

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2022

Aleksi Saarinen

**POLTTOKENNOAJONEUVOT
JA NIIDEN VAATIMA
INFRASTRUKTUURI
SUOMESSA**

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2022 | 40 sivua

Saarinen, Aleks

POLTTOKENNOAJONEUVOT JA NIIDEN INFRASTRUKTUURI SUOMESSA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää polttokennolla toimivien ajoneuvojen tämänhetkistä tilannetta Suomessa. Tarkoituksena on myös selvittää, mitä vihreän vedyn tuotantolaitosten ja tankkausverkoston rakentaminen sekä ajoneuvojen käyttöönotto vaatii. Työssä selvitetään käyttöönoton vaiheita mm. toimenpiteiden sekä kustannusten osalta.

Alkuun työssä tarkastellaan polttokennoajoneuvojen tekniikkaa, polttokennon toimintaperiaatetta ja sen käyttämää polttoainetta. Polttoaineiden osalta keskitytään tässä työssä vetyyn. Vaikka vety ei ole ainoa mahdollinen polttoaine polttokennolle, se on ympäristöystävällisin, sekä myös yleisin ajoneuvo-käytössä. Vedystä selvitetään myös sen hiilineutraalia valmistusprosessia. Tämän lisäksi työssä vertaillaan vetyä muihin yleisimpiin polttoaineisiin.

Tiedonhaussa on käytetty pääosin internetiä ja e-kirjoja lähdemateriaalina. Materiaalia suoraan Suomesta ei paljoa aiheeseen liittyen ole julkaistu, sillä aihe on vielä sen verran tuore.

Polttokennoautojen tulevaisuus on vielä tällä hetkellä hieman epävarma. Täyssähköautojen markkinat ovat viime vuosina kasvaneet niin nopeasti, että ns. tavallinen kuluttaja ei välttämättä edes tiedä muista mahdollisista vaihtoehdoista.

Asiasanat:

Polttokenno, vety, elektrolyysi, P2X, CO2, ilmastonmuutos.

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Automotive and Transportation Engineering

2022 | 40 pages

Aleksi Saarinen

FUEL CELL VEHICLES AND THEIR INFRASTRUCTURE IN FINLAND

The purpose of this thesis is to find out what the current situation of fuel cell vehicles is in Finland. This thesis also investigates the requirements that are needed for refueling stations, vehicles, and facilities to operate.

In the beginning of this work, the focus is to explain what a fuel cell vehicle is, what are its operating principles and what it uses as an energy source. From the fuels that a fuel cell could use for its operation, only hydrogen is being looked up more closely in this work. Even though there are other fuels that could be used, hydrogen is the most nature-friendly fuel as well as currently the most used fuel in fuel cell vehicles. The ways hydrogen can be manufactured carbon free is also something this work focuses on.

This work uses mainly internet and e-books as its sources. Material regarding the topic has not been published that much yet in Finland.

The future of fuel cell vehicles is still uncertain at the moment. Rapid growth of electric car industry in the past few years has been so dominant that a "normal customer" has maybe not even heard about other options.

Keywords:

Fuel cell, hydrogen, electrolysis, P2X, CO₂, climate change.

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	5
1 Johdanto	6
2 Polttokennoauto ja sen tekniikka	7
2.1 Polttokennon toiminta	8
2.2 Vety reaktioaineena	10
2.3 Polttokennojärjestelmän muita osia	12
2.4 Polttokennoauton vahvuudet ja heikkoudet	12
3 Vedyn valmistus	16
3.1 Vihreä vety	17
3.2 Vety polttoaineena	20
3.3 Vedyn hinta	20
4 Raskas liikenne ja polttokennot	21
5 Tämänhetkinen tilanne Suomessa ja Euroopassa	23
5.1 Tilanne Suomessa	23
5.2 Tilanne EU:ssa	27
6 Mitä polttokennoajoneuvojen käyttöönotto vaatisi Suomessa?	30
7 Nykyiset ja tulevat polttokennoautot	32
8 Yhteenveto	33
Lähteet	35

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

P2X	Power-to-X (sähkön avulla tuotetut uudet energiamuodot)
PEMFC	Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (protoninvaihtopolttokenno, yksi polttokennotyypeistä)
EU	Euroopan Unioni
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedures (Henkilöautojen tyyppihyväksynnässä käytettävä pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen mittausmenettely Euroopassa)
RED II	Renewable Energy Directive, uusiutuvan energian edistämistä koskeva EU-direktiivi

1 Johdanto

Yhä useammat autovalmistajat ovat siirtyneet valmistamaan vähäpäästöisempiä autoja, ja monet näistä ovatkin jo lopettaneet polttomoottoreiden kehityksen. Syynä tälle on pääosin tiukentuva lainsäädäntö ilmaston lämpenemisestä johtuen. (Plumer & Tabuchi H. 2021.)

Uusi lainsäädäntö ja ilmastotavoitteet jättävät autovalmistajille melko vähän vaihtoehtoja, ja näin ollen niiden on ollut pakko muuttaa painopistettä yhä enemmän sähköistettyihin voimalinjoihin sekä tapoihin, joilla saataisiin nykyisistä polttomoottoreista vähäpäästöisempiä. Myös käyttökustannukset ovat suuri tekijä auton valinnassa, ja näin ollen fossiilisten polttoaineiden hintojen jatkuva kohoaminen saattaa vaikuttaa kuluttajan ostopäätökseen.

Täyssähköiset autot ovat nopeasti kasvava sektori nykypäivän autoteollisuudessa. Näillä akusta käyttövoimansa ottavilla autoilla on paljon hyviä puolia, mutta niissäkin on omat ongelmansa, eivätkä ne näin ollen sovi yhtä hyvin jokaiselle kuljettajalle. Näitä ominaisuuksia saattavat olla mm. pitkät latausajat, kylmä ilmasto sekä latauspisteiden määrät harvaan asutuilla alueilla. Suurin osa tällä hetkellä liikenteessä olevista autoista on edelleen bensiini- sekä dieselkäyttöisiä, ja autokantaa pyritäänkin uudistamaan esimerkiksi verotuksen avulla, joka suosii vähäpäästöisiä ajoneuvoja huomattavasti.

Polttokennoauto voisi olla vaihtoehto, jos täyssähköinen auto ei sovi esimerkiksi yllä mainittujen ominaisuuksien vuoksi. Aasian suunnalla yhä useammalta autonvalmistajalta löytyy mallistostaan tätä vielä suhteellisen harvinaista tekniikkaa. Näistä mainittakoon esimerkiksi Toyota Mirai sekä Hyundai Nexa.

Polttokennoautojen tuleminen suurille markkinoille on rajoittunut tankkausinfrastruktuurin puutteeseen, jonka rakentaminen vaatii huomattavan suuren panostuksen. Myös vihreän vedyn hintaa tulisi saada alemmaksi. Maat kuten Japani ovat uranuurtajia vetytalouden ja polttokennoautojen suhteen, ja näyttävät hyvää esimerkkiä muille maille, jotka ovat vedyn käyttöönotosta kiinnostuneita.

2 Polttokennoauto ja sen tekniikka

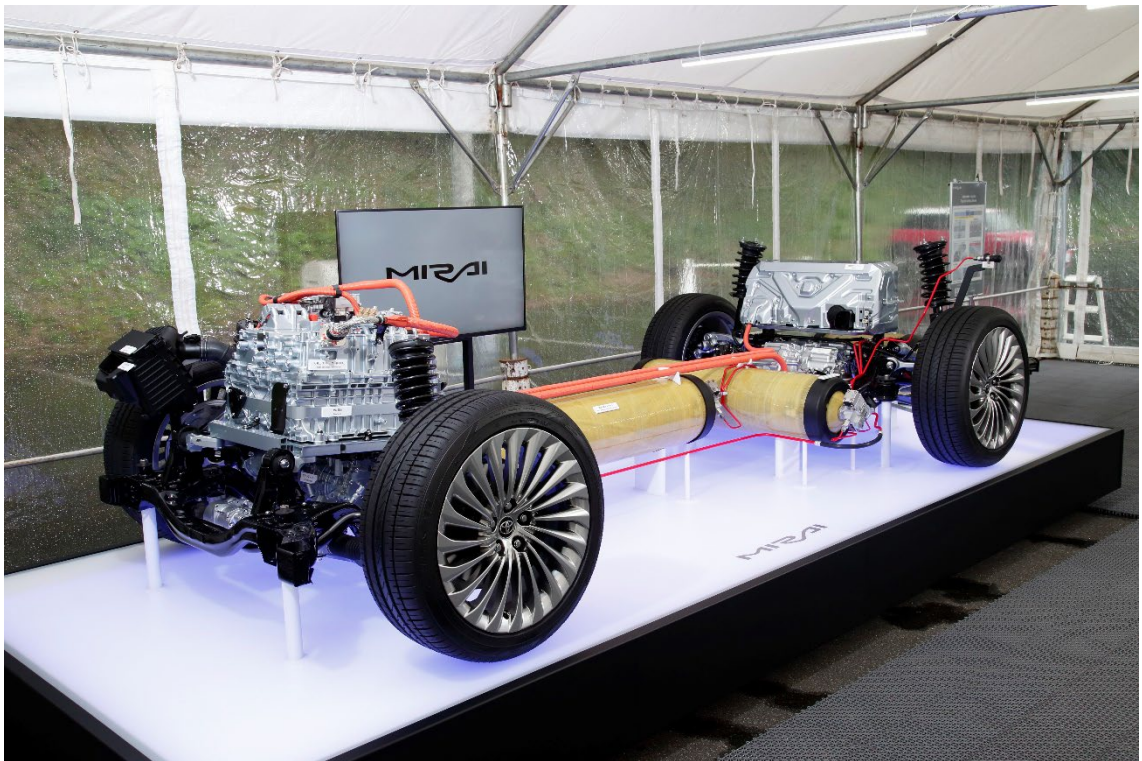
Polttokennotekniikka poikkeaa huomattavasti muista yleisimmistä ajoneuvojen voimanlähteistä (benssiini/diesel/sähkö). Täyssähköauton tavoin, polttokennolla toimivan auton pyöriä pyörittää sähkömoottori. Käyttövoimansa moottori saa kuitenkin eri lähteestä. Sähköautoissa energia varastoidaan akkuihin. Vaikka akku saadaan ladattua helposti suoraan pistorasiasta, tulee akkujen olla varsin suuria ja painavia, jotta niihin saadaan varastoitua tarpeeksi energiaa riittävän toimintamatkan saavuttamiseksi. Polttokennolla toimiva auto ei sähkömoottoristaan huolimatta vaadi suuria akkuja, sillä käytettävä energia saadaan käytettävästä reaktioaineesta, eli vedystä. Polttokennoa voikin ajatella pienenä tehtaana, joka tuottaa raaka-aineista sähköä. Paineistettu kaasumainen vety ohjataan säiliöstään polttokennolle, jossa elektrokemiallinen reaktio hapen sekä vedyn kohdatessa saa aikaan sähkövirtaa. Tästä reaktiosta muodostuu sähkövirran lisäksi ainoastaan lämpöä ja vettä. (Motiva 2020.)

