkä teollisuuden prosessit voivat hyödyntää vetyä sen prosesseissa? Mikä tekee vedystä tulevaisuuden raaka-aineen? Tutkimus keskittyi Suomeen, mutta työn tulokset pätevät myös muualla maailmassa, jos infrastruktuuri on vastaava kuin Suomessa. Tiedonhaku keskittyi verkkoon julkaistuihin artikkeleihin ja tiedotteisiin pääosin, koska aihe on erittäin tuore eikä siitä ole vielä saatavilla paljon kirjallisuutta. Työssä hyödynnettiin kuitenkin kirjallisuutta ja muita tiedonlähteitä, kuten tutkimuksia. Työssä noudatettiin hyvän tieteellisen käytännön perusperiaatteita, jotka ovat luotettavuus, rehellisyys, arvotus ja vastuunkanto (Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa 2023, 11–12). Lähteiden luotettavuutta tarkasteltiin kirjoittajan asiantuntemuksen osalta ja pyrittiin käyttämään mahdollisimman tuoreita lähteitä. Työssä käytettiin alkuperäisiä lähteitä ja tiedonhankinnassa keskityttiin pitämään työ puolueettomana. Työ ei sisältänyt salassa pidettävää tai luottamuksellista aineistoa.

Työ on toimeksiantajalle hyödyllinen vedyn tulevaisuuden merkityksen näkökulmasta. Toimeksiantajan tehtävänä on tuottaa insinöörejä, jotka ovat osana rakentamassa yhteiskunnan tulevaisuutta ja ratkaisemassa työssä esiintyviä haasteita vedyn tuotannon osalta. Toimeksiantajalla on tarve saada lisää tietoa ja oppimateriaalia aiheesta. Tämän työn tarkoituksena on tuottaa toimeksiantajalle opetusmateriaali aiheesta, joka auttaa heitä parantamaan opetuksen laajuutta ja antaa heille tietoa mahdollisiin tulevaisuuden hankkeisiin liittyen vedyn käyttö/tuotanto ratkaisuihin.

## 2 Mitä vihreä vety on?

Tässä luvussa käydään läpi mitä vety itsessään on ja millaisia ominaisuuksia sillä on. Seuraavaksi tarkastellaan minkälaisia haasteita vety voi aiheuttaa alkuaineena sen rakenteen vuoksi, jonka jälkeen tutkitaan millä tavoin vedyn valmistustapa ja siihen käytetty sähkö vaikuttaa sen käyttötarkeitukseen tulevaisuuden osalta sekä käydään läpi sähköön tuotanto muodot ja miksi juuri nämä tekniikat ovat tarkastelun kohteena.



## 2.1 Vety

Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen ja samalla yksinkertaisin alkuaine. Vety atomi on yksinkertaisen alkuaine. Vety atomin rakenteeseen kuuluu ydin, jossa yksi positiivinen protoni ja tätä kiertää yksinegatiivisesti varautunut elektroni. Vety esiintyy maapallolla normaaleissa olosuhteissa kaasuna, joka on väritön, hajuton ja mauton. Vedyllä on todella alhaiset sulamis- ja kiehumispisteet. Sulamispiste (-259,2 °C) ja kiehumispiste (-252,8 °C). (Hydrogen – H n.d.)

Vety on herkästi syttyvä ja sillä on voimakas palamisreaktio. Vedyn palamiseen vaadittu aktivointienergia on pieni verrattuna esimerkiksi bensiiniin. Bensiinin aktivointienergia on 0,2 MJ ja vedyn 0,02 MJ. Vedyn palamisreaktioissa syntyy loppu tuotteena vettä. Vedyn polttaminen ei luo hiilidioksidipäästöjä, siksi vedyn käytöstä polttoaineena on suurta kiinnostusta. (Pöntinen, P 2022.)

Vedyn palamisreaktio on seuraava.  $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ . Vedyllä on myös korkea lämpöarvo (119 MJ/kg) verrattuna muihin yleisiin polttoaineisiin, kuten bensiiniin (43 MJ/kg), puupolttoaineet (18–20 MJ/kg), kivihiili (28 MJ/kg), palaturve (21,3 MJ/kg) ja maakaasuun (38-50 MJ/m<sup>3</sup>). (Biopolttoaineiden lämpöarvoja 2021.)

Vety on kevyt, eikä se paina paljoa, mutta se vie paljon tilaa, joka aiheuttaa hankaluuksia logistiikan osilta. Yksi kilo vetyä vie jopa 11 kuutiometriä tilaa. Säiliö auton säiliö tilavuus on keskimäärin noin 20000–30000 litraa eli noin 20–30 m<sup>3</sup>. Vetyä ei siis mahtuisi yhteen säiliö autoon kuin noin 2 kiloa. Vetyä saadaan kuitenkin viemään vähemmän tilaa joko nostamalla sen painetta tai nesteyttämällä. Tämä vaatii kuitenkin säiliöautolta tiettyjä ominaisuuksia. Aiemmin mainittuna vedyn sulamispiste on todella matala eli nesteytetty vety vaatii tuon lämpötilan pysyäkseen nesteenä. (Pöntinen, P 2022.)

Vetyä ei esiinny maapallolla energiantuotannon käyttöön soveltuvana vaan se täytyy valmistaa aina erikseen, koska se on sitoutuneena muihin aineisiin. Vetyä esiintyy maapallolla muihin aineisiin sitoutuneena – sitä löytyy esimerkiksi vedestä. (Vety 2020.)

### 2.1.1 Vedyn luokittelu käytetyn valmistus menetelmän mukaan

Vedyn tuotanto vaatii paljon sähköenergiaa, jos valmistus tekniikkana on elektrolyysi. Kuten aiemmin mainittiin, tässä työssä keskitytään elektrolyysillä tuotettuun vetyyn. Elektrolyysissä käytetyn sähköenergian alkuperäisellä valmistus menetelmällä on suuri merkitys. Sähkön valmistus menetelmä määrittelee vedyn nimityksen seuraavasti.

- Vihreä vety (tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä.)
- Päästötön vety (tuotettu uusiutuvilla tai ydinvoimalla)
- Sininen vety (Fossiilisilla polttoaineilla tuotettu, mutta osana CO<sub>2</sub>-päästöjen talteenotto)
- Turkoosi vety (Pyrolyysillä tuotettu)
- Harmaa vety (Fossiilisilla energianlähteillä)

Käytetyllä sähköenergialla on suuri merkitys vedyn käytön kannalta eli ei ole ihanteellista puhua vedystä tulevaisuuden polttoaineena, jos se on tuotettu kuitenkin fossiilisilla polttoaineilla. (Vartiainen, E 2020.)

## 2.2 Vihreän sähkön lähteet

Uusiutuva energia on uusiutuvilla raaka-aineilla valmistettua energiaa eli energialähde uusiutuu samassa suhteessa kuin sitä käytetään. Uusiutuvat energianlähteet ovat tulevaisuuden kannalta välttämättömiä, jotta tullaan pääsemään asetettuihin hiilidioksidipäästö tavoitteisiin. Uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla tuotettu sähkö on niin sanottua vihreää sähköä. Uusiutuvia energian lähteitä ovat esimerkiksi tuulivoima, aurinkoenergia, vesivoima ja bioenergia. (Soininen, P 2020.)

## Sähkön tuotanto ja kokonaiskulutus muuttujina Tiedot, Sähkön tuotanto ja kulutus, GWh ja Vuosi

	2021
Määrä, GWh	
Vesivoima (Uusiutuva energialähde)	15 624
Tuulivoima (Uusiutuva energialähde)	8 180
Aurinkovoima (Uusiutuva energialähde)	298
Mustalipeä (Uusiutuva energialähde)	6 298
Muut puupolttoaineet (Uusiutuva energialähde)	5 841
Muut uusiutuvat (Uusiutuva energialähde)	671
UUSIUTUVAT ENERGIALÄHTEET YHTEENSÄ	36 910
SÄHKÖN TUOTANTO YHTEENSÄ	69 324

Kuvio 2. Vihreän sähkön tuotanto Suomessa Vuonna 2021. (Tilastokeskuksen maksuttomat tilastotietokannat 2021.)

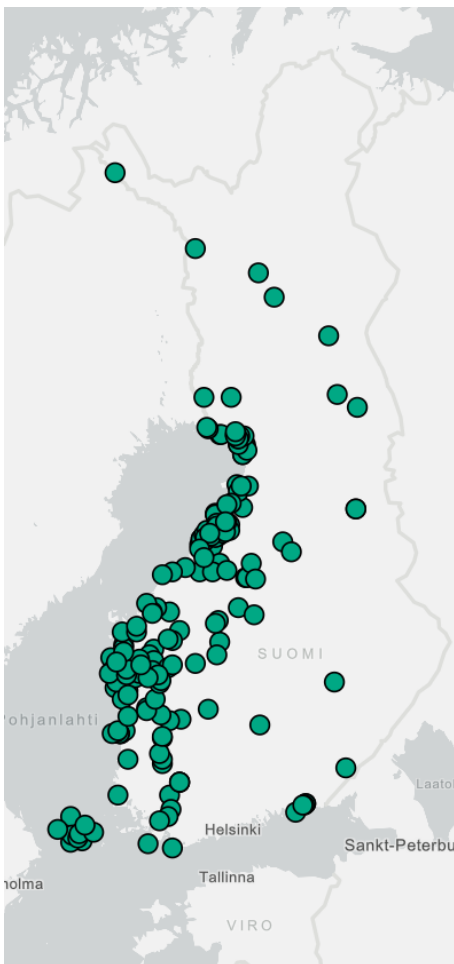
Kuviosta 2 laskemalla selviää, että uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön osuus oli vuonna 2021 Suomessa 53,2 %. Uusiutuvien energianlähteiden osuus tulee tulevaisuudessa vain nousemaan. Uusiutuvien energiantuotantomuotojen osalta tuuli ja aurinko voima tulevat olemaan todennäköisesti suurimassa nousussa. Vesivoiman potentiaali on Suomessa melkein täysin hyödynnetty ja biopolttoaineiden polttoa rajoitetaan jatkuvasti, koska niistä syntyy hiilidioksidipäästöjä. Biopolttoaineita pidetään kuitenkin uusiutuvana, koska ne ovat lähtöisin luonnosta ja niiden hiilidioksidipäästöt sitoutuvat takaisin hiilinieluihin. Aurinko- ja tuulivoiman tuotannon lisääntyminen avaa vedyn valmistukselle ovia energiavarastona.

### 2.2.1 Tuulivoima

Tuulivoimassa tuulen liike-energialla pystytään tuottamaan uusiutuvaa energiaa tuulivoimaloissa muuttamalla tuulen liike-energiaa sähköksi. Tuulen liike-energia muutetaan sähköksi generaattorin avulla. Tuulen liike-energia aikaansaa roottorin pyörinnän. Roottori on kiinnitetty akseliin, jonka kautta tuulen liike-energia kulkeutuu vaiheelle. Vaihteessa energia siirtyy toiseen akseliin, joka pyörittää generaattoria. Generaattori muuntaa energia sähköksi.

Tuuli muodostuu auringosta tulevasta energiasta. Auringon lämpöenergia muuttuu liike-energiaksi eli tuuleksi. Tuuli muodostuu maapallon lämpötilaerojen tasauksen yhteydessä. Paikalliseen tuuleen vaikuttaa kuitenkin monet eri tekijät, joita ovat esimerkiksi matala ja korkeapaineet, maastonmuodot ja korkeuserot. (Tuulivoimateknologia 2023.)

Tuulivoimalan perusrakenteeseen kuuluu roottori, konehuone, runko ja perusta. Tuulivoimalan roottoriin kuuluu napa ja lavat. Roottorin koko vaihtelee paljon laitoksen koon mukaan. Suurimmat roottorin halkaisijat voivat olla yli 150 metriä. Roottorin koko määrää suoraan tuulivoimalan sähköntuotannon. Konehuoneesta löytyy generaattori, vaihdelaatikko ja jäähdytyslaitteistot. Tuulivoimalan runko voi olla korkeudeltaan nykypäivänä jo noin 180 metriä. (Tuulivoimatekniikka n.d.)



Kuvio 3. Tuulivoima Suomessa (Tuulivoima Suomessa n.d.)

