



Riku Pispala

Polttokennoautot ja vetytalous

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinööriyö

25.11.2021

Tiivistelmä

| | |
|-----------------------|--|
| Tekijä: | Riku Pispala |
| Otsikko: | Polttokennoautot ja vetytalous |
| Sivumäärä: | 25 sivua + 2 liitettä |
| Aika: | 25.11.2021 |
| Tutkinto: | Insinööri (AMK) |
| Tutkinto-ohjelma: | Ajoneuvotekniikka |
| Ammatillinen pääaine: | Autosähkötekniikka |
| Ohjaajat: | Lehtori, Ajoneuvo- ja konetekniikka Pasi Kovanen |

Tässä insinööriyössä esitellään polttokennojen toimintaa ja kehitystä. Työssä myös otetaan kantaa polttokennoautoihin. Lisäksi esitellään polttokennojen historiaa sekä tarkastellaan vetyä ja sen jakeluverkostojen mahdollista infrastruktuuria ja teoreettista rakentamista. Tavoitteena oli kartuttaa tietoa vedystä energianlähteenä, vetytaloudesta, polttokennoista sekä polttokennoautoista. Työssä tuodaan esille polttokennojen sekä vetytalouden hyviä ja huonoja puolia, teoriaa polttokennojen toiminnasta sekä erilaisista polttokennomalleista.

Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, minkä lisäksi haastateltiin kahta eri alan ammattilaista. Haastattelut koskivat vetyä, polttokennoautoja sekä vetytankkausta. Asiantuntijoiden kanssa pohdittiin vedyn nykytilaa ja tulevaisuutta. Haastateluissa sivuttiin vedyn hyödyntämisen niin hyviä kuin huonoja puolia. Polttokennoautojen osalta keskusteltiin korjaamojen erityisistä tarpeista ja uuden teknologian asettamista vaatimuksista. Lisäksi pohdittiin Suomen vetytankkausasemien menestystä.

Työssä todetaan vedyn olevan ympäristöystävällinen energianlähde. Maailmalla tulevaisuus vedyn osalta näyttää lupaavalta. Suomessa ollaan vedyn hyödyntämisessä selkeästi jäljessä. Johtopäätös työstä on, että tulevaisuudessa tarvitaan ympäristöystävällisempiä energianlähteitä ja vetyyn tullaan panostamaan entistä enemmän sähkö- ja polttokennoautojen rinnalla.

Avainsanat: Vety, polttokenno, polttokennoauto, polttokennotyypit, vetytankkaus

Abstract

Author: Riku Pispala
Title: Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Economy
Number of Pages: 25 + 2
Date: 25 November 2021

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Pasi Kovanen, Senior Lecturer, School of Automotive and Mechanical Engineering

This Bachelor's thesis presents operation and development of fuel cells. The thesis also discusses fuel cell vehicles. In addition, the history of fuel cells is presented, as well as the possible infrastructure and theoretical construction of hydrogen and its distribution networks. The objective was to increase knowledge about hydrogen as an energy source, the hydrogen economy, fuel cells and fuel cell vehicles. The thesis presents the pros and cons of fuel cells and the hydrogen economy, the theory of the operation of fuel cells and different fuel cell models.

The thesis was carried out as literature research, in addition to which two professionals from different fields were interviewed. The interviews included hydrogen, fuel cell vehicles and hydrogen fueling. The current state and the future of hydrogen were discussed with the experts. Both the pros and cons of hydrogen utilization were discussed in the interviews. Fuel cell vehicles, the specific needs of car repair shops and the requirements of new technology were also discussed. In addition, conversations about the success of hydrogen fueling stations in Finland were included in the interview discussions.

The thesis states that hydrogen is a sustainable source of energy. The future for hydrogen looks promising. Finland is clearly behind in terms of utilizing hydrogen. The conclusion of the thesis is that in the future more environmentally friendly energy sources will be needed. Hydrogen will receive more attention alongside with electric and fuel cell vehicles.