Tässä työssä tutustutaan tarkemmin vain niin sanottuun protoninvaihtopolttokennoon (PEMFC, Proton-Exchange Membrane Fuel Cell), jota polttokennoajoneuvot käyttävät. Tämän tyyppin valikoitumiseksi ajoneuvo-käyttöön on vaikuttanut sen matala käyttölämpötila, jonka ansiosta kenno on nopeasti käyttövalmis. Se mahdollistaa myös kompaktimman koon kuin muut vaihtoehdot, sillä siinä on paras tehontuotto kennon pinta-alaan nähden muihin tyypeihin verrattuna. (O'Hayre ym. 2016, 352.)

Polttokennoautoissakin käytetään akkua, jonka avulla pystytään antamaan sähkömoottorille lisätehoa suuressa rasituksessa, sillä akku vastaa polttokennoa nopeammin kuormituksen vaihteluihin. Polttokennoauton akku on toki huomattavasti pienempi kuin täyssähköisessä autossa. Akun avulla saadaan myös kerättyä auton jarrutusenergiaa talteen, mikä parantaa voimalinjan hyötysuhdetta erityisesti kaupunkiajossa. Näin pystytään pienentämään sähkönkulutusta, ja pidentämään ajoneuvon toimintamatkaa. Tasanopeutta ajettaessa voima voidaan taas ottaa kokonaan polttokennolta.

Polttokennoautotkin ovat siis omanlaisiaan hybridejä, polttomoottorin tilalla käytetään vain polttokennoa. (Alternative Fuels Data Center 2022.)

Kuvassa 1 on kuvattu Toyota Mirain polttokennojärjestelmän rakenne.



Kuva 1. Toyota Mirain polttokennojärjestelmä (Toyota Europe Newsroom 2020)

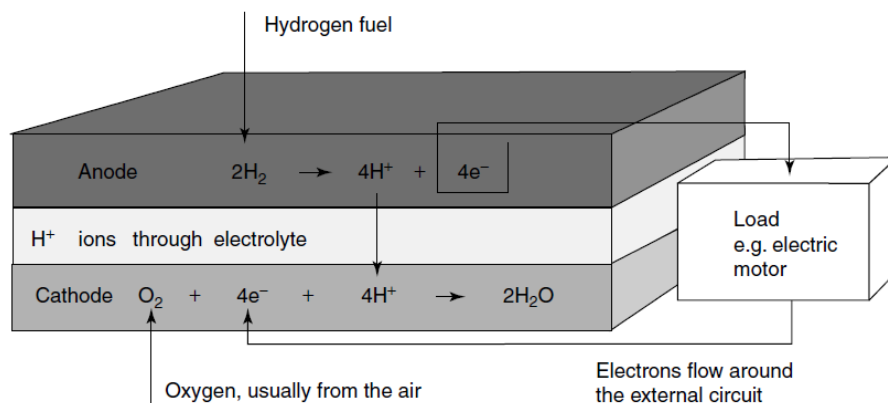
Kuvasta 1 nähdään polttokennovoimalinja, jossa auton etupäässä on itse polttokenno ja takapäässä sähkömoottori. Näin painojakauma saadaan hyvin tasapainotettua. Miraissa vetysäiliöt on sijoitettu T-muodostelmaan, jonka ansiosta tarvetta jalkatilan nostamiselle ei ole.

2.1 Polttokennon toiminta

Polttokennon toiminta perustuu reaktioaineen sähkökemialliseen reaktioon hapen kanssa, josta muodostuu sähköenergiaa. Yksittäinen polttokennosolu koostuu anodista ja katodista, hieman vastaavalla tavalla kuin akku. Akusta poiketen järjestelmä ei kuitenkaan ole suljettu, vaan reaktioainetta tuodaan

kennoon ulkopuolelta. Anodi (-) ja katodi (+) on erotettu toisistaan elektrolyytillä, joka estää reaktioaineen ja hapen suoran kontaktin. Ionit, toisin kuin elektronit, pystyvät kuitenkin läpäisemään elektrolyyttikerroksen. Polttoaine luovuttaa elektronin anodilla hapettuessaan, ja näin anodilta katodille voidaan vetää ulkoinen johdin, jota pitkin elektronit pystyvät kulkemaan katodille. Elektronit joutuvat tekemään työtä päästäkseen katodille, eli tälle johtimelle muodostuu sähkövirta, joka voidaan käyttää tarvittaviin sovelluksiin. Happi pelkistyy, kun polttoaineen luovuttamat elektronit saapuvat katodille. Lopputuotteena tästä hapetus-pelkistysreaktiosta syntyy ainoastaan sähköenergiaa, lämpöenergiaa sekä vettä (vetyä reaktioaineena käytettäessä). Kuviossa 1 on kuvattu polttokennon toiminnan peruseriaate. (Motiva 2020.)

Matalassa lämpötilassa toimivan polttokennon toiminnan nopeuttamiseksi käytetään anodissa ja katodissa usein katalyytteja. Katalyytit auttavat jakamaan vetyatomien protoneihin ja elektroneihin. Usein katalyyttinä käytetään pieniä määriä platinaa, joka nostaa valmistuskustannuksia jonkin veran. Uusissa tutkimuksissa on kuitenkin löydetty hyviä vaihtoehtoja platinan ohelle, joilla valmistuskustannuksia saataisiin laskettua. (Qin ym. 2021)

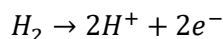


Kuvio 1. Polttokennon toiminta (Larminie & Dicks 2003.)

Alla on kuvattu polttokennossa tapahtuvat reaktiot.

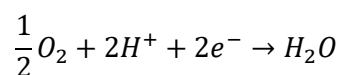
Hapetusreaktio:

Anodilla vetymolekyylä jakautuu kahdeksi positiivisesti varautuneeksi ioniksi, sekä kahdeksi negatiivisesti varautuneeksi elektroniksi. Ionit kulkevat elektrolyytin läpi katodille. Elektronit taas eivät pääse elektrolyyttikalvon läpi ja näin ollen ne johdetaan erillistä johdinta pitkin katodille.



Pelkistysreaktio:

Katodilla happiatomi vastaanottaa positiivisesti varautuneet ionit, sekä negatiivisesti varautuneet elektronit, jolloin vety ja happi muodostavat vettä. Elektronit joutuvat tekemään työtä kulkiessaan johtimen kautta, ja tämä sähkövirta voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi sähkömoottorin käyttämisessä.



(O'Hayre ym. 2016, 52.)

Yksittäinen polttokennosolu tuottaa alle 1 voltin jännitteitä (n. 0,7 V) ja näin ollen yksi polttokenno ajoneuvokäytössä sisältää satoja soluja sarjaan kytkettynä, jotta saavutetaan haluttu jännite tarvittavaan suorituskykyyn. Esimerkiksi Hyundai Nexon polttokennossa on soluja yhteensä jopa 440 kappaletta. (EnergieDienst 2020.)

2.2 Vety reaktioaineena

Polttokennon reaktioaineena käytetään erityisesti ajoneuvokäytössä pääosin vetyä. Vedyn reagointi on nopeaa polttokennossa. sekä sen reaktiossa muodostama ympäristöystävällinen lopputuote, vesi, ovat suurimmat syyt sen valikoitumisessa polttokennojen voimanlähteeksi. (Motiva 2020.)

Vedyllä on kaikista polttoaineista suurin energiamäärä suhteessa painoon, koska se on alkuaineista kevyin, eikä sillä ole painavia hiiliatomeja molekyylirakenteessaan, kuten esimerkiksi bensiinillä (joka on tämän vuoksi normaaleissa käyttölämpötiloissa nestemäistä). Tästä syystä vetyä tarvitaan massaltaan huomattavan vähän muihin polttoaineisiin verrattuna.

Huolimatta kuitenkin vedyn energiamäärästä sen painoon nähden, sen energiatiheys tilavuuteen nähden on varsin pieni. Tämä johtuu siitä, että vedyn molekyylirakenne ei ole kovin tiivis. Molekyylin "löysän" rakenteen huomaa esimerkiksi siinä, että kuutiometrissä vettä on 40 kilogrammaa enemmän vetyä kuin kuutiometrissä nestemäistä vetyä. Vedessä vetyatomit ovat kiinnittyneet happiatomiin paljon tiukemmin kuin ne vetymolekyylissä itsessään ovat. (Lanz 2001.)

Polttokennoajoneuvoissa vety säilytetään n. 700 barin paineessa vetysäiliöissä, jolloin vedyn energiatiheys saadaan nostettua huomattavasti korkeammaksi. Näin saadaan myös tankattua enemmän vetyä kerralla auton säiliöihin, jolloin yhdellä tankkauksella päästään pidempiä matkoja. Paineistamisen avulla vältetään myös ylimääräisten kompressorien tarve vedyn annostelussa polttokennolle. (Lanz 2001.)

Vetyä on mahdollista säilyttää myös nestemäisessä muodossa, jolloin sen energiatiheys kasvaa huomattavasti kaasumaiseen olomuotoon verrattuna. Näin on mahdollista myös kasvattaa ajoneuvojen toimintamatkaa. Nestemäinen vety tulee säilyttää hyvin kylmässä lämpötilassa, joka saattaa vaikeuttaa järjestelmien toteutusta. (Demaco 2022.)

Vety voi aiheuttaa syttymisriskin sen päästessä ilman kanssa tekemisiin, mutta sen pienen molekyylikoon ansiosta se nousee ja sekoittuu nopeasti ympäröivän ilman kanssa, jolloin tulipalon riski laskee nopeasti. Suurimmat riskit näin ollen tapahtuvat tiloissa, jotka ovat suljettuja ja ilmanvaihto on vähäistä. Kuitenkin esimerkiksi bensiinivuoto on huomattavasti riskialttiimpi bensiinin nestemäisen olomuodon vuoksi. Bensiini voi nopeasti levitä laajalle pinta-alalle, ja aiheuttaa näin suuren tulipalon riskin. Joka tapauksessa vetyä polttoaineena käyttävät

polttokennoautot tulee varustaa asiaankuuluvilla vuodonilmais- ja tuuletinlaitteilla, mahdollisen vuodon varalta. (Lanz 2001.)

2.3 Polttokennojärjestelmän muita osia

Polttokennot yksinkertaisimmassa muodossaan koostuvat edellä mainituista komponenteista. Ajoneuvokäytössä polttokennojärjestelmä vaatii näiden lisäksi paljon muita osia, jotta se saadaan toimimaan optimaalisesti.

Näitä komponentteja polttokennojärjestelmässä ovat:

- Sähkökäyttöinen kompressori, jonka avulla saadaan tarvittava määrä ilmaa, ja näin ollen polttokennon tarvitsemaa happea katodipuolelle
- Anodipuolelle vedyn annostelua varten suutin, jolla kaasua pystytään annostelemaan kennolle oikea määrä tarpeen mukaan
- Optimaalista toimintaa varten puhallin, jolla varmistetaan kaasun kierto koko anodin pinta-alalle
- Keskusyksikkö, joka ohjaa järjestelmän toimintaa
- Ilmankostutin, joka estää elektrolyyttikalvon kuivumista. Ilman tätä protonien liike hidastuu ja estää hapen pelkistymistä katodilla
- Useita antureita, joilla mitataan ilmamassoja sekä paineita
- Polttokennon eristys/ohjainventtiili

(Bosch 2020a.)