Kuviosta 3 nähdään, että suurin osa Suomessa toimivasta tuulivoimasta sijaitsee rannikko alueella. Tähän syynä on, että rannikkoalueella tuulen määrä on suurinta eikä tuulella ole niin paljon esteitä, kuten metsää, jota maan keskiosissa on paljon. Tuulen määrä on voimalan kannalta oleellinen muuttuja, joka määrää suoraan sähkön tuotanto kapasiteettia. Tuulivoimaa tuotetaan silloin kun tuulee eikä sillä ole käytännössä tuotanto kustannuksia. Niinpä tuulivoimaa tuotetaan, oli sähkön kulutus sitten suurta tai matalaa. Vedyn tuotanto voisi tasapainottaa tuotantoa.

### 2.2.2 Aurinkoenergia

Auringosta tulevan säteilyn energiamäärä on todella suuri, mutta tästä energiasta ei voida hyödyntää läheskään kaikkea. Aurinkoenergia voidaan jakaa kahteen ryhmään, eli aurinkolämpöön ja aurinkosähköön. Aurinkosähkötuo-  
tonto on suomessa vuodessa noin 160 GWh. (Aurinkoenergia n.d.)

Aurinkoenergiaan liittyy myös monia haasteita ja haittoja. Aurinkopaneelien tuotanto on maapal-  
lolle kuluttavaa. Paneelien valmistukseen käytetään harvinaisia ja kalliita luonnonvaroja, joita on  
käytössä vain rajallinen määrä. Paneelien valmistus, kuljetus ja asennusvoivat myös luoda hiilidi-  
oksidi päästöjä, joita ei muisteta huomioida. Aurinkoenergian tuotanto on myös aikasidonnaista.  
Aurinkoenergiaa ei voida tuottaa öisin.

Aurinkoenergialla on kuitenkin todella paljon positiivisia vaikutuksia ja ominaisuuksia. Aurinko  
energianlähteenä ei tule katoamaan eikä sitä voi käyttää liikaa. Aurinkoenergiaa on saatavilla kaik-  
kiällä maailmassa, saantiin ja tehokkuuteen on kuitenkin vaikutuksia sijainnilla. Aurinkoenergia jär-  
jestelmät ovat hyviä käytettävyydeltään ja niiden huoltaminen on edullista. Käyttöikältään paneelit  
ovat noin 20–30 vuotta. Kun aurinkoenergiajärjestelmä on saatu toimintaa, se on varma toiminen.  
Aurinkopaneelien ympäristövaikutukset ovat vähäisiä. Aurinkopaneelit eivät tuota hiilidioksidi-  
päästöjä eikä niistä ole meluhaittaa. Yksi aurinkopaneelien haittavaikutuksista on maisemakuvan  
muutos, koska ne vievät paljon pinta-alaa, jos halutaan saada suuria sähkötehoja. (Aurinkovoima  
n.d.)

Aurinkosähkön tuotannon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Valosähköisessä ilmiössä auringonsäteily osuu puolijohdemateriaaliin, jonka seurauksena vapautuu elektroneja. Puolijohde on materiaali, joka johtaa sähköä huonommin kuin metalli, mutta paremmin kuin eriste. Auringonsäteilystä vapautuvat fotonit siirtävät energiansa elektroneille, jotka liikkuvat puolijohdemateriaalien välillä. Elektronien liikkeen sähkövirta muutetaan ulkoisella järjestelmällä haluttuun muotoon eli sellaiseksi, että sitä voidaan varastoida tai käyttää. Tämän jälkeen elektronit palaavat takaisin puolijohteen toiselle puolelle odottamaan auringon säteilystä vapautuvaa fotonien energiaa ja sama kierto toistuu niin kauan kuin auringon valoa on saatavilla paneelin pinnalle. (Aurinkosähkötekniikat n.d.)

### 2.2.3 Biovoima

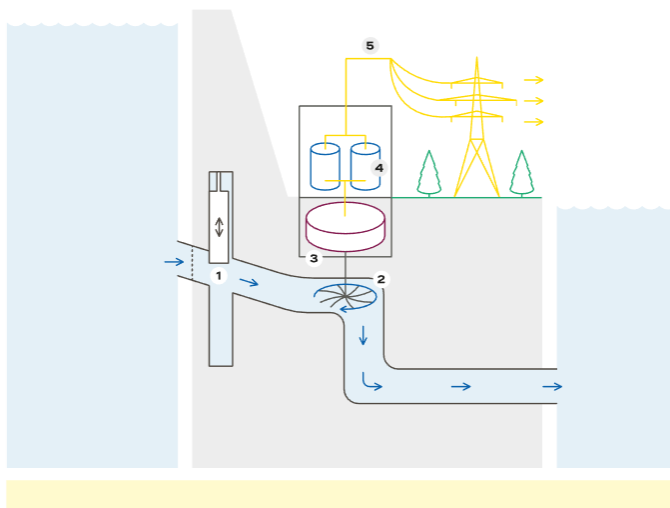
Biovoimaa on montaa eri tyyppiä. Vihreää sähköä tuotetaan kuitenkin biovoimalla pääosin CHP tuotantolaitoksissa. CHP:lla (Combined heat and power) tarkoitetaan yhdistettyä lämmön ja sähköntuotantoa. Se osa polttoaineesta, jota ei voida muuttaa sähköksi otetaan talteen lämpönä. Tämä parantaa voimalaitoksen hyötysuhdetta suuresti. (Kostama, J n.d.) CHP-laitoksen tyypillinen hyötysuhde on noin 90 %. CHP-laitoksia käytetään yleisesti joko kaukolämmön valmistuksessa tai teollisuudessa. Kaukolämmön tuotannossa sähkön lisäksi syntyvä lämpö otetaan talteen lämmönvaihtimilla ja siirretään kaukolämpöverkkoon, josta se jaetaan kaukolämpöasiakkaiden lämmitykseen. Teollisuudessa syntyvää lämpöä voidaan taas käyttää esimerkiksi paperikoneen kuivausryhmälle tai sellutehtaan sellukeittimeen. CHP-laitos myös ottaa tuotetusta sähköstä laitoksen oman käyttösähkön eli laitokset ovat energia omavaraisia. CHP-laitoksella tuotettu sähkö on vihreää silloin, kun polttoaineena käytetään biopolttoainetta. CHP-laitoksen polttoaineina voidaan käyttää myös muuta kuin biopolttoaineita, kuten kivihiiltä.

Biokaasua tuotetaan monenlaisesta biohajoavasta jätteestä, kuten kuluttajien biojätteestä, jätevedenpuhdistuksen lietteistä tai maatalouden sivutuotteista. Biokaasua valmistetaan mädättämällä yllä mainittuja materiaaleja. Materiaali murskataan ja siihen lisätään nestettä, jotta sen käsittely helpottuu. Mädätysprosessi vaatii 37 asteen lämpötilan. Mädätyksen yhteydessä syntyy biokaasua. Mädätys suoritetaan isoissa säiliöissä ja syntynyt kaasu otetaan talteen säiliöstä. Kaasu tulee puhdistaa ennen kuin sitä voi varastoida tai alkaa jakelemaan eteenpäin kuluttajille. Biokaasulla

voidaan tuottaa sähköä esimerkiksi kaasuturbiineilla. Tyypillisin käyttökohde biokaasulle on kuitenkin ajoneuvojen polttoaineena. (Miten biokaasua tuotetaan? N.d.) Biokaasulla tuotettua sähköä voidaan siis käyttää vihreän vedyn valmistukseen.

#### 2.2.4 Vesivoima

Vesivoiman tuotanto perustuu veden potentiaalienergian muuntamiseen liike-energiaksi. Potentiaalienergia määräytyy kahden vesipinnan korkeuseron mukaisesti. Korkeusero määrittää myös voimalan maksimi energiantuotanto määrän. Potentiaalienergian laskukaava on  $E = G \times h$ , jossa E on energia, G paino ja h korkeusero. Liike-energian laskukaava on  $E = 0,5 \times m \times v^2$ , jossa E on energia, m on massa ja v nopeus. Vesivoimalan toimintaperiaate on kuvattu kuviossa 5. Vesi virtaa ylemmältä tasolta alemmalla, jolloin sillä on liike-energiaa. Tämä liike-energia pyörittää turbiinia. Turbiinin akseli on yhteydessä generaattoriin. Generaattori muuntaa energian sähköksi.



Kuvio 4. Vesivoimalan toimintaperiaate. (Vesivoima n.d.)

Vesivoimalla on hyvä säätövoima. Vettä voidaan varastoida niinä aikoina, kun sähkön tarve ja/tai hinta on matala, tai sähköä ei tarvitse tuottaa. Kun sähköä taas tarvitaan, voidaan vettä juoksentaa suurempia määriä, jolloin sähköäkin saadaan enemmän. Vesivoiman tuotannossa on kuitenkin

tiettyjä rajoituksia esim. vesipintojen korkeuksien mukaan, joka voi vaikuttaa tuotannon määrään.  
(Vesivoima n.d.)

### **3 Vedyn valmistaminen, käyttökohteet, sijainti**

Vetyä voidaan valmistaa monin eri menetelmin. Tässä luvussa tullaan käsittelemään vedyn yleisimpiä tuotanto muotoja ja tarkastelemaan mikä vedyn tuotanto muoto sopii parhaiten vihreän vedyn tuotantoon. Lisäksi tutkitaan, miten tuotanto menetelmä vaikuttaa vedyn tuotantolaitoksen geologisen sijainnin merkitykseen. Vedyn käyttökohteita on monia ja niiden tarkasteluun keskitytään tässä luvussa. Vetyä voidaan käyttää osana jonkin muun yhdisteen valmistusta, suoraan vetynä osana prosessia esimerkiksi terästeollisuudessa tai sitä voidaan käyttää energia varastona. Vedyn käyttö osana muita prosesseja vaatii usein hiilidioksidia. Hiilidioksidin saatavuutta tarkastellaan metaanin valmistuksen ohella. Vedyn käyttö eri teollisuuden aloilla mahdollistaa suuret hiilidioksidipäästö vähennykset. Vedyn tuotantoketjussa tuotantolaitosten ja käyttöpaikkojen sijainti on myös oleellinen tekijä vedyn varastointi-, kuljetus- ja kemiallisten haasteiden vuoksi.

#### **3.1 Vedyn valmistus**

Vetyä voidaan valmistaa monella eri tavalla. Kuten kappaleessa 2.2.1 käytiin läpi vedyn tuotantoon käytettävä energia ja raaka-aine määrittelevät minkälaista vetyä tuotetaan. Käytetyllä raaka-aineella on suuri merkitys sen käyttökohteiden, etiikan ja kannattavuuden osalta. Vihreän vedyn tuotanto on tällä hetkellä vielä erittäin vähäistä sen suurten tuotantokustannusten takia ja teknologian takia, mutta hiilineutraalin tulevaisuuden takia teknologia kehittyy kovaa vauhtia ja tuotantokustannukset tippuvat jatkuvasti, joten vihreän vedyn osuus tulee nousemaan suuresti. Vedyn mahdollisia tuotanto muotoja ovat muun muassa. reformointi, pyrolyysi ja elektrolyysi. (Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., Patronen, J. 2022.)

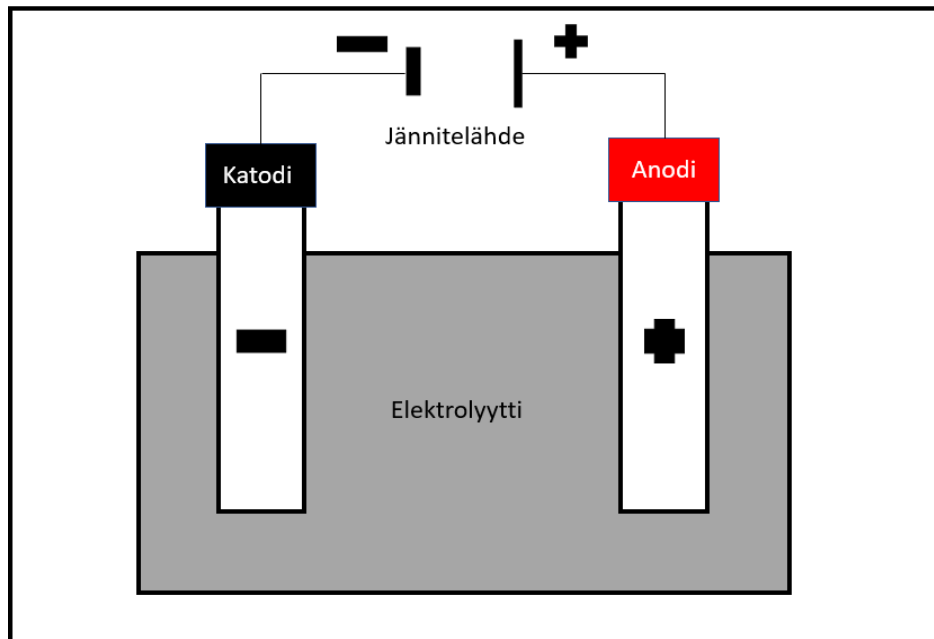


Vetyä valmistetaan tällä hetkellä eniten höyryreformoimalla maakaasua (vety 2020). 78 % maailman vedystä tuotetaan höyryreformoinnilla. Höyryreformoinnissa maakaasun sisältämät vety ja hiili erotetaan toisistaan. Tämän jälkeen jäljelle jäävä hiili hapetetaan hiilidioksidiksi. Reaktioyhtälö on seuraavanlainen:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$  (What is Steam Methane Reforming 2022). Lopputuotteena syntyy siis hiilidioksidia ja vetyä. Kuten kappaleessa 2.1.1 käytiin läpi, höyryreformoimalla tuotettu vety voi olla joko harmaata tai sinistä vetyä riippuen siitä otetaanko prosessissa syntyvä hiilidioksidi talteen. Menetelmällä ei voida kuitenkaan tuottaa suoranaisesti vihreää vetyä, koska prosessin sivutuotteena syntyy hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ), kuten yllä olevasta reaktioyhtälöstä nähdään.