2.4 Polttokennoauton vahvuudet ja heikkoudet

Polttokennotekniikalla saavutetaan monia etuja muihin tekniikoihin verrattuna. Suurin polttokennotekniikalla saavutettava etu täyssähköiseen autoon verrattuna on tankkaukseen vaadittava aika. Vety tankataan kaasumaisessa muodossa autoon noin 700 barin paineessa, ja koko säiliön täyttö vastaa ajaltaan bensiiniauton tankkausta. Täyssähköauton lataus, joka viime vuosina

on myös nopeutunut huomattavasti, vaatii edelleen huomattavasti pidemmän ajan täyden latauksen saavuttamiseksi. (Wired 2021.)

Esimerkiksi Hyundai Nexon tankki saadaan täyteen viidessä minuutissa ja sillä saavutetaan 666 kilometrin WLTP-testattu toimintamatka. (Hyundai 2022.)

Tankkausnopeuden lisäksi toimintasädetä pystytään kasvattamaan tiettyyn rajaan asti helposti vetysäiliön kapasiteettia kasvattamalla. Vety itsessään on hyvin kevyttä ja henkilöautojen kokoluokassa täysi säiliöllinen painaa yleensä noin viisi kiloa. Polttokennotekniikasta pystytään tekemään täyssähköistä voimalinjaa kevyempi, sillä tekniikka itsessään on kevyempi, vaikka sekä paineistetun että nesteytetyn vedyn säiliökuoret ovat selvästi nestemäisen polttoaineen tankkeja painavampia. (Demaco 2020.)

Täyssähköautojen akkujen paino on ainakin vielä toistaiseksi ongelma, sillä litiumioniakun energiatiheys on todella pieni verrattuna esimerkiksi bensiiniin, joten akusta tulee väkisin suuri ja painava. Tilanne korostuu raskaassa kuljetuskalustossa, jossa akkupakettien paino nousisi niin suureksi, että hyötykuormaa saataisiin vain pieni osa polttokennolla toimivaan kuorma-autoon verrattuna, erityisesti pitkän matkan liikenteessä. (Cummins 2020.)

Polttokennoauto tuottaa sähköenergian lisäksi muina päästöinä ainoastaan vettä ja lämpöä, josta lämmön taas voi käyttää matkustamon lämmitykseen kylmillä säillä. Koska polttokenno myös vaatii katodille tulevan ilman olevan täysin puhdasta, kulkee ilma suodattimien läpi ja näin ollen yli jäänyt ilma tulee ulos puhtaampana kuin se polttokennolle mennessään on. Auto siis itse asiassa puhdistaa ympäristön ilmaa toimiessaan, jolle voisi olla käyttöä isoissa kaupungeissa. (Hyundai 2022.)

Ympäristöystävällisyys on suuri osa polttokennoauton hyötyjä. Sen valmistamisessa käytetään myös huomattavasti vähemmän täyssähköisten ajoneuvojen akkujen vaatimia mineraaleja, sillä niissä käytettävien akkujen ei tarvitse olla yhtä suuria.

Vedyn lämpöarvo massaansa suhteutettuna on noin kolminkertainen bensiiniin sekä dieseliin nähden ilmakehän paineessa, sekä itse polttokennossa tapahtuvan reaktion hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin tavallisissa polttomoottoreissa. Polttokennon hyötysuhde on pienemmällä kuormituksella parempi, mikä onkin tilanne normaalissa ajossa pääosan ajasta. Polttomoottorissa paras hyötysuhde taas saadaan korkeammalla kuormituksella, eli esimerkiksi tasanopeusajossa se toimii usein optimialueensa alapuolella. (Motiva 2020.)

Polttokennoauton todellinen hyötysuhde on n. 50 prosentin tienoilla, kun bensiiniautossa se jää noin 20 prosenttiin. Polttomoottoriautoissa suuri osa energiasta menee hukkaan lämpönä, sillä kemiallinen energia pitää muuttaa polttokenno- ja akkukäyttöisestä autosta poiketen ensin lämpöenergiaksi, jotta saadaan aikaan mekaanista energiaa. Akkukäyttöisen sähköauton hyötysuhteesta polttokennoauto kuitenkin jää, sillä sähkömoottorin ja akkukäytön hyötysuhde on yleensä todella hyvä, ja näin ollen täyssähköauton hyötysuhde voi olla jopa lähellä 90 prosenttia. (Motiva 2020.)

Elektrolyysiprosessi vihreän vedyn tuottamiseksi alentaa vetypolttokennokäytön kokonaishyötysuhdetta, samoin kuin vedyn kuljetus ja varastointi. Näitä välivaiheita ei tarvita täyssähköisen auton latauksessa, mikä antaa sille edun tämän osalta. Kuitenkin, jos elektrolyysiin käytetään sähköä, joka muuten jäisi käyttämättä, ei tähän seikkaan pidä tarttua liikaa kiinni. (Vartiainen 2020.)

Polttokennoajoneuvoja rajaa tällä hetkellä tankkausasemien puutteen lisäksi ympäri maailmaa vihreän vedyn hinta, joka on tällä hetkellä vielä liian korkea muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Hinta kuitenkin laskee sitä mukaa, kun tuotantoa saadaan kasvatettua tehokkaammaksi. Itse polttokennotekniikan kustannukset ovat alentuneet todella paljon viimeisten vuosien aikana, mikä nähdään mm. Toyota Mirain toisen korimallin hinnan putoamisena jopa 20 prosentilla ensimmäiseen verrattuna. (Toyota Europe Newsroom 2020)

Ilman lämpötilan lasku ei vaikuta polttokennoon samalla tavalla kuin täyssähköauton akkuun. Toimintamatka ei siis juurikaan putoa ilman

kylmentyessä. Tämä puoltaa polttokennoja akkukäyttöisten autojen edelle esimerkiksi Lapissa, jossa lämpötila talvella on usein alle -20 astetta. Polttokennon tuottama hukkalämpö pystytään käyttämään matkustamon lämmitykseen kylmissä olosuhteissa. Sähköautoissa lämpö taas tulee lämpöpumpulta/lämpövastuksesta, jotka vaativat virtaa akulta. BMW:n verkkosivuilta nähdään iX xDrive40-täyssähköauton toimintamatkan putoavan miltei 25 prosenttia, kun lämpötila laskee +15 asteesta -10 asteeseen (°C). (BMW AG 2021.)

3 Vedyn valmistus

Vety on maailman yleisin alkuaine, mutta sitä ei löydy puhtaassa muodossa luonnosta, vaan se on aina kiinnittynyt johonkin toiseen alkuaineeseen.

Esimerkiksi vedessä (H_2O), vetyatomit ovat kiinnittyneet happiatomiin. Jotta vetyä päästään käyttämään polttokennoon, tulee se erottaa aineesta, johon se on kiinnittynyt. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi elektrolyysiä, joka taas vaatii energiaa eli jonkin primäärienergianlähteen käyttöä. Tämän vuoksi vetyä kutsutaan energianlähteen sijasta energian kantajaksi, tai sekundääriseksi energianlähteeksi. Jos elektrolyysi tehdään uusiutuvalla sähköllä, kuten tuulivoimalla, saadaan vedyn koko elinkaari toteutumaan ilman hiilidioksidipäästöjä.

Eri tavoin tuotetulla vedyllä on erilaisia nimityksiä.

- Vihreäksi vedyksi kutsutaan uusiutuvilla energianlähteillä valmistettua vetyä.
- Päästöttömän vedyn valmistukseen kuuluu uusiutuvien energianlähteiden lisäksi ydinvoima.
- Siniseksi vedyksi kutsutaan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua vetyä, jonka hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla.
- Turkoosiksi vedyksi kutsutaan pyrolyysin avulla tuotettua vetyä, jonka sivutuotteena syntyy hiilimustaa.
- Harmaalla vedyllä tarkoitetaan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua vetyä.

(Vartiainen 2020.)

Elektrolyysissä vesimolekyyleistä (H_2O) erotetaan vety ja happi toisistaan sähköenergian avulla, ja saadaan näin puhdasta vetyä, jota voidaan käyttää

polttokennoissa. Elektrolyysi toimii siis vastaavalla tavalla kuin polttokenno, vain päinvastaisesti. Uusiutuvaa sähköä elektrolyysissä käytettäessä vedyn valmistus saadaan täysin päästöttömäksi, jonka ansiosta elektrolyysi on tulevaisuudessa vedyn valmistustapa, johon pääosin sen tuotannossa siirrytään. Vedyn valmistamisen hyötysuhde elektrolyysillä ei ole kovinkaan hyvä. Tähän pystytään kuitenkin käyttämään esimerkiksi tuuli- ja vesi-voimaloiden sähköä, jota usein esimerkiksi öisin ja kesäaikaan tuotetaan kulutukseen nähden liikaa. Näin ylimääräinen sähkö saadaan hyödynnettyä vedyn valmistuksella. Myös elektrolyysin aiheuttama hukkalämpö voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi kaukolämpönä. (Vartiainen 2020.)

Tällä hetkellä suurin osa vedystä Suomessa syntyy teollisuudessa maakaasun pääkomponentista eli metaanista erottamalla. Siinä maakaasu hajotetaan vedyksi ja hiili muutetaan hiilidioksidiksi, joten reaktiosta muodostuu suuria määriä hiilidioksidia. Vedyn laajamittainen muuttaminen uusiutuvalla sähköllä valmistettavaksi vaatii paljon aikaa ja rahaa. (Laurikko ym. 2020.)

Taloudellisilla seikoilla on vaikutusta siihen, mitä menettelyjä käytetään, ja poliittisilla päätöksillä voidaan hintasuhteisiin vaikuttaa. Sähkövero teollisuudessa ja polttoaineiden verotus vaikuttavat käytettävien teknologioiden kannattavuuteen ja mahdollisuuksiin ottaa uusia energiateknologioita käyttöön. (Valtioneuvosto 2021.)

3.1 Vihreä vety

Suomen tämänhetkisenä tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä. Tämä vaatii huomattavaa siirtymistä päästöttömän energian tuotantoon. Näin ollen vedyn valmistuksessa tulee huomioida myös itse valmistuksen aiheuttamat päästöt. Vihreästä vedystä puhuttaessa tarkoitetaan vetyä, jonka valmistuksessa on käytetty vain uusiutuvia energianlähteitä. Sen avulla pystytään energiaa siirtämään ja varastoimaan päästöttömästi, millä tulee olemaan suuri merkitys Suomen hiilineutraaliuden tavoittelemisessa. (Valtioneuvosto 2021.)