Vedyn valmistus pyrolyysiprosessilla on myös mahdollista. Pyrolyysiprosessissa orgaanista ainetta, kuten biomassaa kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa. Tällöin aine ei pala, vaikka lämpötilat ovat yli 500 °C astetta, koska palaminen tarvitsee happea. Koska palamista ei tapahdu, aine muuttuu kaasuiksi ja biohiileksi. Suurin osa näistä kaasuista voidaan nesteyttää bioöljyksi tai sitten kaasut voidaan kerätä talteen. Syntyviä kaasuja ovat esimerkiksi vety, hiilidioksidi ja hiilimonoksidi. Syntyviä kaasuja voidaan myös käyttää prosessin polttoaineena uudelleen, mikä parantaa hyötysuhdetta. (What is pyrolysis 2021.) Pelkästään vedyn valmistukseen pyrolyysiprosessin haasteita ovat kuitenkin vedyn puhtauden takaaminen. Pyrolyysiprosessissa syntyvät kaasut tulisi erotella, mutta kaasuja ei saada täysin erotettua toisistaan. Myös raaka-aineen vaihtelut vaikuttavat tuotteen laatuun ja tasaisuuteen.

Tulevaisuuden ja vihreän vedyn potentiaalisimpana tuotantomuotona odotetaan kuitenkin olevan elektrolyysi. Elektrolyysiprosessin mielenkiinto piilee siihen vaadittavien raaka-aineiden takia. Elektrolyysillä saadaan tuotettua puhtaampaa vetyä kuin muilla valmistusmenetelmillä (Vety 2020).

Elektrolyysilaitteisto koostuu jännitelähteestä, katodista, anodista ja elektrolyytistä. Katodi on negatiivisesti varautunut ja se pelkistää ionit. Anodi on positiivisesti varautunut ja se hapettaa ionit. Elektrodit ovat kuviossa 6 kuvatut sauvat. Elektrodien avulla jännitelähteen sähköenergia johdetaan liuokseen. Elektrolyysissä sähköenergian avulla luodaan kemiallinen reaktio, jossa eri molekyylejä voidaan hajottaa ioneiksi. Vedyn valmistuksessa hajotettava molekyyli on vesi ( $\text{H}_2\text{O}$ ).



Kuvio 5. alkalielektrolyysilaittesto. (Elektrolyysi n.d, muokattu)

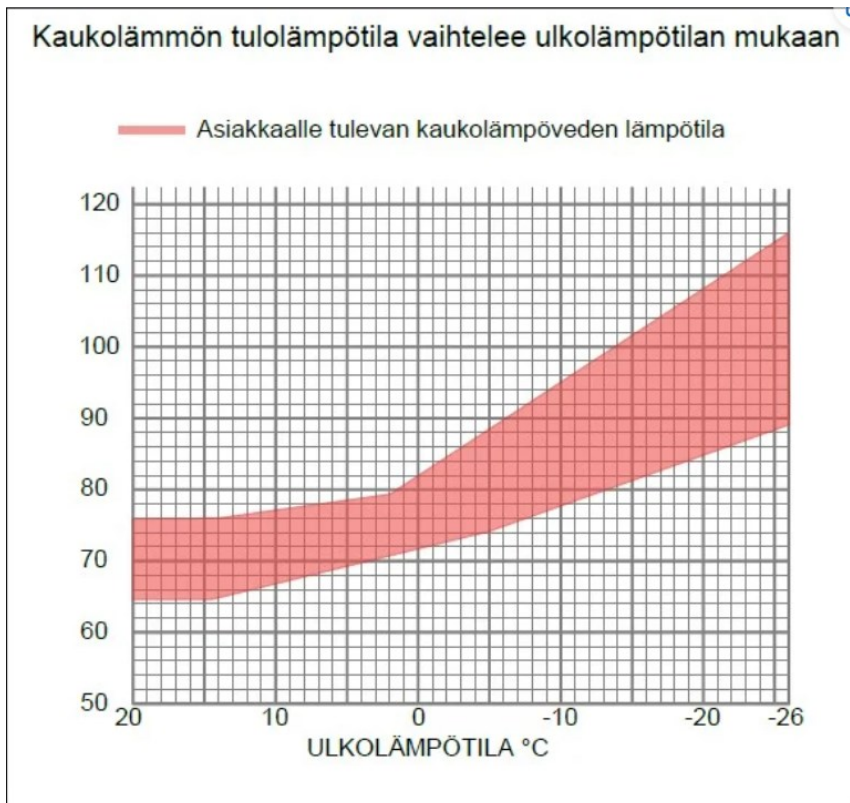
Veden hajottaminen tapahtuu seuraavasti. Vettä syötetään elektrolyytti liuokseen ja siihen johdetaan sähköä elektrodien kautta. Sähköenergian avulla vesimolekyyli saadaan hajotettua vety- ja hydroksidi-ioneiksi. Vety-ionit ovat positiivisesti varautuneita ja hydroksidi-ionit negatiivisesti. Vety-ionit pelkistyvät vedyksi katodilla ja hydroksidi-ionit hapettuvat hapeksi. Kokonaisreaktio veden elektrolyysissä on  $\text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{H}_2 \text{ (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (g)}$ . (Elektrolyysi n.d.) Vedyn valmistus veden elektrolyysillä on siis puhtain tapa tuottaa vetyä. Sen sivutuotteena ei synny kuin happea. Kuten aiemmissa osioissa huomattiin, muissa valmistusmenetelmissä sivutuotteena syntyy usein hiilidioksidia.

Haasteeksi vedyn tuottamiseen elektrolyysillä koituu kuitenkin prosessin huono hyötysuhde. Hyötysuhde elektrolyysillä tuotetulle vedylle on noin 60–70 prosenttia. Huono hyötysuhde johtuu siitä, että prosessiin käytetystä sähköstä noin kolmasosa menee hukkaan lämpönä. Hyötysuhdetta saadaan parannettua ottamalla syntyvä hukkalämpö talteen. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa rakennuksien lämmitykseen. (Vartiainen, E 2020).

Mälardalenin yliopisto on teettänyt tutkimuksen elektrolyysillä tuotetun vedyn yhteydessä syntyvän hukkalämmön käytöstä kaukolämpöverkossa. Tutkimuksen toteuttajina ovat Fredrik Jonsson ja Andrea Miljanovic. Tutkimuksessa olivat myös mukana ABB ja Luleå energi.

Tutkimuksen kohteena oli Luleå:n kaukolämpöverkko Ruotsissa. Tarkasteltu laitteisto tutkimuksessa oli kaksi 100 MW tehoisia alkali- ja PEM-elektrolyyseriä. Niiden yhteyteen oli liitettynä lämpöpumppu ja lämmönvaihdin. Tuloksista selvisi, että alkalielektrolyysissä hukkalämmön lämpötila oli 80 celsiusastetta. Talteen otettavan lämmön määrä olisi 310 630 MWh. Tästä määrästä kaukolämpöverkkoon voitaisiin hyödyntää 226 220 MWh vuosittain. PEM-elektrolyysissä hukkalämmön lämpötila oli 79 celsiusastetta. Hukkalämmön määrä PEM-elektrolyysissä oli 203 060 MWh ja tästä määrästä kaukolämpöverkkoon voitaisiin ottaa 171 770 MWh vuosittain. Näillä tuloksilla prosessien hyötysuhteiksi saatiin PEM 94,7 % ja alkali 88,4 %. (Jonsson, F & Miljanovic, A 2022.)

Kaukolämpöverkon lämmöntalteenotossa joudutaan käyttämään lämpöpumppua silloin kun kaukolämpöverkon lämpötila on yli hukkalämmön lämpötilan. Lämpöpumpulla saadaan hukkalämmön lämpötilaa nostettua, jolloin sitä voidaan ottaa kaukolämpöverkkoon, kun kaukolämpöverkon lämpötila on korkealla. Tällaisia hetkiä syntyy talvisin, kun ulkolämpötila on matala. Kaukolämpöverkon veden lämpötila käyttäytyy seuraavan kuvion 6 mukaisesti. Kuvion 6 mukaan elektrolyysissä syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää silloin kun ulkolämpötila on noin +20 ja – 10 celsiusasteen välissä. Kuviossa 6 esitetty käyrä on leveä sen takia, että verkon lämpötila ei ole lineaarinen vaan siihen vaikuttavat muutkin asiat kuin ulkolämpötila. Yksi suuri vaikuttava tekijä on verkon pumppausteho. Pumppaustehon ollessa suurempi voidaan verkkoon ajaa viileämpää vettä. Jos pumppaus kapasiteetti täyttyy, täyttyy veden lämpötilaa alkaa nostamaan.



Kuvio 6. Kaukolämpöverkon lämpötila ulkolämpötilan mukaan. (Kaukolämpölaitteet n.d.)

Kaukolämpöverkon mitoitus lämpötila on ollut 65–115 celsiusasteen välillä. Kaukolämpöverkon veden lämpötila ei voi olla alhaisempi kuin 65 celsiusastetta, koska kaukolämpöverkolla lämmitetään myös kiinteistöjen käyttövetä, jonka lämpötila täytyy olla minimissään 55 celsiusastetta. Kaukolämpöverkkojen maksimi lämpötilaa halutaan kuitenkin rajoittaa 90 celsiusasteeseen, jotta mahdollisten hukkalämpökohteiden hyödyntäminen olisi helpompaa, eikä lämpöpumppujen käyttöä vaadittaisi niin paljon. (Kaukolämpölaitteet n.d.)

Isot lämpöpumput kuluttavat kuitenkin paljon sähköä, ja vihreän vedyn hukkalämmön hyödyntämisen kannalta on oleellista, että lämpöpumpun käyttämä sähkö tulisi olla vihreää sähköä (KS. kappale 2.2. Vihreän sähkön lähteet).

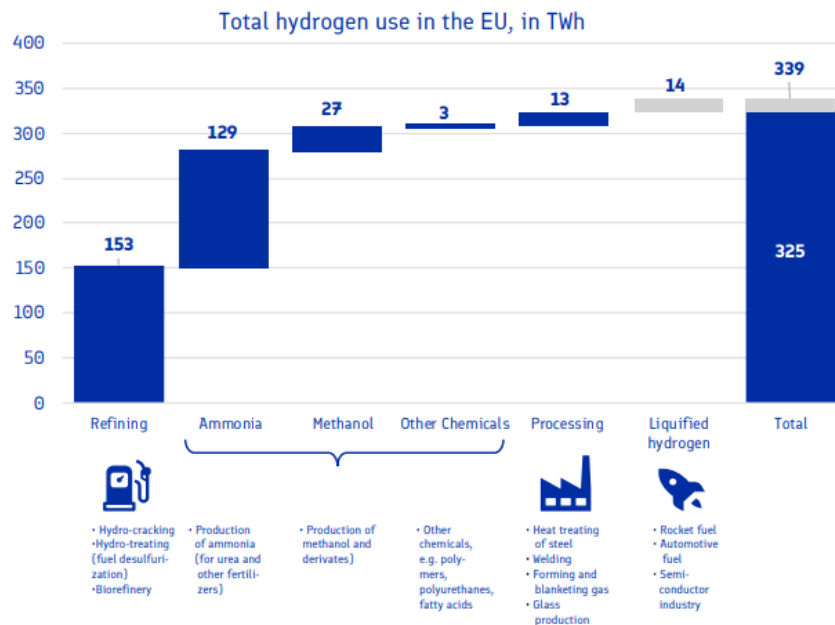
Luvut osoittavat, että elektrolyysillä tuotetun vedyn hyötysuhdetta ja kannattavuutta saadaan kasvatettua suuresti lisäämällä prosessiin lämmöntalteenotto. Vartiainen (2020) kertoo myös, kuinka elektrolyysistä syntyvän lämmöntalteenotto parantaa prosessin hyötysuhdetta. Kaukolämpöver-

kon lämmöntalteenotto asettaa kuitenkin rajoitteita vedyn valmistus sijainnille. Kaukolämpöverkon rakentaminen on kallista ja jos välimatkat käyttökohteisiin kasvavat suuriksi joudutaan sen yhteyteen rakentamaan pumppaamoja lämpötilan ja paineen säilyttämiseksi kaukolämpöverkossa.