Vihreää vetyä valmistettaessa tuuli-, aurinko- ja vesivoima ovat kaikki päteviä energianlähteitä elektrolyysille. Uusiutuvat energianlähteet ovat niitä, joilla tulevaisuudessa pyritään valmistamaan kaikki vety, mutta vetytalouden alkuvaiheessa tulee ottaa käyttöön myös muita vaihtoehtoja, kuten sininen vety. Tällä hetkellä vetyä käytetään suurimmaksi osaksi ainoastaan teollisuudessa, ja suurin osa siellä käytetystä vedystä reformoidaan fossiilisista polttoaineista, joka aiheuttaa huomattavan määrän hiilidioksidipäästöjä. Tästä harmaan vedyn tuotannosta siirtyminen siniseen ja vihreään vetyyn saisi aikaan huomattavaa edistystä päästötavoitteiden saavuttamiseksi. (Laurikko ym. 2020.)

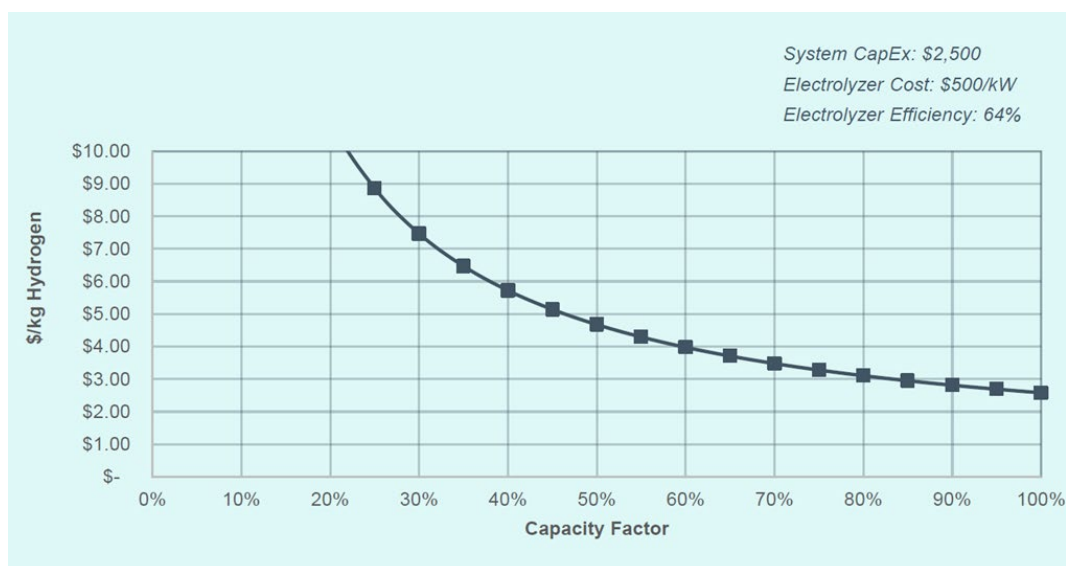
Elektrolyysin ja uusiutuvan sähkön kustannukset ovat alentuneet jo huomattavasti viime vuosien aikana, mikä korreloituu suoraan vihreän vedyn hintaan. Suomella on kuitenkin vielä pitkä matka siihen, että vihreän vedyn hinnasta saadaan kilpailukykyinen muihin polttoaineisiin verrattuna. (Vartiainen 2020.)

Power-to-X-tekniologialla tarkoitetaan prosesseja, joissa uusiutuvaa sähköä varastoidaan synteettiseksi polttoaineeksi yhdistämällä teollisuuden päästöistä tai ilmakehästä talteen otettu hiilidioksidi vedyn kanssa. Power-to-X on yleisnimitys, sillä lopputuotteet voivat vaihdella useiden eri lopputuotteiden kesken. Prosessia, jolla näitä polttoaineita valmistetaan, kutsutaan nimityksellä power-to-fuel (P2F). Näin pystytään tuottamaan fossiilittomia hiilivetyjä, kuten metaania, joita esimerkiksi polttomoottoriajoneuvot pystyvät käyttämään polttoaineena sellaisenaan. (Lappalainen 2021.)

Sähköpolttoaineiden valmistuksessa käytetään hiilidioksidia, joka on jo vapautunut, tai on vapautumassa luontoon. Hiilidioksidin talteenoton avulla saadaan polttoaineista hiilineutraaleja, koska ne eivät varsinaisesti lisää ilman CO₂-päästöjä, vaan ne vain käytetään uudelleen. Sähköpolttoaineiden valmistus vaatii myös vetyä, jotta lopputuotteeksi saadaan hiilivetyjä. (Lappalainen 2021.)

EU:n komissio luokitteli helmikuussa myös ydinvoiman ”vihreäksi sähköksi”, kunhan ydinjätteen hoito on toteutettu hyvin. Tämä mahdollistaa vihreän vedyn valmistuksen myös ydinvoimalla. (BBC 2022.)

Olkiluoto 3 -ydinvoimalan valmistuminen tulee tuottamaan n. 15 % Suomen sähkönkulutuksesta, ja samalla koko Suomen ydinvoiman avulla tuotettu sähkön osuus nousee 28 prosentista 40 prosenttiin. Olkiluoto 3:n tuottama sähköteho on 1600 MW. Ydinvoiman kapasiteettikerroin, eli aika jona ydinvoimaloita vuodessa prosentteina käytetään, on todella suuri (90 %) verrattuna muihin päästöttömiin energianlähteisiin. Aurinko- sekä tuulisähkövoimalat nimittäin pystyvät toimimaan vain, kun valo tai tuulta on saatavilla, mikä huomattavasti laskee niiden toiminta-aikaa. Suomessa aurinkosähkön kapasiteettikerroin on 10 prosentin luokkaa, ja tuulivoimaloiden n. 45 prosenttia. Kuvio 2 näyttää vedyntuotannon kustannusten suhteen energialähteen kapasiteettikertoimeen. (TVO 2021.)



Kuvio 2. Vedyntuotannon kustannusten suhde energialähteen kapasiteettikertoimeen. (Ingersoll & Gogan 2020)

Kuvio 2:sta voidaan todeta vedyntuotannon kustannusten kasvavan sitä suuremmaksi, mitä pienempi kapasiteettikerroin energianlähteellä on. Esimerkiksi 30 prosentin kapasiteettikertoimella vedyn hinta kilogrammaa kohti on n. 7,5 dollaria, kun taas 90 prosentin kertoimella hinta olisi vain hieman alle 3 dollaria.

3.2 Vety polttoaineena

Monet autovalmistajat ovat jo lopettaneet uusien bensiini- sekä dieselmoottorien kehittämistyön, ja aikovat lähivuosina myös lopettaa näiden valmistuksen. Glasgow'n ilmastokokouksessa kuusi suurta autovalmistajaa sopivat siirtymisestä ainoastaan nollapäästöisten ajoneuvojen valmistukseen vuoteen 2040 mennessä. Vaihtoehtoiksi ainakin tämän hetken teknologioilla jäävät siis ainoastaan täyssähköiset sekä vetykäyttöiset ajoneuvot. (Plumer 2021.)

3.3 Vedyn hinta

Vedyn hintaan vaikuttavia tekijöitä on useita, ja näistä tärkeimpiä ovat:

- Laitteiden käyttöajan osuus prosentteina koko vuodesta, eli energiantuotannon kapasiteettikerroin. Käyttöajan puolittuessa, kuten ydinvoimasta tuulivoimaan siirryttäessä, valmistuskustannukset kaksinkertaistuvat.
- Energiantuotannon tehokkuus ja investointikustannukset
- Elektrolyysilaitteiston tehokkuus ja investointikustannukset

Jotta vedyn hinta pystyisi kilpailemaan fossiilisen öljyn kanssa täysin, tulisi sen kilohinta saada laskemaan 0,9 dollariin (0,85e/kg). Ainoa vaihtoehto päästä lyhyellä tähtäimellä tähän hintaan on käyttää ydinvoimaa vihreän vedyn valmistuksessa. Aasiassa päästään jo nyt ydinvoimalla n. 2 \$/kg hintaan, ja pienillä parannuksilla pystytään vuoteen 2030 mennessä saamaan hinta tavoitteeseen. Uusiutuvalla energialla on ennustettu päästävän minimissään n. 2,14 \$/kg vuoteen 2030 mennessä. (Ingersoll & Gogan 2020)

4 Raskas liikenne ja polttokennot

Raskaissa ajoneuvoissa polttokennotekniikalla on suurin potentiaali tieliikenteessä. Raskaan kaluston muuttaminen täyssähköiseksi, ainakin pitkän matkan kuljetuksissa, ei tule onnistumaan ennen akkuteknologian huomattavaa kehittymistä, sillä nykyisellä tekniikalla sähköinen voimalinja tulisi painamaan ainakin 4 tonnia riittävän toimintasäteen takaamiseksi. Tulee kuitenkin pitää mielessä, että 68 prosenttia EU:n kuljetuksista on alle 400 kilometrien matkoja, joten pelikenttä ei rajaa täyssähköisiä kuorma-autoja kokonaan pois. Esimerkiksi paikallisliikenteessä täyssähköisten linja-autojen käyttöönotto on mahdollista, ja sovelluksia on jo nähty Suomessakin. (Transport & Environment 2021.)

Akkujen korvaaminen polttokennotekniikalla takaa huomattavasti kevyemmän ratkaisun. Näin pystytään nostamaan mahdollista hyötykuorman määrää, sillä auton omamassa ei kasva liian suureksi. Polttokennolla toimivien kuorma-autojen tekniikan paino saadaan tehtyä jopa kevyemmäksi kuin dieseltekniikka. Tämän lisäksi EU on sallinut päästöttömille kuorma-autoille ja kolmiakselisille linja-autoille yhden tonnin hyvityksen enimmäispainossa. Lyhyt tankkaus aika pitkän matkan kuljetuksissa voisi auttaa saamaan tavaran nopeammin perille, mikä on yksi suuri tekijä yritysten valitessa kuljetuksiaan. (Cummins 2020.)

Raskaisiin ajoneuvoihin ei vetyä tarvitse tankata niin suureen paineeseen kuin henkilöautoihin, sillä esimerkiksi linja-autoissa on paljon enemmän tilaa mahdollistaa vetysäiliöitä kuin henkilöautoihin. Tästä syystä vety yleensä tankataan näihin n. 350 barin paineessa. (Demaco 2022.)

Haittapuolina polttokennoissa ovat samat seikat kuin henkilöautoliikenteessäkin, kustannukset ovat varsinkin infrastruktuurin alkuvaiheessa todella kovat, niin vedyn kustannusten kuin tankkausasemien rakentamisen osalta. Siirtyminen tekniikkaan vaatii siis alussa suuria sijoituksia. Kustannusten lisäksi myös tankkauspisteiden määrä pitää saada kasvatettua niin, että ainakin kaikille tärkeimmille tieyhteyksille saataisiin niitä rakennettua.