### **3.2 Käyttökohteet**

Vetyä käytetään tällä hetkellä osana teollisuutta monilla eri aloilla. Vedyn käyttö Euroopassa vuonna 2015 oli yhteensä 339 TWh. Tämä luku tulee kasvamaan suuresti tulevaisuudessa. Vedyn käyttö jakautui Euroopassa polttoaineenjalostukseen, erilaisten kemikaalien tuotantoon, koska vety on maailman yksinkertaisin alkuaine, on se osana todella monia yhdisteitä. Vetyä käytetään teollisuuteen, kuten teräksen tuotantoon ja nestemäisenä vetynä, jota käytetään polttoaineena. Suurin kuluttaja on tällä hetkellä polttoaineen jalostus. (ks. Kuvio 8.)

# Hydrogen consumption in EU



Kuvio 7. Vedyn kokonais käyttö Euroopassa vuonna 2015. (Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J., Hurskainen, J 2020.)

Vetyä tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään myös ”Power to X” -menetelmällä (Vartiainen, E 2020). Power to X-menetelmällä tarkoitetaan teknologiaa, jossa sähköä muunnetaan toiseen energiamuotoon ja sitä voidaan tarvittaessa muuttaa takaisin sähköksi (Ahola, J 2022). Tätä menetelmää tullaan hyödyntämään muuttuvien energiantuotantomuotojen varastointiin. Esimerkiksi aurinko- ja tuulivoiman ollessa suuressa tuotannossa voitaisiin ylimääräisellä sähköllä tuottaa vetyä elektrolyysiprosessin avulla, jolloin sähkön energia saadaan varastoitua vetyyn. Tuotettua vetyä voidaan käyttää myöhemmin esimerkiksi silloin kun aurinko- ja tuulisähkön tuotanto on vähäistä. (Vartiainen, E 2020.) Power to X-menetelmä tulee olemaan oleellinen osa sähköntuotannon tasapainottamista silloin kun tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto on suurta. Tuuli- ja aurinkovoimaloiden ylös- ja alasajo on nopeaa ja helppoa verrattuna esimerkiksi ydinvoimaloiden tai voimalaitosten. Sähköntuotanto kapasiteetin ohjaamisella voidaan tasapainottaa sähköntuotantoa, mutta tuuli- ja aurinkovoiman

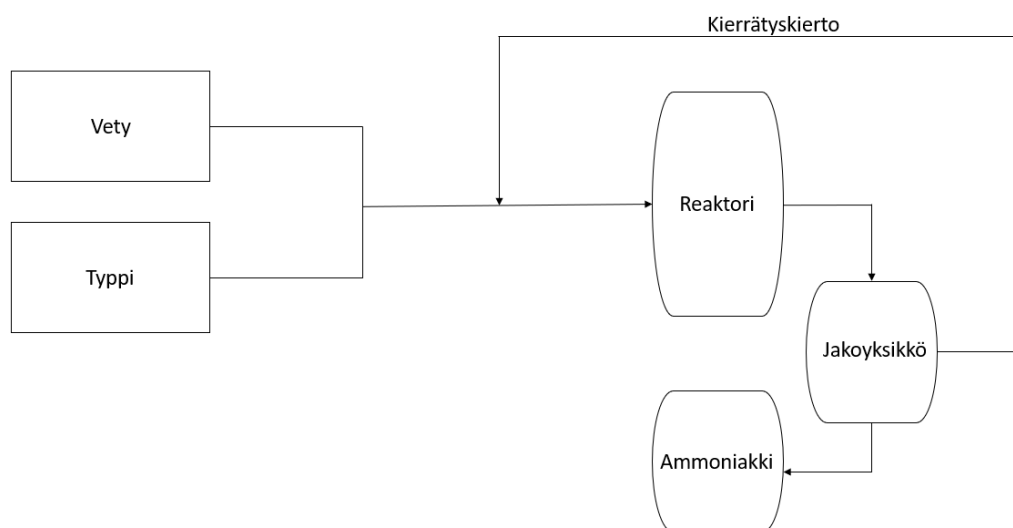
tuotantokustannukset ovat niin matalat, ettei laitosta herkästi ajeta alas vaikka sähkön hinta olisikin todella matala. Niinpä niinä aikoina, kun sähköä on paljon saatavilla voitaisiin sillä kapasiteetillä tuottaa vetyä niitä hetkiä varten kun energian tarve on suurempaa. Vetyä prosessissa käyttävät laitokset tarvitsevat kuitenkin tasaista vedyn tuotantoa ympäri vuorokauden.

### 3.2.1 Ammoniakin valmistus

Ammoniakin valmistus vaatii vetyä. Tällä hetkellä ammoniakin valmistukseen käytettävä vety valmistetaan aiemmin kappaleessa 3.1 mainitulla höyryreformointi menetelmällä. Höyryreformoimalla tuotettu vety tuotti hiilidioksidipäästöjä. Ammoniakin valmistus on yksi suurimpia vedyn käyttäjiä tällä hetkellä maailmassa. Kun siihen käytetty vety tuotetaan hiilidioksidia tuottavalla prosessilla ovat ammoniakin valmistuksesta koituneet hiilidioksidipäästöt myös suuret.

Ammoniakin valmistusketju on pitkä monivaiheinen prosessi, mutta prosessin pääosana toimii Haber-Boschin menetelmä. Ammoniakin valmistus alkaa Haber-Boschin menetelmässä. Tätä vaihetta ennen tarvitaan vetyä ( $H_2$ ) ja typpeä ( $N_2$ ). Kuten aiemmin on todettu, vihreää vetyä saadaan elektrolyysi prosessin avulla. Typpeä prosessiin saadaan ilmasta. Ilma sisältää noin 78 % typpeä, noin 21 % happea ja loput jäljelle jäävät ovat muita kaasuyhdisteitä, joten molempia ammoniakin valmistukseen tarvittavia raaka-aineita on saatavilla reilusti.

Haber-Boschin ammoniakki synteesi koostuu seuraavasti osista, jotka on kuvattu kuviossa 8. Synteesi koostuu vety- ja typpisäiliöistä, reaktorista, jakoyksiköstä, kierrätyskierrasta ja yksiköstä, johon ammoniakki varastoidaan.



Kuvio 8. Haber-Boschin menetelmä (Cheema, I 2019, muokattu)

Prosessissa vety ja typpi syötetään reaktoriin. Reaktorissa typpi ja vety reagoivat keskenään seuraavan reaktioyhtälön mukaan:  $\text{N}_2 (\text{g}) + 3 \text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{NH}_3 (\text{g})$ . Reaktorissa paine on tyypillisesti noin 150–300 baaria ja lämpötilat noin 623–773 kelvinastetta. Tämä vastaa 350–500 celsiusastetta. Reaktoriin syötetään myös katalyyttejä, jotka nopeuttavat reaktiota. Katalyyttinä voi toimia esimerkiksi rautaoksidi. Reaktorin jälkeen reagoimut kaasu ohjataan jakoyksikköön, jossa valmis ammoniakki otetaan talteen ja reagoimatta jäänyt kaasu kierrätetään takaisin reaktoriin. (Cheema, I 2019, 6–12.)

Ammoniakin voidaan käyttää energiavarastona samalla tapaa kuin vetyä. Ammoniakin varastointi ominaisuudet ovat kuitenkin huomattavasti paremmat kuin vedyn. Ammoniakkia voidaan varastoida nestemäisenä vain 10–15 baarin paineessa tai -33 celsiusasteessa, kun taas vedyn nesteyttäminen vaatii lämpötilan -253 celsiusastetta. Ammoniakkia voidaan varastoinnin jälkeen käyttää polttoaineena ja siitä kaavaillaan vedyn rinnalle polttoainetta esimerkiksi laivaliikenteelle. Ammoniakin polttamisesta syntyy vettä ja typpeä. Ammoniakkia käytetään myös monissa kemian teollisuuden prosesseissa, kuten lannoitteiden valmistuksessa. (Ammonia 2020.)



### 3.2.2 Liikenne

Liikenteen tuottamat hiilidioksidi päästöt ovat myös suuri osa Suomen ja koko maailman hiilidioksidipäästöistä. Liikenteen sähköistyminen on kuitenkin jo alkanut ja monilla autovalmistajilla on monia täyssähkö malleja. Sähköistyvälle liikenteelle on myös jo pystytetty hyvät lataus mahdollisuudet ja liikkumisesta on tullut jo varsin helppoa. Sähköisellä liikenteellä on kuitenkin omat haasteensa. Sähköllä toimivan liikenteen rajoittavin tekijä on kantama. Nykyisellä akkuteknologialla esimerkiksi sähkö auton kantama yhdellä latauksella on noin 350–600 km ja akun lataus täyteen on melko hidasta. Akkuteknologialla toimivan liikenteen haasteena on myös akkujen suuri koko. Raskaan liikenteen esimerkiksi rekkaliikenteen toteuttaminen akkuteknologialla on myös vaikeaa, koska välimatkat ovat pitkiä eikä pitkiin lataus taukoihin ole varaa.

Vetyä voidaan käyttää liikenteen polttoaineena. Vedyn käyttö polttoaineena liikenteessä vaatii polttokennoauton. Polttokennoautossa vetyä varastoidaan autoon vety tankkiin joko kaasuna tai nesteenä. Kaasuna varastointi täytyy tehdä kovapaineisessa painesäiliössä. Säilöntäpaine on noin 700 baaria. Nestemäisen vedyn käyttö on haasteellisempaa, koska vedyn täytyy olla -253 celsiusasteen lämpötilassa pysyäksään nesteenä. (Polttokennoauto 2022.)

Polttokennon toiminta perustuu vedyn reagointiin hapen kanssa. Polttokenno koostuu negatiivisesta Anodista, positiivisesta katodista ja elektrolyytistä. Polttoaine vety ohjataan anodille, jossa se reagoi ja hajoaa elektroneiksi ja ioneiksi. Samaan aikaan happea ohjataan katodille, joka mahdollistaa vedyn reagoinnin. Vedyn hajoamisesta syntyneet elektronit aiheuttavat sähkövirtaa, joka johdetaan sähkömoottorille. Reaktio sivutuotteena syntyy lämpöä ja vettä. (Dicks, L & Rand, D 2018 8–9.)

Polttokennolla toimiva auto on käytännössä sähköauto, koska polttokennosta syntyvää sähköenergiaa käytetään luomaan autolle liike-energiaa. Sivutuotteena syntyy vain vettä ja lämpöä eli polttokennotekniikka mahdollistaa hiilineutraalin liikenteen, jos käytetty vety on vihreää. Vetyä voidaan hyödyntää myös lento- ja laivaliikenteen polttoaineena polttokennotekniikan avulla. Vety tankkausasemia on tällä hetkellä harvassa maailmalla, ja Suomessa niitä ei ole vielä ollenkaan. Vetyteknologian kehitys ja ilmastorajoitteet tulevat nopeuttamaan vedyn yleistymistä liikenteen polttoaineena.