Useat suuret yritykset ovat alkaneet tekemään kasvavalla vauhdilla töitä saadakseen vedyllä kulkevia kuorma- sekä linja-autoja liikenteeseen. Daimler Truck AG ja Volvo Trucks ovat perustaneet yhteisen yrityksen nimeltään Cellcentric, johon molemmat tahot ovat sijoittaneet 600 miljoonaa euroa. Tämän yhtiön tarkoituksena on polttokennojen nopea kehittäminen ja valmistaminen raskaan kaluston tarpeisiin sekä muihin sovelluksiin. Tällä kahden suuren valmistajan yhteisellä projektilla säästetään rahaa polttokennotekniikan kehityksessä, sekä samalla saadaan uusia innovaatioita nopeammin markkinoille. Cellcentricin tavoitteena on tulla maailman suurimmaksi polttokennoteknologian valmistajaksi. (Daimler 2021; Cellcentric 2021.)

Saksalaisen Boschin tavoitteena taas on kehittää polttokennotekniikkaa ensin nimenomaan raskaan liikenteen tarpeisiin, ja tämän jälkeen alkaa tuottamaan myös henkilöautosektorille tarkoitettuja vaihtoehtoja. Bosch on myös tehnyt pitkäaikaisen sopimuksen sähköisten ilmakompressoreiden toimittamisesta yllä mainitulle Cellcentric-yhtiölle. Yrityksen mukaan näin saadaan poistettua raskaan kaluston aiheuttamia suuria hiilidioksidipäästöjä kaluston siirtyessä uuteen teknologiaan. Boschin on tarkoitus aloittaa tuotanto vuosina 2022–2023. Boschin tämänhetkinen suunnitelma on sijoittaa liikenteen polttokennotekniikkaan 600 miljoonaa euroa, ja tämän lisäksi 400 miljoonaa sähkön ja lämmön tuotannon polttokennosovelluksiin vuoteen 2024 mennessä. (Bosch 2020b.)

Ajoneuvovalmistajista polttokennotekniikan edelläkävijänä toiminut Hyundai on myös valmistanut XCIENT-kuorma-auton, jonka voimanlähteenä toimii polttokenno. Hyundai tavoitteena on saada Euroopan markkinoille 1600 vedyllä toimivaa kuorma-autoa vuoteen 2025 mennessä. (Hyundai 2021.)

5 Tämänhetkinen tilanne Suomessa ja Euroopassa

5.1 Tilanne Suomessa

Kun mietitään Suomen tilannetta vedyllä toimivien ajoneuvojen käyttöönottoon liittyen, tulee lähteä liikkeelle nimenomaan itse vedystä ja sen valmistuksesta. Jotta polttokennoautojen käyttöönotosta olisi ympäristölle hyötyä, tulee niihin tankattava vety olla sellaisella sähköllä valmistettua, josta ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä.

Vihreän vedyn valmistuksen kustannukset alenevat sitä mukaa, kun suuremmaksi tuotanto saadaan, ja samalla lopputuotteen hinta saadaan kilpailukykyisemmäksi. Tällä hetkellä vihreän vedyn valmistus Suomessa on käytännössä olematonta, ja se tulee olemaan varsin kallista ensimmäisten tuotantolaitosten tultua valmiiksi. Mitä enemmän näitä laitoksia saadaan otettua käyttöön, sitä halvemmaksi vedyn hintaa saadaan laskettua. Vihreällä vedyllä on polttokennoautojen lisäksi useita muita tärkeitä käyttökohteita, joilla on mahdollista aikaansaada huomattavia hiilidioksidivähennyksiä eri aloilla. Autojen tankkauspisteitä voidaan alkaa rakentamaan, kun tuotanto saadaan ensin alkuun. Suomi ei ole tämän asian kanssa yksin, vaan usealla muulla EU-maalla on vielä sama tilanne.

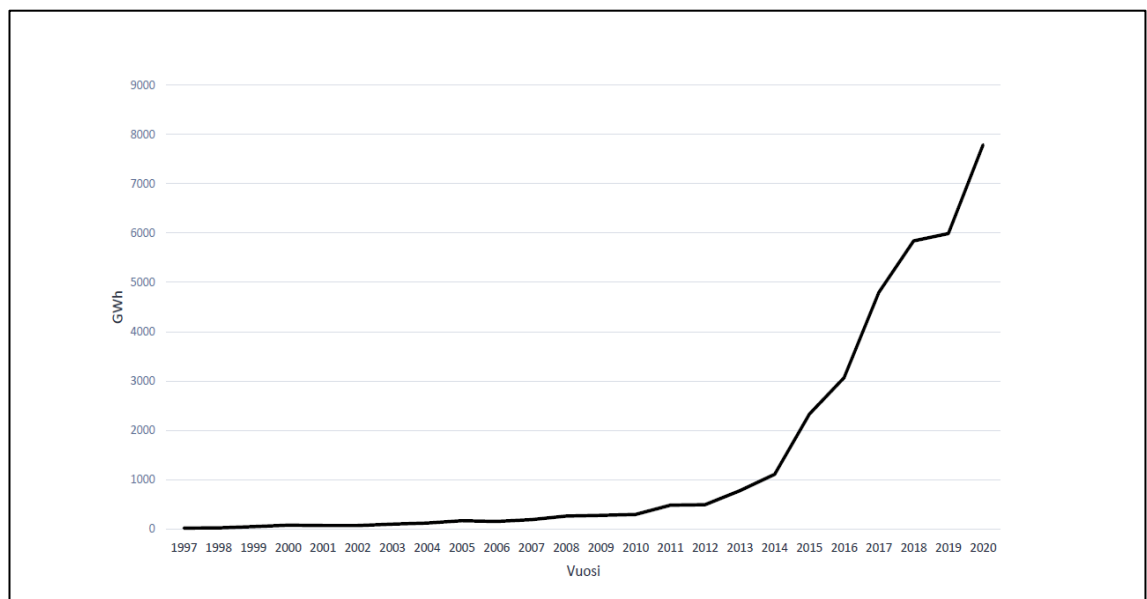
Teknologian tutkimuskeskus VTT on valmistanut niin sanotun vetytiekartan Suomen strategialle vedyn käytöstä. Tässä on yksityiskohtaisesti tutkittu Suomen tilannetta, vahvuuksia, heikkouksia sekä vaatimuksia vetytalouden mahdollistamiseksi. (Business Finland 2020.)

Analyysiä Suomen tilanteesta vetytiekartan pohjalta:

- Suomen etuja vetytalouden käyttöönotossa on hyvät resurssit tuulivoimalle, niin maalla kuin merelläkin. Tuulivoiman lisääminen on kannattavaa Suomessa jopa ilman lisätukia, laajojen maa-alueiden ja tuulilosuhteiden vuoksi. (Laurikko, ym. 2020.) Tuulivoiman tuotanto tulisikin ainakin kaksinkertaistaa nykyiseen tasoon (tällä hetkellä n. 2600

MW) nähden, jotta tuulisähkön tuotantomäärät saataisiin haluttuihin lukemiin. (Parviala A. 2021.)

- Tuulivoimaloiden vuosittaiset tuotantomäärät ovat lähteneet eksponentiaaliseen kasvuun viime vuosien aikana. Kuviosta 3 nähdään että vuonna 2015 Suomen tuulivoimalat tuottivat noin 2 terawattituntia sähköä, mutta vastaava luku vuonna 2020 oli lähes nelinkertainen ja näin ollen miltei 8 TWh. Suomen 2030 ennustettu tuulivoimatuotanto on 30 TWh. Kasvun siis nähdään jatkuvan vahvana. (Suomen tuulivoimayhdistys 2020.)
- Tuulivoima (kuvio 3) on hyvä valinta vedyn tuotantoon, sillä tuulivoiman tuotanto saattaa välillä ylittää sähkön tarpeen. Ennen tämä ylimääräinen sähkö on käytännössä mennyt hukkaan, mutta elektrolyysin avulla sitä pystyttäisiin varastoimaan vetyyn, ja näin ollen käyttämään taas kiinteissä polttokennoyksiköissä, kun ylimääräiselle sähkölle tulee tarvetta, esimerkiksi tynnellä ilmalla. Varastoitua vihreää vetyä pystytään myös kuljettamaan rakennettaville vedyn tankkausasemille ja näin sitä pystytään hyödyntämään polttokennokäyttöisissä ajoneuvoissa. (Laurikko ym. 2020.)



Kuvio 3. Suomen vuosittainen tuulivoimaloiden tuotanto gigawattitunneissa. (Suomen tuulivoimayhdistys 2020.)

- Suomella on valmiiksi vahva sähköverkko, johon ollaan investoimassa kokonaisuudessaan vielä n. 1,4 miljardia euroa sen vahvistamiseksi vuoteen 2030 mennessä. Näiden lisäksi Suomella on myös vahva olemassa oleva pohja vedyn käytöstä teollisuudessa, sekä EU-maana vakaa, helposti ennustettavissa oleva säännösympäristö.
- Heikkouksia Suomen vedyn käytössä muodostuu suuremmasta sähkön markkinahinnasta verrattuna Ruotsiin ja Norjaan ja vähäisestä kokemuksesta vedyn käytöstä liikenteessä ja teollisuuden ulkopuolella. Vedyn varastoinnin kannalta Suomessa ei myöskään ole luonnon muodostumia, kuten suolaluolia, joita voitaisiin hyödyntää vedyn varastoinnissa.
- Mahdollisuuksia, jotka edesauttavat maatamme, ovat aikaisempi kokemus biopolttoaineiden valmistuksessa, teräksen tuotannon muuttaminen hiilidioksidivapaaksi vihreän vedyn avulla, sekä edullinen hiilen poistaminen vedyn tuotannosta sekä logistiikasta.
- Uhkia taas ovat RED II-säännöksen (Renewable Energy Directive) mahdolliset muutokset, sekä fossiilisten polttoaineiden liian alhainen hinta, josta voi seurauksena olla hidas autokannan päivittyminen. Muita uhkia on mm. se, jos vihreän vedyn hintaa ei saada laskettua alaspäin tarpeeksi nopeasti. (Laurikko, ym. 2020.)

Suomi valmistaa tällä hetkellä vetyä n. 140 000–150 000 tonnia vuodessa, josta alle yksi prosentti valmistetaan elektrolyysin avulla. Miltei 90 prosenttia tästä vedystä kuluu öljyn jalostukseen ja biopolttoaineiden valmistukseen. Kun näissä tarvittava vety pystytään korvaamaan vihreällä vedyllä, nähdään huomattavia vähennyksiä Suomen hiilidioksidipäästöissä. (Laurikko, ym. 2020.)

Suomen kestävä kasvun ohjelmassa on vetytalouden investoinneille kaavailtu 150 miljoonaa euroa vuosille 2021–2025. Toimenpiteisiin kuuluu vihreän vedyn tuotannon kehitys, käyttöönotto sekä P2X-prosessien käyttöönotto. Myös CO₂-päästöjen talteenoton hyödyntäminen on otettu huomioon näissä investoinneissa. (Valtioneuvosto 2021.)

Neste julkisti marraskuussa 2021 EU:n innovaatorahaston myöntäneen yhtiölle 88 miljoonan euron rahoituksen uuteen hankkeeseen, jonka pääkohtina on vihreään vetyyn ja hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin siirtyminen. Hankkeen tavoitteena on saada vähennettyä Nesteen Porvoon jalostamon kasvihuonekaasupäästöjä mahdollisimman nopeasti. Tähän tavoitteeseen päästään hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla, sekä uusien elektrolyysilaitteistojen investoinneilla, joiden avulla pystytään tuottamaan vihreää vetyä. Vihreän vedyn tuotannolla pystytään muuttamaan jalostamon toimintaa huomattavasti vähäpäästöisemmäksi. Hankkeen valmistuessa uusilla ratkaisulla pystytään tekemään jopa 4 miljoonan tonnin hiilidioksidin päästövähennykset ensimmäisten 10 vuoden aikana. Toteutuessaan hanke edistää vahvasti sekä Suomen että EU:n ilmastotavoitteiden saavuttamista, ja on tärkeä osa Nesteen tuotannon hiilineutraaliustavoitetta vuoteen 2035 mennessä. (Sieppi 2021.)

Vetytalouden kehitykseen liittyviä yrityksiä tulee koko ajan lisää. Yksi mainitsemisen arvoinen on projektikehitysyritys Nordic Ren-Gas, jonka tavoitteena on saada aikaan koko maan kattava sähköpolttoaineiden tuotanto- ja jakeluverkosto raskaan liikenteen käyttöön. Näillä P2X-ratkaisuilla saataisiin nopeasti hillittyä hiilidioksidimäärien kasvua ilmakehässä raskaan liikenteen osalta, sillä niiden valmistamisessa käytettävä hiilidioksidi voidaan ottaa talteen suoraan tehtaiden piipuista tai ilmakehästä. (Lappalainen 2021.)

Tavoitteena yrityksellä on vuoteen 2030 mennessä tuottaa jopa 50 miljoonaa litraa P2X-polttoaineita vuodessa, sekä saada yhteensä 120 megawatin edestä elektrolyysilaitteistoja vihreän vedyn tuotantoon. Koko investoinnin arvo tulee olemaan n. 250 miljoonaa euroa, joka on Suomen suurin investointi vetytalouteen. Kokonaisuus tullaan rakentamaan yhteistyössä Lahti Energian kanssa, jolloin voimalaitoksista saadaan talteen otettua tarvittava hiilidioksidi, sekä hukkalämpö voidaan käyttää hyväksi Lahti Energian kaukolämpöverkossa. (Ren-Gas 2021.)

5.2 Tilanne EU:ssa

EU:n komission julkaisema "Fit for 55"-paketti asettaa Euroopan unionille suuret tavoitteet vedyn käytön tulevaisuudelle. Yksi suurimmista suoraan polttokenno-ajoneuvoihin liittyvistä tavoitteista on saada vedyn tankkausasemia EU:n koko alueelle 150 kilometrin välein kaikkien tärkeimpien ajoreittien varrelle. Tankkausasemia on tarkoitus saada niin henkilöautojen kuin raskaan kalustonkin käyttöön. Tämän kattavan pohjaverkon rakennuksen jälkeen uusien tankkausasemien rakentaminen pienemmille paikkakunnille olisi helpompaa aloittaa, ja näin saada verkostoa yhä tiheämmäksi. (Eurooppa-neuvosto 2020.)

Paketin muita huomionarvoisia kohtia on mm. pudottaa henkilöautojen päästöjä 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä, sekä tavoite saada kaikki rekisteröitävät autot vuodesta 2035 täysin päästöttömiksi. Raskaan liikenteen osalta tarkoituksena vuoteen 2030 mennessä on saada 30 prosenttia uusista raskaan liikenteen ajoneuvoista päästöttömiksi. Vuoteen 2040 mennessä taas tavoitteena on saada kaikki uudet raskaan liikenteen ajoneuvot päästöttömiksi. (Eurooppa-neuvosto 2020.)

Yhä useammat suuryritykset ovat joko tehneet, tai ovat tekemässä miljardi-luokan sijoituksia polttokennotekniikan kehitykseen. Mitä enemmän tutkimukseen ja kehitystyöhön panostetaan, sitä nopeammin saadaan parempia ja halvempia sovelluksia markkinoille. (Costello 2021.)

Euroopan Unioni on kaavaillut sijoittavansa jopa 180–470 miljardia euroa uusiutuvan vedyn tuotannon kehittämiseen vuoteen 2050 mennessä. Vedyn on arvioitu tuottavan tähän vuoteen mennessä miltei neljäosan koko maailman energiantarpeesta. Yksi EU:n suurimmista tavoitteista on saada koko unionista hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, sekä vuonna 2030 saavuttaa 50-prosenttinen hiilineutraalius. (European Commission 2020.)

EU:n vetysuunnitelmaan kuuluu kolme vaihetta, joiden tavoitevuodet ovat 2024, 2030 sekä 2050.

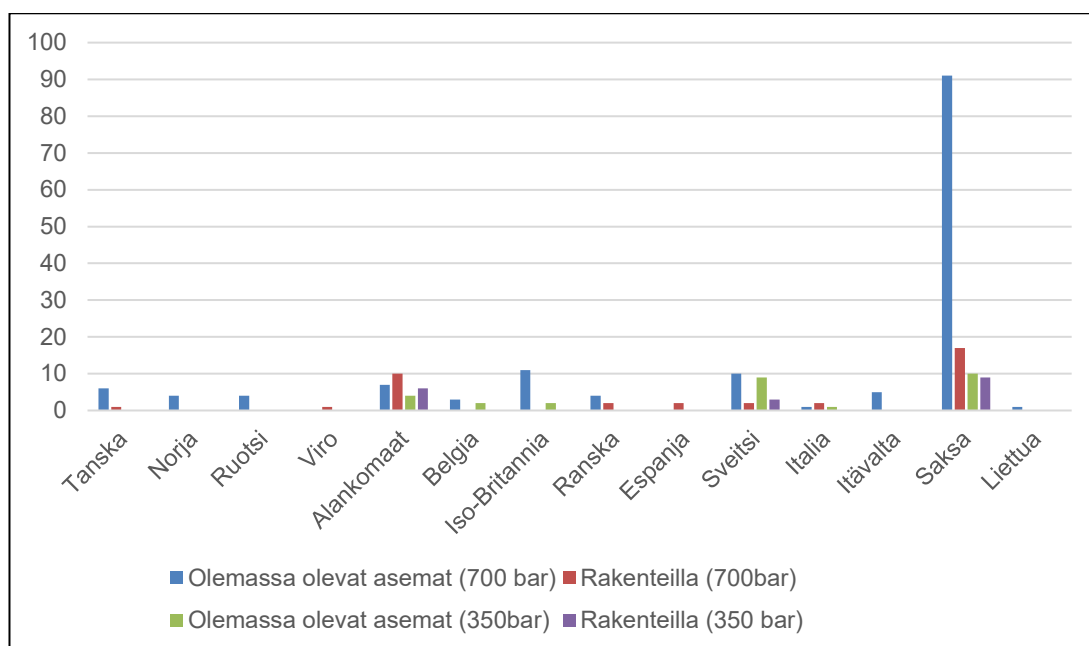
- Vety suunnitelman ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena on ottaa EU:ssa käyttöön 6 gigawatin edestä elektrolyysereitä, ja aloittaa nykyisen harmaan vedyn korvaaminen vihreällä vedyllä. Tässä vaiheessa suunnitellaan tarkemmin tarvittavaa vetytalouden infrastruktuuria. Vihreän vedyn vuotuiset tuotantomäärät pyritään saamaan miljoonaan tonniin.
- Toisen vaiheen tavoitteena on saada elektrolyysikapasiteetti 40 gigawattiin, sekä ottaa uusiutuva vety käyttöön teräksen valmistuksessa sekä kuljetussektorilla. Tässä vaiheessa aletaan keskittymään myös niin sanottujen vetylaaksojen rakentamiseen, eli teollisuusalueisiin, joissa saadaan parhaiten yhdistettyä vedyn tuotanto sen käytön kanssa. Näin saadaan hyödynnettyä vedyn valmistuksen sivutuotteena muodostuva hukkalämpö, joka parantaa vedyn valmistuksen kokonaishyötysuhdetta. Tämän lisäksi vetyä aletaan tuottamaan myös sähköntuotannon vaihtelujen tasapainottamiseksi. Toisen vaiheen tavoitteena on saada vihreän vedyn vuosituotanto kymmeneen miljoonaan tonniin.
- Kolmannessa vaiheessa vedyn käyttöä aletaan soveltamaan kaikilla aloilla, joita on vaikea saada muuten hiilineutraaliksi. Kolmannen vaiheen päämääränä on saada rakennettua koko unionin kattava vihreän vedyn verkosto.

Näillä välitavoitteilla pyritään saavuttamaan EU:n nopea siirtymä vetytalouteen. Hankkeisiin luvatut suuret tuet ja investoinnit tulevat tarpeeseen, jotta kehitys pystytään aloittamaan. Teknologian hinta on toistaiseksi vielä korkea, ja vihreän vedyn tuotantolaitosten rakentaminen on edelleen varsin kannattamatonta ilman tukia. Kustannukset saadaan kuitenkin laskuun, kun tuotanto tehostuu ja komponenttien valmistuksessa pystytään siirtymään massatuotantoon. Vuodesta 2010 vuoteen 2020 elektrolyysin kustannukset ovat laskeneet jo jopa 60 prosenttia, ja jos kustannukset edelleen laskevat tällä tahdilla, saadaan vihreän vedyn tuotantolaitoksia rakennettua yhä nopeammin. (European Commission 2020.)

Myös vedyn laadun standardointi on tärkeä tavoite, jonka avulla pystytään varmistamaan vedyn tuotantotapa sekä sen puhtaus. Näin ei missään EU:n alueella voitaisi myydä esimerkiksi fossiilisilla polttoaineilla tuotettua vetyä vihreänä vetyä. (European Commission 2020.)

Kuviosta 4 nähdään EU:n tankkausverkoston olevan vielä toistaiseksi varsin alkutekijöissään. Saksa on ainoa EU-maa, jossa tankkausasemien määrä on jo kohtalaisen hyvällä tasolla. Siellä polttokennoauton omistaminen voisikin olla jo mahdollista ympäri maata olevien asemien ansiosta. Saksassa tankattavan vedyn hinta kuluttajalle on n. 9,50 €/kg.

Yhdellä kilolla vetyä pääsee hieman autosta riippuen n. 100 kilometriä, joten ajaminen tulee itse asiassa hieman halvemmaksi jo tälläkin hetkellä kuin bensiinikäyttöisellä autolla (jos keskilukulukseksi oletetaan 6,0 l/100 km, ja bensiinin hinnaksi 2,00 €/l). Tässä tulee kuitenkin ottaa huomioon se, että suurin osa Saksan vedyn valmistuksesta muodostuu edelleen fossiilista polttoaineista, ja siirtyminen vihreään vetyyn tulee nostamaan vedyn hintaa. (h2live 2021.)



Kuvio 4. Vedyn tankkausasemat Euroopassa. (h2live 2021.)