### 3.2.3 Synteettinen metaani ja metanoli

Yksi vedyn suurimmista käyttökohteista on metaanin ja metanolin valmistus. Metaani on kaasu ja sen kemiallinen kaava on  $\text{CH}_4$  (Bio- ja maakaasu n.d). Metaania voidaan käyttää liikenteen polttoaineena tai energiantuotannossa esimerkiksi kaasuturbiineissa. Lisäksi tällä hetkellä suurin osa käytetystä vedystä tuotetaan metaanista. Metaanista puhutaan myös maakaasuna. Maakaasu on fossiilinen polttoaine. Maakaasua saadaan tällä hetkellä poraamalla maaperää, josta vapautuu maakaasua. Metanoli on yksinkertaisin alkoholi yhdiste. Sen kemiallinen kaava on  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Metaanin tapaan sitä voidaan käyttää polttoaineena. Metanolia käytetään myös jäteveden puhdistuksessa. Metanolia valmistetaan tällä hetkellä syntetisoimalla maakaasua. (Metanoli 2023.)

Metaania ja metanolia voidaan valmistaa vihreän vedyn avulla. Aineet koostuvat vain vedystä, hiilestä ja hapesta. Näitä aineita valmistamalla vihreän vedyn avulla voidaan vähentää esimerkiksi liikenteestä syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Prosessia varten tarvitaan kuitenkin hiilidioksidia. Hiilidioksidia saadaan otettua talteen monista teollisuuden prosesseista, kuten voimalaitoksilta. Talteen otettua hiilidioksidia voidaan varastoida tai jalostaa esimerkiksi metaaniksi ja metanoliksi.

Voimalaitokset, jotka käyttävät polttavaa tekniikkaa energian luontiin, kuten CHP-laitokset synnyttävät hiilidioksidipäästöjä, jotka tyypillisesti ohjataan taivaalle savupiipun kautta josta ne päätyvät ilmakehään. Syntyvä hiilidioksidi voidaan kuitenkin ottaa talteen. Hiilidioksidin talteenotto voi tapahtua voimalaitoksesta monella eri tapaa. Hiilidioksidi voidaan poistaa poltonjälkeen savukaasusta savukaasupesurin avulla. Savukaasupesuri parantaa usein myös voimalaitoksen hyötysuhdetta suuresti, koska savukaasusta saadaan pesurin avulla myös paljon hukkalämpöä talteen, joka voidaan syöttää kaukolämpöverkkoon. Tätä menetelmää kutsutaan post-combustion menetelmäksi, koska talteenotto tapahtuu poltonjälkeen. Käytettävä polttoaine voidaan myös kaasuuntuttaa ja syntyvä hiilidioksidi poistetaan kaasusta. Hiilidioksidi voidaan myös ottaa talteen käyttämällä voimalaitoksen palamisilmana puhdasta happea, mikä saa syntyvän palokaasuun olemaan pelkästään vesihöyryä ja hiilidioksidia. Nämä aineet erotellaan toisistaan ja saadaan puhdas palamisprosessi, josta ilmakehään vapautuu vain vesihöyryä. (Pääkkönen, A 2020.) Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen muistakin prosesseista, kuin voimalaitoksilta esimerkiksi sementin ja kalkin tuotannossa voidaan käyttää perinteisen putkirumpu-uunin sijaan sähköuunia, josta saadaan otettua talteen paljon hiilidioksidia. Voimalaitokset ovat kuitenkin suurimmaksi osaksi CHP-laitoksia, koska se parantaa laitoksen hyötysuhdetta. CHP-laitokset ovat monesti yhteydessä kaukolämpöverkkoon

niinpä hiilidioksidin talteenotto on todella tehokasta, koska hukkalämpö saadaan hyötykäyttöön kaukolämpöverkkoon suoraan.

Kun yhdistetään vihreän vedyn tuotanto ja hiilidioksidin talteenotto, voidaan alkaa valmistaa metaania. Metaanin valmistus vedystä hiilidioksidista tapahtuu termokemiallisessa katalyytti reaktiossa. Menetelmää kutsutaan Sabatier menetelmäksi. Sabatier menetelmä on yleisin synteettisen metaanin valmistusmenetelmä. Hiilidioksidi ja vety ohjataan reaktoriin, jossa ne reagoivat keskenään katalyytin vaikutuksesta. Katalyyttinä toimii nikkeli. Katalyytti mahdollistaa vedyn ja hiilidioksidin yhdistymisen metaaniksi seuraavan reaktio yhtälön mukaisesti:  $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ . Reaktion sivutuotteena syntyy vettä. Sabatier menetelmässä syntyy kuitenkin hukkalämpöä. Tripodi, Conte ja Rossetti tutkivat Sabatier menetelmää ja tutkimuksen tuloksina oli, että syntyvä hukkalämpö on noin 100 - 110 celsiusasteen väillä. Tätä hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkkoon tai muuhun alueella sijaitsevaan prosessiin. (Biswas, S., Kulkarni, AP., Giddey, S., Bhattacharya, S. 2020 ; Tripodi, A., Conte, F., Rossetti, I. 2020.) Tämän jälkeen metaani voidaan joko käyttää sellaisenaan ja syöttää kaasuverkkoon tai sitä voidaan jatkojalostaa esimerkiksi metanoliksi. Metaani voidaan myös nesteyttää tarvittaessa. Metaanin nesteytys vaatii lämpötilan -161 celsiusastetta, joten sen pitäminen nesteenä on haasteellista. Nesteytetty metaani täytyy säilöä paineastioissa, jotta lämpötila ei pääse putoamaan.

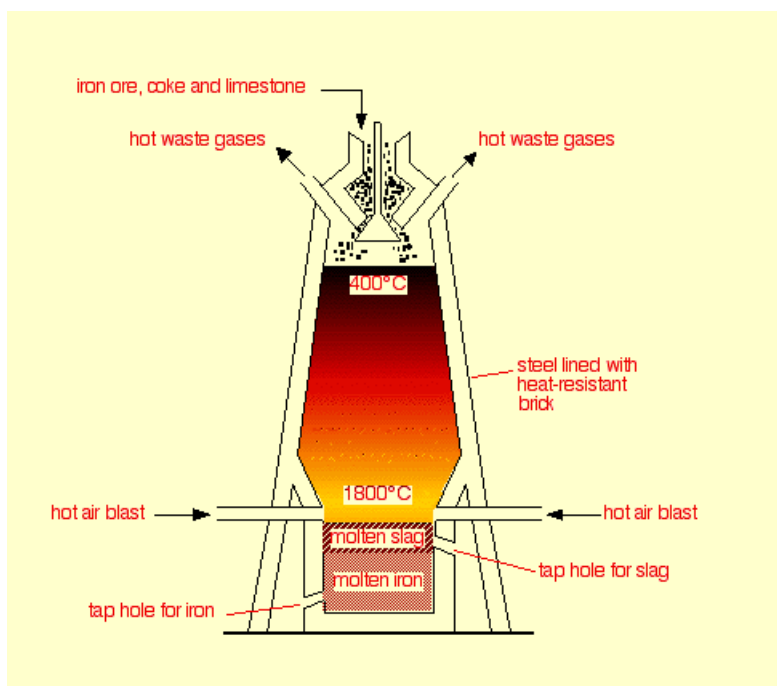
### 3.2.4 Terästeollisuus

Terästeollisuus on tällä hetkellä yksi Suomen ja koko maailman suurimpia hiilidioksidipäästöjen lähteitä. Esimerkiksi SSAB:n Oxelösundin, Luulajan ja Raahen terästehtaiden päästöt olivat noin 9,5 miljoonaa tonnia. Tämä luku on melkein yhtä suuri kuin Suomen liikenteen hiilidioksidipäästöt. Hiilidioksidipäästöt johtuvat tämänhetkisestä teräksen valmistusmenetelmästä (Hämäläinen, M 2019).

Teräksen valmistus on toteutettu suurimmaksi osaksi pelkistämällä rautamalmia masuunissa. Prosessi alkaa rautamalmin käsittelyllä pellettimäiseen muotoon, jotta sitä voidaan käyttää masuunissa. Rautamalmi koostuu seuraavista yhdisteistä:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $3\text{Fe}_2\text{O}_3$  ja  $\text{FeO}$ :sta. Ennen masuunia tarvitaan pelkistintä. Pelkistimen tarkoitus on pelkistää rautamalmi raudaksi. Perinteisesti teräksen

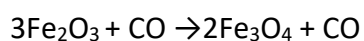
valmistukseen käytettävä pelkistimenä on käytetty kivihiiltä. Kivihiiltä täytyy kuitenkin käsitellä ennen kuin sitä voidaan käyttää pelkistimenä. Pelkistin valmistetaan koksamossa. Koksamossa jauhattua kivihiiltä syötetään hapettomaan uuniin, jossa on korkea lämpötila. Uunista saadaan koksia, joka kuivatetaan käyttäen typpikaasua ja tämän jälkeen koksi seulotaan. (Hiilet ja koksit n.d.)

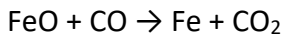
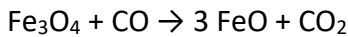
Kuviossa 9 on esitetty masuunin rakenne. Rautamalmi ja koksi syötetään masuuniin. Masuuni on korkea putkimainen uuni, jossa vallitsee korkealämpötila. Masuuniin rautamalmi ja koksi syötetään uunin yläosasta. Yläosassa on myös putkistot, joista kuumat syntyvät kaasut pääsevät poistumaan. Uunin alaosassa on ilman syöttöputkistot, jotka mahdollistavat palamisilman syötön. Palamisilma lämmitetään uunin yläosasta puistuvilla kaasuilla. (Clark, J 2015.)



Kuvio 9. Masuunin rakenne. (Clark, J 2015.)

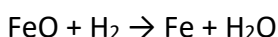
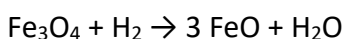
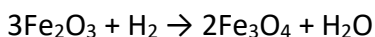
Masuunissa tapahtuu rautamalmin pelkistäminen raudaksi. Luvun alussa käytiin läpi rautamalmin koostumus. Rautamalmi reagoi koksen kanssa masuunissa. Koksi toimii pelkistimenä seuraavien reaktioyhtälöiden mukaan.





Kuten reaktioyhtälöistä nähdään, raudan sivutuotteena syntyy hiilidioksidia. Terästeollisuuden hiilidioksidipäästöt syntyvät pääosin juuri edellä mainitussa pelkistys prosessissa, joka tapahtuu masuunissa (DRI production 2021). Kun masuunissa rautamalmi on saatu pelkistettyä raudaksi, se ohjataan konvertteriin. Syntyneen raudan hiilipitoisuus on noin 4,5 %. Konvertterissa raudan hiilipitoisuutta lasketaan. Hiilipitoisuuden laskenta tapahtuu syöttämällä konvertteriin happea, joka mahdollistaa hiilenpalamisen. Hiilen palamisreaktio on  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ . Kuten nähdään, tässäkin vaiheessa teräksen valmistusta syntyy hiilidioksidipäästöjä. Lopuksi sulateräs kaadetaan muottiin, josta sitä lähdetään jatkojalostamaan haluttuun muotoon. (Hiili terästeollisuudessa n.d.) Kuten aiemmin todettiin terästeollisuuden hiilidioksidi päästöt ovat todella suuret. Päästöt johtuvat yllä kuvatun valmistustekniikan vaatimista reaktioista. Yhden teräs tonnin valmistamisessa syntyy noin 1600 kg hiilidioksidipäästöjä (Hämäläinen, M 2019.)

Nykyisen masuunitekniikan hiilidioksidipäästöihin on kuitenkin ratkaisu. Terästeollisuuden hiilidioksidipäästöistä voidaan päästä eroon miltei kokonaan eroon vedyn avulla. Masuunitekniikassa rautamalmin pelkistykseen käytetty hiili koksi voidaan korvata vedyllä. Vedyllä rautamalmi saadaan pelkistettyä rautasieneksi. Kuten aiemmin on todettu, vedyn valmistus elektrolyysiprosessilla on hiilidioksidipäästötöntä, jos elektrolyysiin käytetty sähkö on vihreää. Vetyä voidaan käyttää pelkistimenä ja sen reaktioyhtälöt rautamalmin kanssa ovat seuraavat:



Reaktio yhtälöistä nähdään, että pelkistuksen sivutuotteina ei synny hiilidioksidia vaan vettä. Kun rautamalmi on saatu pelkistettyä rautasieneksi, seuraavana prosessin vaiheena on valokaariuuni.

Valokaari uunissa rautasieni sulatetaan ja siihen lisätään vähän hiiltä, jotta siitä syntyy terästä. (Hämäläinen, M 2019.; DRI production 2021.)