6 Mitä polttokennoajoneuvojen käyttöönotto vaatisi Suomessa?

Suomessa tulee tehdä huomattava määrä töitä infrastruktuurin rakentamisessa, ennen kuin polttokennoautojen hankinnasta ja käytöstä voi edes puhua. Tilanne muistuttaa täyssähköautojen hankintaa vielä muutama vuosi sitten, ennen kuin latausasemien rakentamiseen alettiin keskittymään enemmän. Vetykäyttöisillä ajoneuvoilla voisi olla potentiaalia Suomessa, jossa on paljon harvaan asuttuja alueita, pitkiä välimatkoja sekä kylmiä lämpötiloja. Toisaalta alussa pitkät etäisyydet ovat myös polttokennoautojen kannalta huono asia, sillä tankkaus- asemia ei joka puolelle Suomea olla heti saamassa.

Vihreän vedyn valmistus on ensimmäinen askel kohti polttokennoautojen käyttöönottoa. Uusiutuvan sähkön voimaloita rakennetaan ja liitetään jatkuvasti Suomen sähköverkkoon, joiden avulla saadaan tuotettua sähköä, jota elektrolyysi vaatii paljon. Elektrolyysilaitteistoja myös vaaditaan paljon, jotta riittävä kapasiteetti vedyn valmistukseen saataisiin mahdolliseksi.

Näillä näkymin Suomen sähköntuotanto saadaan tämänhetkisestä tilanteesta reilusti ylijäämäiseksi kulutukseen nähden vuoteen 2030 mennessä. Kun tuotanto saadaan nostettua yli tarpeen, tarve ulkomailta ostettuun sähköön poistuu, sekä ylijäävää sähköä pystytään helposti tallettamaan vetyyn. (TEM 2019.)

Vihreän vedyn tuotantolaitoksia ei tällä hetkellä juurikaan ole, mutta niitä on suunniteltu ja rakentamista ollaan aloittamassa myös Suomessa. Ensimmäinen laitos valmistuu Harjavaltaan, ja sen on määrä valmistua vuoden 2024 loppuun mennessä. Harjavallan suurelle teollisuusalueelle pystytään viemään elektrolyysin tuottama hukkalämpö, ja näin ollen saadaan parannettua elektrolyysin hyötysuhdetta.

Toinen suuri etu, joka paikan valinnalla saavutetaan, on hiilidioksidin talteenotto, jota pystytään ottamaan talteen suoraan alueen tehtaiden päästöistä. Näin hiilidioksidin ja vedyn avulla saadaan tuotettua synteettisiä polttoaineita, joita taas voidaan käyttää alueen teollisuuden tarpeisiin, eli pystytään korvaamaan

fossiilisten polttoaineiden tarvetta. P2X Solutions -yrityksen tavoitteena on ensimmäisen laitoksen valmistuttua jatkaa vihreän vedyn laitoksien rakentamista ympäri Suomea, ja saavuttaa 1000 MW:n elektrolyysikapasiteetti vuoteen 2031 mennessä.

Harjavallan laitoksen tavoitteena on saada tuotettua vetyä 20 megawatin teholla elektrolyysillä, joka saa energiansa aurinko-, vesi- sekä tuulivoimaloista. Pilottilaitoksen investoinnin kustannukset ovat noin 70 miljoonaa euroa. (P2X Solutions 2021.)

Myös Naantaliin, vanhan Nesteen jalostamon paikalle on kaavailtu vihreän vedyn laitosta. Näiden laitoksien rakentaminen on välttämätöntä, jotta vetytalouteen siirtyminen Suomessa pystytään aloittamaan. Rakentaminen tällä hetkellä ei ole millään tasolla kilpailukykyistä ilman tukia, joten prosessin saaminen liikkeelle on hidasta. (Kossila 2021.)

Kun vihreän vedyn valmistaminen on saatu alkuun, alkaa prioriteetiksi muodostua myös tankkausverkoston rakentaminen polttonnoajoneuvoille. Ensimmäiset vedyn tankkausasemat on jo kaavailtu, ja nämä kolme asemaa on tarkoitus ottaa käyttöön vuoteen 2023 mennessä, ja myös ne tullaan rakentamaan P2X Solutionsin toimesta. Ensimmäinen tankkausasema rakennetaan Harjavallan tuotantolaitoksen yhteyteen, ja se on tarkoitettu raskaan kaluston tankkaukseen. (Pitkänen 2021.)

Tankkausaseman kustannukset tulevat pohdittavaksi, kun mietitään esim. "Fit for 55" -ohjelman ehdottamia 150 kilometrin välein olevia tankkausasemia. USA:ssa tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin 111 suunnitellun vedyn tankkausaseman kustannuksia ja kapasiteetteja. Yhden tankkausaseman keskiarvokustannukseksi tuli n. 1,9 miljoonaa dollaria ja aseman kapasiteetin keskiarvo oli 1240 kilogrammaa päivää kohden. Samassa tutkimuksessa selvitettiin Kaliforniassa olevia tankkausasemia ja todettiin näissä jopa yli 80 prosentin laskuja rakennuskustannuksien suhteen tankkausasemien rakennuskustannuksissa vuosien 2012 ja 2020 välillä. Tämän perusteella kustannuksia saadaan lasketua huomattavasti myös tulevaisuudessakin. (U.S. Department of Energy 2021.)

7 Nykyiset ja tulevat polttokennoautot

Polttokennotekniikkaa löytyy yhä useammista autoista. Tämän hetken eniten myydyt polttokennolla toimivat automallit ovat Toyota Mirai, Hyundai Nexo sekä Honda Clarity. Yhdysvalloissa polttokennoautojen valmistajat antavat auton ostajalle 15 000 dollarin tankkauskortin, jonka avulla saadaan houkutelua ostajat kiinnostumaan polttokennoautoista. Tavoitteena on myös se, että vedyn hinta putoaisi lähivuosina, kun tuotantoa saadaan skaalattua suuremmaksi. Tällä hetkellä Yhdysvalloissa vedyn hinta saattaa olla jopa 16 dollaria kilogrammalta. (CNBC 2019.)

Ajoneuvovalmistajat, jotka puhuvat vetyautojen puolesta, yleensä mainitsevat, ettei sähkö tule tulevaisuudessa olemaan ainoa käyttövoima autoissa, vaan tarvitaan muitakin vaihtoehtoja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Jotkin valmistajat taas pitävät täyssähköautoja ainoana oikeana vaihtoehtona. Esimerkiksi Volkswagen, yksi maailman suurimmista autovalmistajista ei usko vetykäyttöisten autojen tulevaisuuteen, vaan aikoo panostaa ainoastaan akkukäyttöisiin vaihtoehtoihin. (Salonen 2021.)

Useilta valmistajilta on tullut myös konseptiautoja, joita otetaan ehkä jo lähivuosina valmistukseen. Esimerkiksi BMW:n iX5 Hydrogen on malli, jota on tavoitteena valmistaa pieni kokeiluerä vuoden 2022 loppuun mennessä. BMW:n testien perusteella auton tekniikka vaikuttaa todella lupaavalta myös kylmiin olosuhteisiin, sillä sen toiminta ja toimintasäde pysyy samana jopa -20 asteen lämpötiloissa. (BMW Group 2022.)

Jos Suomen tilanne vedyn tankkausverkoston suhteen saadaan paremmaksi lähivuosina, pystytään yllä mainittuja automalleja varmasti saamaan myös tänne. Vetyautojen valmistuskustannuksia on saatu laskettua huomattavasti lähivuosina, ja ne kilpailevat samassa hintaluokassa täyssähköautojen kanssa. (Toyota Europe Newsroom 2020)

8 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Suomen tilannetta polttokennoautojen käyttöönoton, sekä vihreän vedyn osalta. Tavoitteena oli myös selventää lukijalle, mitä polttokennotekniikalla tarkoitetaan, sekä mitä vedyn valmistus ympäristöystävällisillä tavoilla vaatisi.

Työssä selvisi melko nopeasti, että polttokennoautojen osalta Suomi on vielä alkutekijöissään, ja infrastruktuurin rakentaminen tulee olemaan varsin hidas prosessi. Vihreän vedyn tuotantoon saaminen laajamittaisesti vaatii suuria sijoituksia, joita kuitenkin ensimmäiset yritykset ovat jo alkaneet tekemään. Lähivuosina ensimmäisten vihreän vedyn tuotantolaitosten valmistuttua, nähdään paremmin, saadaanko polttokennoautoja Suomeen, kun vedyn tankkausasemia aletaan rakentamaan. Vihreän vedyn hinta tulee kuitenkin olemaan alussa melko kallista, ennen kuin tuotantolaitokset alkavat tuottaa suurempia määriä.

Polttokennoajoneuvojen paikka Suomen autokannassa on toisaalta hyvin perusteltu, sillä Suomessa, jossa välimatkat ovat usein pitkiä ja sääolosuhteet välillä hyvinkin kylmiä, voisi kyseinen tekniikka olla järkevä joissain sovelluksissa.

Raskaassa kalustossa potentiaali tällä tekniikalla on suurin, mm. sen akku-käyttöistä vastiketta kevyemmän painon, sekä nopeamman tankkausajan vuoksi. Raskas kalusto tuottaa suuren osan liikenteen hiilidioksidipäästöistä, ja näin ollen sen päästöjen vähentäminen on tärkeä kohde. Teknologiaa on nähty otettavan käyttöön erilaisissa pilottikokeiluissa ympäri maailmaa, ja monet valmistajat ovat erityisen kiinnostuneita nimenomaan raskaan kaluston sovelluksista. Henkilöautokäytössä hyötyjä ei nähdä aivan yhtä tärkeinä, sillä niiden kokoluokassa täyssähköisten autojen akkujen paino pystytään pitämään maltillisena, ja kokonaishyötysuhde on akkukäyttöisissä autoissa vielä huomattavasti polttokennoa parempi.

Vaikka polttokennotekniikka painottuisikin pääosin raskaaseen kalustoon, tulee vihreän vedyn valmistus silti olemaan tärkeässä roolissa Suomen tulevaisuudessa. Pelkästään teollisuuden fossiilisen vedyn käytön korvaaminen vihreällä vedyllä on jo yksinään tavoite, jolla saadaan Suomen hiilidioksidipäästöjä alennetuksi huomattavasti. Vihreän vedyn avulla pystyttäisiin siirtymään pois fossiilista lähteistä, kuten maakaasusta teräksen valmistuksessa, mikä taas edesauttaa Suomea ilmastotavoitteiden saavuttamista. Myös P2X-ratkaisut tulevat olemaan tärkeä osa nykyisten fossiilisten polttoaineiden korvaamisessa lähivuosina.

Koska täyssähköisten autojen akustojen materiaalista ei ainakaan vielä tänä päivänä pystytä kierrättämään kuin noin puolet, ovat ne käyttöikänsä loppuun tultua huomattava ympäristöhaitta. Akkuteknologian vaatimista mineraaleista, erityisesti koboltista ja nikkelistä, saattaa myös tulla pulaa, jos ja kun yhä suurempi osa uusista autoista muuttuu sähköiseksi.

Vedyllä on tieliikenteen lisäksi useita erilaisia sovelluksia, joita parhaillaan tutkitaan. Näitä löytyy esimerkiksi laivoista, lentokoneista sekä raideliikenteestä. Myös avaruusteknologiassa polttokennoja on käytetty alusta asti.