Vetypelkistys tekniikan käyttö vaatii kuitenkin erittäin paljon sähköä. Sähköä vaatii vedyn valmistus ja pelkistysvaihe. Ollakseen järkevää täytyy tämän sähkön olla myös vihreää, kuten aiemmin on todettu. Masuuniteknikassa sähkön käyttö on myös vähempää sen vuoksi, että prosessissa syntyviä kaasuja käytetään esimerkiksi lämmön tuottoon, joka vähentää sähkönkäytön tarvetta.

### **3.2.5 Muita käyttö kohteita**

Kuten metaanin ja metanolin valmistuksessa, vihreän vedyn ja hiilidioksidin talteenoton avulla voidaan valmistaa muovia. Muovi koostuu polymeereistä. Polymeerit koostuvat pääosin hiilisestä ja vedystä eli polymeerejä voidaan valmistaa samalla tapaa kuin metaania. Muovit eivät kuitenkaan koostu pelkästään polymeereistä, vaan niihin liitetään valmistusprosessin aikana vahvistavia aineita muovin ominaisuuksien parantamiseksi. Muovin valmistuksessa vihreän vedyn hyödyntämisestä puhutaan nimellä Power to plastics. Tämä menetelmä mahdollista muovin valmistuksen muuntumisen hiilidioksidin tuottajasta hiilinieluksi. (Polymeerit n.d; Muovit päästölähteestä hiilinieluksi 2020.)

Vetyä voidaan käyttää proteiinin valmistukseen. Suomalaisessa tutkimuksessa on tarkasteltu, kuinka voidaan valmistaa proteiinia vedyn, hapen ja hiilidioksidin avulla. Tutkimuksen toteuttajana on Lappeenrannan yliopisto LUT. Tutkimuksen käyttämän laitteiston on tuottanut VTT. Tässä tutkimuksessa hiilidioksidin talteenotto tapahtuu suoraan ilmasta. Vedyn tuotantoprosessissa tapahtuu elektrolyysillä ja prosessin käyttämä sähkö tuotetaan aurinkoenergialla. Happea saadaan elektrolyysi prosessin sivutuotteena. Edellä mainitut aineet johdetaan bioreaktoriin. Reaktoriin johdetaan vedyn, hapen ja hiilidioksidin lisäksi fosforia, kaliumia, kalsiumia ja typpeä. Nämä aineet mahdollistavat proteiinin kasvatuksen. Lopputuotteena reaktion jälkeen saadaan nestettä, joka koostuu mikrobimassasta. Nesteen kuivauksen ja sterilisoinnin jälkeen saadaan jauhoa, jolla on suuri proteiini pitoisuus. Tämä tekniikka mahdollistaa proteiinin tuotannon lähes missä vaan maapalolla ja voi olla ratkaisu nälänhätään. (Tanskanen, J 2019.)

Vetyperoksidin tuotanto on yksi vedyn käyttökohteista. Vetyperoksidia käytetään muun muassa paperiteollisuudessa paperin valkaisuun, desinfiointi- ja puhdistusaineena. Vetylaitoksen sijoittaminen paperiteollisuuden yhteyteen on potentiaalinen vaihtoehto, jos vetylaitoksen yhteydessä voitaisiin valmistaa vetyperoksidia paperiteollisuuden tarpeisiin. Vetyperoksidi on käytännössä kuin vettä ( $H_2O$ ), mutta sillä on yksi ylimääräinen vety atomi. Vetyperoksidin kemiallinen kaava on  $H_2O_2$ . Vetyperoksidin valmistus tapahtuu vedyn ja hapen reaktiossa katalyytin vaikutuksen alaisena. Kokonaisreaktio yhtälö on seuraava.  $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O_2$  (Clifton, J 2019.)

Kokonaisuudessaan vihreän vedyn käyttö mahdollistaa kaikkien kemianteollisuuden yhdisteiden valmistuksen hiilineutraalisti vedyn osalta. Vety on maailman yksinkertaisin alkuaine ja sitä on todella monessa yhdisteessä, jota kemianteollisuudessa valmistetaan ja mitä maailmassa esiintyy luonnostaan. Käyttökohteet ovat siis lähes loputtomat ja niitä tulee syntyä tulevaisuudessa varmasti lisää.

### 3.3 Sijainti

Kuten työssä on ilmennyt, vedyn käsittely ja kuljettaminen on haastavaa. Niinpä vedyn valmistuksen ja koko tuotantoketjun näkökulmasta maantieteellinen sijainti on suuressa asemassa sen toimivuuden osalta.

Vedyn valmistus tarvitsee paljon vihreää sähköä. Tämän vihreän sähkön oletetaan olevan peräisin suurimaksi osin tuulivoimasta. Kappaleessa 2.2.1 esitettiin Suomen tuulivoimapuistojen sijainnit. Suurin osa tuulipuistoista sijaitsee länsirannikolla. Vedyn tuotantolaitosten sijainti tulisi siis sijoittaa rannikko alueille, jossa vihreää sähköä on paljon tarjolla. Sähkön lisäksi toinen oleellinen osa on se, mihin vety saadaan varastoitua tai saadaanko se käyttöön mahdollisesti heti valmistuksen jälkeen.

Maakaasu verkkoa ylläpitävällä Gasgrid Finlandilla on meneillään kaksi vetyputki hanketta. Toinen hankkeista on Nordion Energin kanssa yhteistyössä toteutettava Nordic Hydrogen Route. Toinen hankkeista on Joutsenon ja Imatran välille rakennettava siirtoyhteys. Nordic Hydrogen Routen tavoitteena on vauhdittaa vetytalouden etenemistä. Tavoitteena on, että vuoteen 2030 mennessä

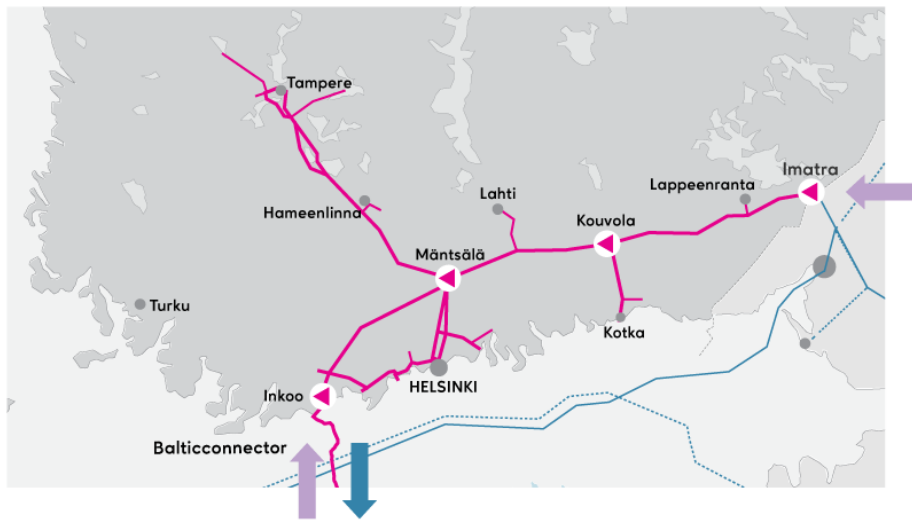
on avoin vetymarkkina Perämeren alueella. Tämä vetyputkisto tulee olemaan oleellinen määräävä tekijä, kun mietitään minne vedyntuotanto kannattaa sijoittaa. Putkisto mahdollistaa vedyn varastoinnin ja sen helpon jakelun käyttöpaikoille. Vetyputkisto kulkee länsirannikolla, jossa tuulivoimaa on saatavilla vedyn valmistusta varten. Vetyputkisto kulkee myös suurten terästehtaiden kautta, jossa vedylle on suurta kysyntää. Rannikkoalueilla vetyputkiston sijainti mahdollistaa myös raskaan rahtiliikenteen tankkausasemien pystyttämisen. (Nordic Hydrogen Route 2023.) Nordic hydrogen route on kuvattuna kartalla alla olevassa kuviossa 10.



Kuvio 10. Nordic hydrogen route (Media. n.d.)

Kolmas oleellinen asia vedyn tuotantopaikan valinnassa on elektrolyysissä syntyvän hukkalämmön talteenoton mahdollistaminen. Kuten kappaleessa 3.1 vedyn valmistus todettiin elektrolyysi prosessissa syntyvän hukkalämmön talteen ottaminen parantaa elektrolyysi prosessin hyötysuhdetta suuresti. Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon on toimiva ratkaisu. Elektrolyysilaitosten tulisi siis sijaita siten, että sen lähialueella olisi kaukolämpöverkko, jotta hukkalämpö saadaan talteen. Kaukolämpöverkkoja sijaitsee hydrogen routella aina kaupunkien kohdalla, kuten Luleåssa. Luleå oli kappaleessa 3.1 käsitellyn tutkimuksen kohde kaupunkina.





Kuvio 11. Suomen kaasun siirtoverkosto (Kaasun siirtoverkosto n.d.)

Suomen kaasuverkko sijoittuu Etelä-Suomeen. Suomen kaasuverkossa on kaksi yhteyttä ulkomaille Venäjälle ja Viroon. Kaasuverkostossa suurin osa kaasusta on maakaasua, mutta verkossa voidaan myös jaella biokaasua. Biokaasulaitoksia, jotka on kytketty verkkoon, löytyy Espoosta, Kouvola, Lahdesta ja Riihimäeltä. (Kaasun siirtoverkosto n.d.) Jos vetyä käytetään metaanin tuotantoon, tulisi vedyn tuotantolaitos ja jatkojalostus metaaniksi sijoittua kuviossa 11 esitetyn kaasuverkon yhteyteen, jotta vety saataisiin suoraan käyttöön tai varastoitua. Kaasuverkon yhteydessä sijaitsee myös monia kaupunkeja, jossa on kaukolämpöverkko. Kaukolämpöverkot mahdollistavat vedyn valmistuksessa syntyvän hukkalämmön hyödyntämisen.

### 3.4 Esimerkkejä Suomen vety hankkeista

Suomessa on meneillään monia vihreän vedyn hankkeita. Tässä luvussa tarkastellaan Suomen vety hankkeita ja tarkastellaan kuinka ne toimivat. Tarkastellaan myös Suomen vety hankkeiden toteutustapaa työssä saatuihin tuloksiin verrattuna.

Etelä-Savon Energia Oy ja Nordic Ren-Gas Oy aikovat toteuttaa Mikkeliin metaanin tuotanto laitoksen raskaanliikenteen polttoaineen tuotantoa varten. Tuotantolaitos on tarkoitus sijoittaa Pursialan teollisuusalueelle, jossa sijaitsee myös Pursialan voimalaitos. Hankkeessa on tarkoituksena ottaa talteen voimalaitokselta syntyvää hiilidioksidia. Tämä mahdollistaa hiilidioksidivapaan kaukolämmön tuotannon Mikkelin kaukolämpöverkkoon. Samaan yhteyteen rakennetaan laitos, joka tuottaa vihreää vetyä ja metaania. Sähköteholtaan laitos on yli 50 MW kokoluokkaa. Laitoksen tuottamaa hukkalämpöä tullaan hyödyntämään kaukolämpö verkkoon, jolla saadaan vähennettyä polttavalla tekniikalla tuotetun kaukolämmön määrää. Laitoksen käyttämä sähkö on tarkoitus tuottaa tuulivoimalla. (Kujala, S & Karppanen, E 2023.)

Kokkolassa on käynnissä laitoksen valmistusprojekti nimeltään Flexens Kokkola. Projektissa mukana ovat Flexens Oy Ab, KIP Infra Oy ja Kokkolan kaupunki. Projektin tavoitteena on rakennuttaa 300 MW laitos, joka tuottaa vihreää vetyä ja vihreää ammoniakkia. Laitos tulee käyttämään aurinko- ja tuulivoimaa vedyn tuotantoon elektrolyysiprosessin avulla. Kokkola sijaitsee Suomen länssiosassa, jossa tuulivoimakapasiteettia on paljon tarjolla. Laitoksen tuottama hukkalämpö on tarkoitus käyttää kaukolämpöverkossa. Laitos sijaitsee myös Nordic Hydrogen routen alueella eli vetyä on mahdollista saada varastoitua vety verkostoon suoraan laitokselta ja jaeltavaksi eteenpäin muille vedyn kuluttajille. Laitoksella vedystä tuotetaan myös ammoniakkia, jota tullaan käyttämään lannoiteteollisuudessa ja meriliikenteen polttoaineena. Kokkola on molempien ammoniakin käyttöpaikkojen osalta hyvällä sijainnilla. Vedyn ja ammoniakin tuotannon on tarkoitus alkaa vuonna 2027. (Flexens Kokkola 2023; Kokkolan alueen vetykehitys kiihtyy – Gasgrid ja Flexens käynnistävät selvityksen vetyverkon kehittämisestä Kokkolassa ja kutsuvat alueen toimijat selvitystyöhön mukaan 2022.)