Vety ja akkuteknologia tulevat molemmat omalta osaltaan muuttamaan maailmaa vähäpäästöisemmäksi, mutta molemmat vaativat hiilidioksidivapaata sähköä ollakseen oikeasti ympäristöystävällisiä. Näin ollen suurimpia tavoitteita Suomella tulisikin olla koko sähköverkon muuttaminen päästöttömäksi, tulipa tulevaisuuden autoihin sitten käyttöön kumpi tahansa voimanlähde.

Lähteet

Alternative Fuels Data Center 2022. Fuel Cell Electric Vehicles. Viitattu 15.4.2022 https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html

BBC 2022. Climate change: EU moves to label nuclear and gas as sustainable despite internal row. Viitattu 1.5.2022 <https://www.bbc.com/news/world-europe-60229199>

BMW AG 2021. The iX. Viitattu 21.12.2021 <https://www.bmw.fi/fi/mallisto/i-yhteenveto/bmw-ix/2021/bmw-ix.html#range>

BMW Group 2022. BMW iX5 Hydrogen Defies the Extreme Cold. Viitattu 8.4.2022 <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2022/bmw-ix5-hydrogen.html>

Bosch 2020a. Fuel Cell Electric Drive, Bosch Mobility Solutions. Viitattu 20.12.2021 <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/powertrain/fuel-cell-electric/fuel-cell-electric-vehicle/>

Bosch 2020b. Polttokennot tarjoavat hiilineutraalia voimansiirtoa pitkän matkan liikkumiselle tulevaisuudessa, Bosch. Viitattu 22.11.2021 <https://www.bosch.fi/uutisia-ja-tarinoita/polttokennot-tarjoavat-hiilineutraalia-voimansiirtoa/>

Business Finland 2020. Kansallinen vetytiekartta ohjaa Suomea kohti hiilineutraalisuutta. Viitattu 22.11.2021 <https://www.businessfinland.fi/ajankohtaista/uutiset/tiedotteet/2020/kansallinen-vetytiekartta-ohjaa-suomea-kohti-hiilineutraalisuutta>

CNBC 2019. Elon Musk says the tech is 'mind-bogglingly stupid,' but hydrogen cars may yet threaten Tesla. Viitattu 14.3.2022. <https://www.cnbc.com/2019/02/21/musk-calls-hydrogen-fuel-cells-stupid-but-tech-may-threaten-tesla.html>

Costello, M. 2021. Hyundai's billion-dollar fuel-cell expansion detailed, CarExpert. Viitattu 2.1.2022 <https://www.carexpert.com.au/car-news/hyundais-billion-dollar-fuel-cell-expansion-detailed>

Cummins Inc. 2020. Batteries and Fuel Cells: Understanding Differences and Opportunities. Viitattu 6.6.2022. <https://www.cummins.com/news/2020/05/14/batteries-and-fuel-cells-understanding-differences-and-opportunities>

Daimler 2021. Daimler Truck AG and Volvo Group fully committed to hydrogen-based fuel-cells – launch of new joint venture Cellcentric, Daimler AG. Viitattu 18.11.2021 <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Truck-AG-and-Volvo-Group-fully-committed-to-hydrogen-based-fuel-cells--launch-of-new-joint-venture-cellcentric.xhtml?oid=49834035>

Demaco 2022. The Energy Density of Hydrogen: A Unique Property. Viitattu 24.5.2022 <https://demaco-cryogenics.com/blog/energy-density-of-hydrogen/>

Eurooppa-neuvosto 2020. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma. Viitattu 16.1.2022 <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/eu-plan-for-a-green-transition/>

European Commission 2020. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Viitattu 21.12.2021 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf

Fortum 2021. Vetytalous tulee ennemmin tai myöhemmin. Viitattu 20.12.2021 <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

FuelCellsWorks 2021. Japan: Government to Build Small Hydrogen Stations. Viitattu 13.4.2022 <https://fuelcellsworks.com/news/japan-government-to-build-small-hydrogen-stations/>

H2 Mobility 2021. Viitattu 24.11.2021 <https://h2.live/en/>

Hyundai 2022. Nexo Features Viitattu 25.4.2022

<https://www.hyundai.com/eu/models/nexo/features.html>

Hyundai 2021. Raskas liikenne sähköistyy – vedyllä kulkevaan Hyundai XCIENT -kuorma-autoon mallipäivitys. Viitattu 15.2.2022

<https://www.hyundai.fi/raskas-liikenne-sahkoistyy-vedylla-kulkevaan-hyundai-xcient-kuorma-autoon-mallipaivitys/>

Ingersoll, E. & Gogan, K. 2020. Missing Link to a Livable Future: How Hydrogen-Enabled Synthetic Fuels Can Help Deliver the Paris Goals, Lucid Catalyst. Viitattu 25.5.2022

https://www.lucidcatalyst.com/files/ugd/2fed7a_f532181b09b2455f9f5eecfc97c_c58ea.pdf

Kossila, E. 2021. Naantalin voimalaitoksen alueelle suunnitellaan vedyn tuotantolaitosta, YLE. Viitattu 18.11.2021 <https://yle.fi/uutiset/3-12118185>

Kuner, S. 2021. Wie funktioniert eine Brennstoffzelle? EnergieDienst, Viitattu 29.12.2021 <https://blog.energiesdienst.de/brennstoffzelle-wasserstoffauto/>

Lanz, W. 2001. Hydrogen Properties, Energy.gov. U.S. Department of Energy, College of the Desert. Viitattu 17.11.2021

<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fcm01r0.pdf>

Lappalainen, E. 2021. Suuromistaja Ilkka Herlin vauhdittaa vetymurrosta miljoona-sijoituksella, Helsingin Sanomat 15.12.2021. Saatavilla:

<https://www.hs.fi/visio/art-2000008474653.html?share=68172f45f6b06bc70b6e391c7f6b5d2f>

Larminie, J.; Dicks, A. 2003. Fuel Cell Systems Explained 2nd edition John Wiley & Sons Ltd, Saatavilla: https://sv.20file.org/up1/482_0.pdf

Laurikko, J.; Ihonen, J.; Kiviaho, J.; Himanen O.; Weiss, R.; Saarinen, V.; Kärki, J & Hurskainen, M. 2020. National Hydrogen Roadmap for Finland, Business Finland ISSN 1797-7339. Saatavilla:

https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf

Motiva 2020. Polttokennoautot. Viitattu 17.11.2021

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/nain liikut viisaasti/valitse auto viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/polttokennoautot](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/polttokennoautot)

O'Hayre, R.; Cha, S.; Colella, W. & Prinz F.B. 2016. Fuel cell fundamentals. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley John Wiley & Sons, Incorporated, [E-kirja]

Viitattu 5.2.2022. Saatavilla

https://tuos.alma.exlibrisgroup.com/view/uresolver/358TUOAS_INST/openurl?u.ignore_date_coverage=true&rft.mms_id=995562640305970

Parviala, A. 2021. Visiot ovat muuttumassa todeksi juuri nyt: Vihreä vety on tuomassa ennennäkemätöntä mullistusta Suomen teollisuuteen ja energian tuotantoon, YLE. Viitattu 18.11.2021 <https://yle.fi/uutiset/3-11841773>

Pitkänen, K. 2021. Ensimmäiset vetyasemat aukeavat vuonna 2023 – loppumaton energialähde ratkaisisi liikenteen päästöongelmat kerralla, jos vety tuotettaisiin vihreällä sähköllä, Kaleva. Viitattu 9.1.2022

<https://www.kaleva.fi/ensimmaiset-vetyasemat-aukeavat-vuonna-2023-loppum/3907177>

Plumer B & Tabuchi H. 2021. 6 Automakers and 30 Countries Say They'll Phase Out Gasoline Car Sales, The New York Times. Viitattu 11.12.2021

<https://www.nytimes.com/2021/11/09/climate/cars-zero-emissions-cop26.html>

Ren-Gas 2021. Lahti Energia ja Nordic Ren-Gas allekirjoittivat yhteistyösopimuksen Suomen suurimman vetytalouskeskittymän

kehittämisestä, Viitattu 29.1.2022 <https://ren-gas.com/ajankohtaista/lahti-energia-ja-nordic-ren-gas-allekirjoittivat-yhteistyosopimuksen-suomen-suurimman-vetytalouskeskittyman-kehittamisesta/>

Salonen J. 2021. VW-pomo tarjoi täystyrmäyksen vetyautoille – ”Liikenne sähköistyy, eikä valheille jää sijaa” Kauppalehti. Viitattu 8.4.2022

<https://www.kauppalehti.fi/uutiset/vw-pomo-tarjoili-taystymayksen-vetyautoille-liikenne-sahkoistyy-eika-valheille-jaa-sijaa/c101ad45-8cad-416d-8c40-ef6da9d876f3>

Sieppi S. 2021. Neste saa rahoitusta EU:n innovaatorahastolta Porvoon jalostamon kehittämiseksi vihreän vedyn tuotantoon ja hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin, Neste. Viitattu 15.12.2021

<https://www.neste.fi/tiedotteet-ja-uutiset/innovaatio/neste-saa-rahoitusta-eun-innovaatorahastolta-porvoon-jalostamon-kehittamiseksi-vihrean-vedyn-tuotantoon-ja-hiilidioksidin-talteenottoon-ja-varastointiin>

TEM 2019. Sähkötuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050. Viitattu 15.4.2022.

<https://tem.fi/documents/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93+selvitys+22.2.2019.pdf/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93+selvitys+22.2.2019.pdf?t=1554467670000>

Toyota Europe Newsroom 2020. Introducing the all-new Toyota Mirai. Viitattu 9.4.2022 <https://newsroom.toyota.eu/introducing-the-all-new-toyota-mirai/>

Transport Environment 2021. Comparison of hydrogen and battery electric trucks. Viitattu 9.4.2022 https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2020_06_TE_comparison_hydrogen_battery_electric_trucks_methodology.pdf

U.S. Department of Energy 2021. DOE Hydrogen Program Record, Hydrogen Fueling Stations Cost. Viitattu 1.5.2022

<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf>

Valtioneuvosto 2021. Suomen kestävä kasvun ohjelma, alustava elpymis- ja palautussuunnitelma, Valtioneuvoston julkaisuja 2021:22. Viitattu 14.5.2022

https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163176/VN_2021_52.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Vartiainen, E. 2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin, Fortum.

Viitattu 6.3.2022 <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Qin, S.; Duan, Y.; Zhang, X; Zheng, L.; Gao, F.; Yang, P.; Niu, Z.; Liu, R.; Yang, Y.; Zheng, X. & Zhu, J. 2021. Ternary nickel–tungsten–copper alloy rivals' platinum for catalyzing alkaline hydrogen oxidation, Nature Communications 12 (2686). Viitattu 20.12.2021 <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22996-2>

Wired 2021. The Wired Brand Lab Guide to Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles, Wired Insider. Viitattu 20.12.2021 <https://www.wired.com/sponsored/story/the-wired-brand-lab-guide-to-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles/>