Suomen ensimmäinen teollisen mittakaavan vetylaitos on rakenteilla Satakunnan Harjavaltaan P2X Solutionin toimesta. Laitos tuottaa vihreää vetyä ja osa vedystä jatkojalostetaan metaaniksi. Vedyn

tuotantoprosessina käytössä on elektrolyysi. Elektrolyysi laitteiston koko tulee Harjavallassa olemaan 20 MW. Elektrolyysi tulee käyttämään uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä. Metaanin valmistukseen hiilidioksidi saadaan laitokselta talteen ottamalla. P2X solutions haluaa myös keskittyä vedyn tankkausasemien rakennuttamiseen. Harjavallan laitoksen yhteyteen rakennetaan vedyn tankkausasema sekä Järvenpäähän. Järvenpään tankkausasema on ideaalinen sijainti Etelä-Suomen vilkkaalle raskaalle liikenteelle. P2X:n tarkoituksena on rakennuttaa tankkausasemia myös eripaineluokkaisina, jotta tankkaus onnistuu ajoneuvotyyppistä riippumatta. (Yrittäminen ja työ 2023; Hankkeemme n.d.)

Suomessa on YLE:n mukaan käynnissä yhteensä 23 vetytalous projektia ja näihin projekteihin arvioidaan kuluvan 10 miljardia euroa. Suurin osa projekteista tulee tuottamaan vetyä, jota jatkojalostetaan eriaineiksi, kuten metaaniksi tai ammoniakiksi. (Mäntylä, J 2023.)

## 4 Yhteenveto ja johtopäätöset tuloksista

Vetytalouden kehittyminen tulee olemaan erittäin suuri tekijä hiilineutraalisuuden osalta. Vetyteknologiaa hyödyntäen voidaan hiilidioksidipäästöjä tulla leikkaamaan suuresti. Vedyn valmistus menetelmistä elektrolyysi tulee olemaan vallitsevassa asemassa, joka huomataan jo Suomessa käynnissä olevista vety hankkeista. Elektrolyysiprosessin kannattavuus piilee juuri siinä, että sen avulla tuotettu vety ei tuota hiilidioksidipäästöjä ja prosessin raaka-aineena on vesi, jota on saatavilla helposti ja paljon. Elektrolyysiprosessilla tuotetun vedyn täytyy kuitenkin käyttää vihreää sähköä, jota Suomessa ja muissa Pohjoismaissa on saatavilla paljon. Vihreää sähköä saadaan tuotettua vesi-, aurinko, bio- ja tuulivoimalla. Kaikkien vetyhankkeiden toteutumiseksi tarvitaan kuitenkin paljon lisää vihreää sähköä. Vihreän sähkön määrää aiotaan nostaa aurinko- ja tuulivoimaa lisäämällä, koska vesivoima kapasiteetti on käytetty lähes kokonaan ja biopolttoaineiden käyttö rajoitetaan koko ajan sähkön tuotannossa. Lisäksi aurinko- ja tuulivoiman kapasiteetin nostaminen on helppoa.

Aurinko- ja tuulivoiman lisääminen aiheuttaa sähköntuotannon horjumista sääolosuhteiden mukaan. Vedyn käyttäminen energiavarastona voi tasapainottaa sääolosuhteiden vaikutusta sähköntuotantoon. Kun aurinko paistaa voimakkaasti ja tuulee kovasti, sähkön tuotanto on erittäin

suurta. Kun taas ei tuule ja aurinko ei pasta sähkön tuotanto rajoittuu. Tuuli- ja aurinkovoiman ollessa suurta voitaisiin vetyä tuottaa energianvarastointia varten. Sähkön tarpeen iskiessä voitaisiin vetyä muuntaa sähköksi polttokennojen avulla.

Tutkimuksen aikana osoittautui, että vedyn suurimmat käyttökohteet tulevat olemaan kemianteollisuus, jossa siitä voidaan jatkojalostaa eri yhdisteitä. Näitä yhdisteitä ovat muun muassa metaani ja ammoniakki. Metaania ja ammoniakkia voidaan käyttää polttoaineina, joka parantaa liikenteen hiilidioksidipäästöjen vähennystä. Suuri käyttökohde vedylle on myös terästeollisuus. Täysin vihreän teräksen valmistaminen vedyn avulla leikkaa todella suuren osan Suomen hiilidioksidipäästöistä. Työn tuloksia vedyn käyttöpaikoista vahvistavat Suomessa meneillään olevat vetyhankkeet, jotka lähes kaikki keskittyvät metaanin, metanolin ja ammoniakin valmistukseen polttoaineiksi tai kemianteollisuuden tarpeisiin. Terästeollisuus on toinen suuri sektori Suomessa, johon vetyä tullessaan hyödyntämään.

Vedyn ominaisuuksien takia varastointi ja kuljettaminen on haasteellista. Niinpä vetyhankkeiden osalta vedyn elinkaaren tutkinnassa täytyy olla tarkkana. Vedyn tuotanto tulee sijoittaa alueille, jossa on saatavilla paljon vihreää sähköä. Vihreää sähköä Suomessa on saatavilla paljon rannikkoalueille, jossa tuulivoiman tuotanto on suurimmillaan. Vedyn elinkaareen tarkastelussa toinen oleellinen asia on tarkastella mihin käyttöön vety tulee. Vaikean varastoinnin ja kuljettamisen kannalta vedyntuotantolaitokset tulisi sijoittaa sen käyttökohteen yhteyteen. Terästeollisuuteen käytetyn vedyn tuotantolaitos tulisi sijoittaa terästehtaan yhteyteen tai vety täytyy syöttää vetyverkkostoon, jos se tuotetaan muualla kuin teräslaitoksen yhteydessä. Nordic hydrogen route mahdollistaisi vedyn jakelun kuluttajille, eikä tuotantolaitoksen tarvitsi olla yhteydessä loppukäyttöpaikkaan. Jos vedystä tuotetaan polttoaineita kuten metaania, tulee tuotantolaitoksen olla yhteydessä maakaasu verkkoon, jotta tuotettu metaani saadaan varastoitua ja jaeltua kuluttajille.

Vedyn jatkojalostus vaatii monesti hiilidioksidia. Jos vedyn käyttökohteeksi on kaavailtu jatkojalostusta, joka vaatii hiilidioksidia, tulee tuotantolaitos sijoittaa siten, että läheltä on myös mahdollista saada otettua talteen hiilidioksidia jatkojalostusta varten. Potentiaalisimpina kohteina ovat voimalaitokset, jotka käyttävät biopolttoaineita kaukolämmön tuotantoon. Voimalaitokset ovat potentiaalisimpia kohteita, koska niillä on suora yhteys kaukolämpöverkkoon ja prosessista on mahdollista ottaa talteen syntyvää hiilidioksidia. Elektrolyysiprosessissa syntyvää hukkalämpöä voidaan

hyödyntää kaukolämpöverkon lämmitykseen, joka parantaa prosessin hyötysuhdetta suuresti. Kaukolämpöverkkoja pidetään parhaana hukkalämmön hyödyntämiseen käytettävä kohteena, mutta hukkalämmölle löytyy varmasti muitakin käyttökohteita tulevaisuudessa, etenkin teollisuus- aluille sijoittuviin laitoksiin.

## 5 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella prosesseja, joissa vetyä voidaan käyttää ja vedyn tuotantolaitosten parasta maantieteellistä sijaintia. Opinnäytetyön tutkimus kysymyksinä olivat ”miten, milloin ja missä vedyn tuotanto on kannattavinta?” ”Mitkä teollisuuden prosessit voivat hyödyntää vetyä sen prosesseissa?” ”Mikä tekee vedystä tulevaisuuden raaka-aineen?”. Työssä tutkimus keskittyi vihreään vetyyn, koska se on tulevaisuuden vedyn käytön osalta oleellisinta sen takia, että vihreällä vedyllä on suuri mahdollisuus vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tutkimus keskittyi Suomeen.

Työlle asetettuihin tavoitteisiin päästiin. Työn tuloksena saatiin kirjallisuuskatsaus koko vedyn tuotantoketjusta aina vety atomista siihen mitä vihreän vedyn tuotanto vaatii, miten vihreää vetyä voidaan tuottaa, mihin prosesseihin vetyä voidaan käyttää, kuinka vihreän vedyn tuotanto vaikuttaa näihin prosesseihin ja minne vedyn tuotanto ja käyttö kannattaa sijoittaa maantieteellisesti.

Työn aiheesta löytyy paljon tietoa sen ajankohtaisuuden takia, mutta tulevaisuudessa vedyn käytölle ja sen tavoitteille tulee todennäköisesti esiintymään haasteita, joita ei ole vielä todettu. Mahdollisia haasteita ja rajoittavia tekijöitä tulevat olemaan laitteistojen raaka-aineiden saanti, Vihreän sähkön tuotantokapasiteetti ja vihreällä vedyllä tuotettujen tuotteiden hinta. Työn tulosten ja vetytalouden todellinen kannattavuus tulee selviämään vasta kun useampia vetyhankkeita on saatu tuotantoon asti ja kun teoreettinen toimivuus voidaan todeta onnistuneeksi. Tiedon hankinnan osalta työssä onnistuttiin hyvin. Työhön käytettiin ajankohtaisia ja tuoreita lähteitä sekä niiden luotettavuuteen paneuduttiin syvästi ja tieto todettiin relevantiksi. Lähteitä tarkasteltiin myös siten, että työ pysyi puolueettoman ja vedyn potentiaalille osoitettiin myös vastakkainasettelua sen haasteiden osalta. Myös tiedonhankinnassa täytyi olla tarkkana, koska vedystä on puhuttu viime aikoina paljon ja sitä käytetään klikkiotsikkona monissa lähteissä, eikä tieto välttämättä ole oikeaa. Työssä käytettiin alkuperäislähteitä aina kun se oli mahdollista luotettavan tiedon saamiseksi. Tässä työssä ei käsitelty luottamuksellista tai salaista tietoa.

Toimeksiantajalle työn tuloksia voidaan hyödyntää opetusmateriaalina opintojaksoilla, jossa tullaan tarkastelemaan vetyteknologiaa, hiilidioksidipäästöjen vähennysmenetelmiä tai vety hankkeiden tutkimiseen. Toimeksiantaja teetti talvella 2021 vedystä opinnäytetyön niin kuin johdanto kappaleessa todettiin. Nyt toimeksiantajalla on laaja materiaali niin vedyn tuotantotekniikasta kuin sen käyttökohteista. Näille kahdelle työlle täydellinen jatkotutkimus olisi teettää opinnäytetyö vetytalouden haasteiden tarkastelusta. Työssä tulisi käsitellä, miten vihreää sähköä saadaan tuotettua tarpeeksi, jotta tulevaisuuden vety hankkeet voivat toteutua, mitä haasteita laitteistojen raaka-aineiden hankintaa tulee esimerkiksi tuulivoima kapasiteetin saavuttaminen ja elektrolyysilaitteistojen saatavuus sekä miten vety taloudesta saadaan kustannus tehokasta. Jos tällainen työ toteutettaisiin, olisi toimeksiantajalla todella laaja kuva vetytaloudesta kokonaisuudessaan.

## Lähteet

Ahola, J. 2022. Power-to-x. Artikkel LUTin yliopiston sivuilta. Viitattu 28.3.2023.

<https://www.lut.fi/en/articles/power-x-p2x-what-does-it-mean-energy-and-food-production>

Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. 2020. Artikkel vihreästä ammoniakista.

Viitattu 2.5.2023. <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/green-ammonia/>

Aurinkoenergia. n.d. Artikkel Energiamaailman verkkosivuilta. Viitattu 20.2.2023. <https://energia-maailma.fi/energiasta/energiantuotanto/aurinkovoima/>

Aurinkovoima. n.d. Julkaisu Vattenfallin verkkosivuilta. viitattu 20.2.2023 <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/Aurinkosähkötöknologiat>. N.d.

Aurinkosähkötöknologiat. 2022. Artikkel Motivan verkkosivuilta. Viitattu 20.2.2023

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat)

Biopolttoaineiden lämpöarvoja. 2021. Taulukko arvoja motivan nettisivuilta. Viitattu 1.3.2023

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden\\_lampoarvoja](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja)

Bio- ja maakaasu. n.d. Autoalan tiedotuskeskus. Viitattu 12.5.2023. [https://www.aut.fi/tielii-kenne/polttoaineet\\_ja\\_kayttovoimat/bio-ja\\_maakaasu](https://www.aut.fi/tielii-kenne/polttoaineet_ja_kayttovoimat/bio-ja_maakaasu)

Biswas, S., Kulkarni, A., Giddey, S., Bhattacharya, S. 2020. A Review on Synthesis of Methane as a Pathway for Renewable Energy Storage With a Focus on Solid Oxide Electrolytic Cell-Based Processes. Viitattu 18.5.2023. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.570112/full>

Cheema, I. 2019. Model-Based Analysis and Optimisation of Haber-Bosch Process Designs for Power-to-Ammonia. 6-12. Cuvillier Verlag. Viitattu 2.5.2023. <https://janet.finna.fi/>. ProQuest Ebook Central.

Clifton, J. 2019. Blogi vetyperoksidin valmistuksesta. Viitattu 19.5.2023. <https://www.chemicals.co.uk/blog/how-hydrogen-peroxide-made>

Clark, J. 2015. IRON AND STEEL. Viitattu 19.4.2023. <https://www.chemguide.co.uk/inorganic/extension/iron.html>

Dicks, I & Rand, D. 2018. Fuel cell systems explained. 8-9. John Wiley & Sons. Viitattu 8.5.2023. <https://janet.finna.fi/Record/jamk.993677044606251?sid=2959616823>. Knovel.

DRI production. 2021. Tietoa raudan pelkistys prosessista international Iron metallics associationin (iima) nettisivuilta. Viitattu 19.4.2023. <https://www.metallics.org/dri-production.html>

Elektrolyysi. N.d. Opetusmateriaalia elektrolyysistä. Viitattu 9.4.2023. <http://www.netti-nuotta.com/opetus/9Ke/elektrolyysi.html>

Flexens Kokkola. 2023. Artikkelit projektista Flexensin sivuilta. Viitattu 20.5.2023. <https://flexens.com/project-portfolio/>

Hankkeemme. n.d. Artikkelit P2X solutionsin sivuilta vety hankkeesta. Viitattu 20.5.2023. <https://p2x.fi/hanke/>

Hiilet ja koksit. N.d. Tieto kivihiilestä ja koksista Suomen Kottorian verkkosivuilta. Viitattu 19.4.2023. <https://kottoria.com/hiilet/>

Hiili terästeollisuudessa. N.d. Tietoa hiilen käytöstä terästeollisuudessa Hiilitiedon nettisivuilta. Viitattu 19.4.2023. <https://hiilitieto.fi/hiilitietoa/perustietoa-hiilesta/hiili-terasteollisuudessa/>



Hydrogen – H. N.d. Tietoa vedystä Lenntech nettisivustolta. Viitattu 17.2.2023.

<https://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>

Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. 2023. Tutkimuseettinen neuvottelukunta, TENK. HTK-ohje. Viitattu 21.5.2023. [https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje\\_2023.pdf](https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje_2023.pdf)

Hämäläinen, M. 2019. Artikkelit tekniikanmaailman sivuilta. Viitattu 27.4.2023. <https://tekniikanmaailma.fi/lehti/10b-2019/hiilen-ja-teraksen-liitto-murtuu-vety-leikkaa-paastot-terastehtaissa/>

Jonsson, F & Miljanovic, A. 2022. UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM HYDROGEN PRODUCTION. Yliopiston tutkimus. Viitattu 9.4.2023. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1670187/FULLTEXT01.pdf>

Kaasun siirtoverkosto. N.d. Tietoa kaasuverkosto Gasgrid Finlandin nettisivuilta. Viitattu 30.3.2023. <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/>

Kaukolämpölaitteet. n.d. Tietoa kaukolämpö verkosta Helenin nettisivuilta. Viitattu 7.5.2023. <https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/nykyisille-asiakkaille/kaukolampolaitteet>

Kokkolan alueen vetykehitys kiihtyy – Gasgrid ja Flexens käynnistävät selvityksen vetyverkon kehittämisestä Kokkolassa ja kutsuvat alueen toimijat selvitystyöhön mukaan. 2022. Tiedote gasgridin sivuilta. Viitattu 20.5.2023. <https://gasgrid.fi/2022/11/15/kokkolan-alueen-vetykehitys-kiihtyy-gasgrid-ja-flexens-kaynnistavat-selvityksen-vetyverkon-kehittamisesta-kokkolassa-ja-kutsuvat-alueen-toimijat-selvitystyohon-mukaan/>

Kostama, J n.d. Combined heat and power generation. Artikkelit energia.fi sivuilta. Viitattu 30.3.2023. [https://energia.fi/en/energy\\_sector\\_in\\_finland/energy\\_production/combined\\_heat\\_and\\_power\\_generation](https://energia.fi/en/energy_sector_in_finland/energy_production/combined_heat_and_power_generation)

Kostiainen, J. 2022. Vetytalous. Artikkelin vetytaloudesta ja sen tulevaisuudesta. Viitattu 24.4.2023. <https://corporate.nordea.com/article/80926/vetytalous>

Kujala, S & Karppanen, E. 2023. Artikkelin Ren-Gas Oy sivuilta. Viitattu 20.5. <https://ren-gas.com/ajankohtaista/mikkelin-power-to-gas-hanke-etenee-nordic-ren-gas-ja-etela-savon-energia-allekirjoittivat-hankekehityssopimuksen/>

Kunnela, A. 2022. Opinnäytetyön ohjaajan käsikirja. Käsikirja Jyväskylän ammattikorkeakoulun sivustolla. Viitattu 14.5.2023. <https://oppimateriaalit.jamk.fi/yamk-kasikirja/kirjallisuuskatsaukset/>

Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J., Hurskainen, J., 2020. National hydrogen roadmap for Finland. Business Finlandin teettämä tutkimus vedystä. Viitattu 24.3.2023 [https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf\\_national\\_hydrogen\\_roadmap\\_2020.pdf](https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf)

Matikainen, S. 2021. Vedyn käyttö energijärjestelmissä. Opinnäytetyö, AMK. JAMK, energia- ja ympäristötekniikka. Viitattu 3.4.2023. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/511790/Opinnaytetyo\\_Matikainen\\_Simo.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/511790/Opinnaytetyo_Matikainen_Simo.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Media. n.d. Kuvia nordic hydrogen routesta heidän nettisivuilta. Viitattu. 7.5.2023. <https://nordichydrogenroute.com/media/>

Metanoli. 2023. Tietoa metanolista Chemwatchin sivuilta. Viitattu 12.5.2023. <https://chemwatch.net/fi/resource-center/methanol/>

Miten biokaasua tuotetaan? N.d. Artikkelin Gasumin verkkosivuilta. Viitattu 30.3.2023. <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/miten-biokaasua-tuotetaan/>

Mitä hiilineutraalisuus tarkoittaa?. 2022. Artikkelin Euroopan parlamentin sivuilta. Viitattu 21.3.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalisuus-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa>

Muovit päästölähteestä hiilinieluksi. n.d. Artikkelin muoviin valmistuksesta hiilineutraalisti muovi yhdistyksen sivuilta. Viitattu 19.5.2023. <https://www.muoviyhdistys.fi/2020/09/07/muovit-paastolahteesta-hiilinieluksi/>

Mäntylä, J. 2023. YLE:n uutinen Suomen vety hankkeista. Viitattu 20.5.2023. <https://yle.fi/a/74-20014>

Nordic Hydrogen Route. 2023. Tietoa hankkeesta Gasgrid Finlandin sivuilta. Viitattu 7.5.2023. <https://gasgrid.fi/hankkeet/nordic-hydrogen-route/>

Polttokennoauto. 2022. Tietoa polttokennoautosta Motivan nettisivuilta. Viitattu 8.5.2023. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/autotyyppi/polttokennoauto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/autotyyppi/polttokennoauto)

Polymeerit. n.d. Tietoa polymeereistä muovien kierrätys sivustolta. Viitattu 19.5.2023. <https://muovienkierratys.wordpress.com/polymeerit/>

Pääkkönen, A. 2020. Artikkelin Fin dhc:n sivuilta. Viitattu 18.5.2023. <https://findhc.fi/miten-hiilidioksidin-talteenotto-saadaan-osaksi-kiertotaloutta/>

Pöntinen, P. 2022. Energiakriisi. Artikkelin tieteen kuvalehdestä. Viitattu 28.2.2023. [Maailman kevyin aine on täynnä energiaa, mutta hankala käsitellä – Vihreästä vedystä povataan energiajärjestelmän samppanjaa - Suomenkuvalehti.fi](https://www.suomenkuvalehti.fi/maailman-kevyin-aine-on-taynnä-energiaa-mutta-hankala-käsitellä-vihreästä-vedystä-povataan-energiajärjestelmän-samppanjaa)

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. Valtionneuvoston selvitys vedyn käytöstä Suomessa. Viitattu 27.3.2023 [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS\\_2022\\_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut. 2021. Viitattu 25.4.2023. [https://tilastokeskus.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-06-03\\_tie\\_001\\_fi.html](https://tilastokeskus.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-06-03_tie_001_fi.html)

Soininen, P. 2020. Mitä on vihreä sähkö? Artikkelit turkuenergian sivuilta. Viitattu 13.2.2023.

<https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/sahko/mita-on-vihrea-sahko/>

Tanskanen, J. 2019. Uutinen ylen sivuilta Lappeenrannan yliopiston tutkimuksesta. Viitattu

19.5.2023. <https://yle.fi/a/3-10833123>

Tilastokeskuksen maksuttomat tilastotietokannat. 2021. Taulukko vihreän sähkön tuotannosta suomessa vuonna 2021. Viitattu 25.2.2023. [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_salatuo/statfin\\_salatuo\\_pxt\\_12b4.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_salatuo/statfin_salatuo_pxt_12b4.px/table/tableViewLayout1/)

Tuulivoimatekniikka. N.d. Tietoa tuulivoimsta Suomen tuulivoima yhdistyksen sivuilta. Viitattu 18.2.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimatekniikka-2>

Tuulivoimateknologia. 2023. Tietoa tuulivoimasta Motivan nettisivuilta. Viitattu 13.3.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/tuulivoima/tuulivoima\\_suomessa/tuulivoimateknologia](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia)

Tuulivoima Suomessa. N.d. Reealiaikainen kartta Suomessa tuotannossa olevista tuulivoimaloista.

Viitattu 22.3.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/kartta>

Tripodi, A., Conte, F., Rossetti, I. 2020. Energy & Fuels. Artikkelit. Viitattu 18.5.2023.

<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.energyfuels.0c00580>

Vartiainen, E. 2020. Vetytalous tulee- ennemmin tai myöhemmin. Artikkelit Fortumin nettisivuilta.

Viitattu 14.3.2023. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Vartiainen, E. 2020. Tulevaisuuden energiajärjestelmässä varastointi on avainasemassa. Julkaisu

Fortumin nettisivuilta. Viitattu 28.3.2023. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/tulevaisuuden-energiajarjestelmassa-varastointi-avainasemassa>

Vesivoima. n.d. Artikkelin Vattenfallin verkkosivuilta. Viitattu 25.2.2023 <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/vesivoima/>

Vety. 2020. Tietoa Vedystä Motivan nettisivuilta. Viitattu 20.2.2023 [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/valitse auto viisaasti/energialahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety)

What is Pyrolysis? 2021. Artikkelin U.S department of agriculturen sivuilta. Viitattu 3.4.2023. <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/wyndmoor-pa/eastern-regional-research-center/docs/biomass-pyrolysis-research-1/what-is-pyrolysis/>

What is Steam Methane Reforming. 2022. Uutiskirje Vedystä. Viitattu 24.3.2023. <https://www.hydrogennewsletter.com/what-is-steam-methane-reforming-smr/>

Yrittäminen ja työ. 2023. Uutinen Järvenpään kunnan sivuilta. Viitattu 20.5.2023. <https://www.jarvenpaa.fi/a/p2x-solutions-rakentaa-jarvenpaahan-helsingin-seudun-ensimmaisen-vedyn-tankkaus-aseman>