Keywords: Hydrogen, Fuel cell, Fuel cell cars,
Hydrogen refueling, Sustainable

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Polttokennojen historia | 1 |
| 3 | Vedyn historiaa | 4 |
| 4 | Polttokennojen toiminta | 4 |
| 5 | Polttokennotyypit | 6 |
| 5.1 | PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), fosforihappopolttokenno | 9 |
| 5.2 | MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), sulakarbonaattipolttokenno | 9 |
| 5.3 | SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), kiinteäoksidipolttokenno | 9 |
| 5.4 | AFC (Alkaline Fuel Cell), alkalipolttokenno | 10 |
| 5.5 | PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), protoninvaihtokalvopolttokenno | 10 |
| 5.6 | DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), suora metanolipolttokenno | 11 |
| 5.7 | Elektrolyysi | 11 |
| 6 | Polttokennoautot | 12 |
| 6.1 | Polttokennojen energiatehokkuus | 13 |
| 6.2 | Vetytankin turvallisuus | 15 |
| 7 | Vetytalous | 16 |
| 7.1 | Vetytalouden edut | 17 |
| 7.2 | Vetytalouden haasteet | 18 |
| 7.3 | Vetyraati | 19 |
| 7.4 | Matka kohti hiilettömyyttä | 19 |
| 8 | Asiantuntijahaastattelut | 21 |
| 8.1 | Haastatteluiden tavoite | 21 |
| 8.2 | Keskeiset havainnot ja johtopäätökset | 22 |
| 9 | Pohdinta | 24 |

Liitteet

Liite 1: Haastattelu Pekka Karvinen 5.5.2021

Liite 2: Haastattelu Olli Bergmann 24.9.2021

Lyhenteet

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell, polttokennotyyppi.

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell, polttokennotyyppi.

AFC: Alkaline Fuel Cell, polttokennotyyppi.

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell, polttokennotyyppi.

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell, polttokennotyyppi.

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell, polttokennotyyppi.

HHV: Higher heating value, kalometrinen lämpöarvo eli ylempilämpöarvo vakiotilavuudessa.

LHV: Lower heating value, tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa.

1 Johdanto

Polttokennoteknologia on noussut yhdeksi merkittäväksi vaihtoehdoksi ympäristöystävällisenä tapana hyödyntää vetyä energianlähteenä. Vety on nousemassa entistä merkittävämpään rooliin muiden energialähteiden rinnalle. Aiheesta kirjoitetaan eri medioissa paljon, mutta arkinen käyttö on vielä vedyn mahdollisuuksiin nähden vähäistä. Ympäristön merkitys näkyy kaikessa teollisuuden toiminnassa jatkuvasti enemmän erilaisten rajoitteiden ja pakotteiden muodossa, sitä ei voi vähätellä. Polttokennoteknologiassa ja vedyn hyödyntämisessä nähdään paljon mahdollisuuksia muiden energianlähteiden korvaajana.

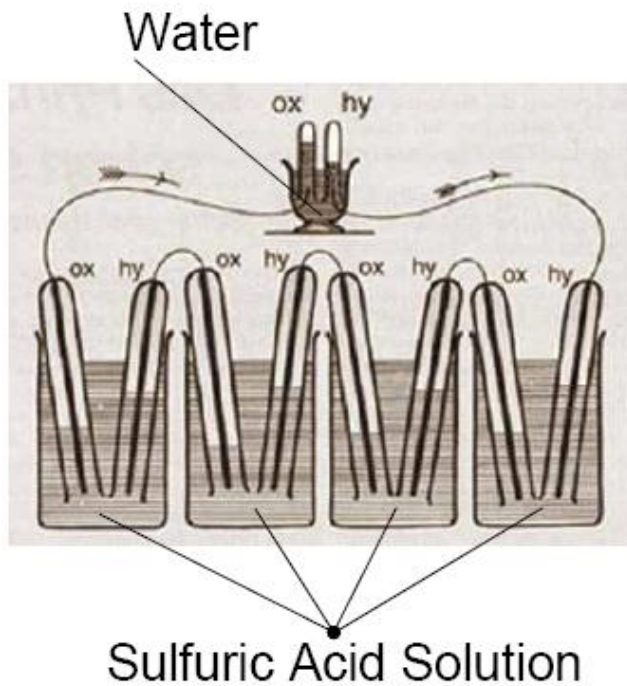
Opinnäytetyön tavoite on kertoa polttokennojen toiminnasta, kehityksestä ja niin hyvistä kuin huonoista puolista sekä ottaa kantaa myös polttokennoautoihin. Työ käsittelee myös polttokennojen historiaa, vetyä ja sen jakeluverkostojen mahdollista infrastruktuuria kirjallisuuskatsauksen muodossa.

Opinnäytetyössä käytettiin yhtenä tutkimusmenetelmänä avointa haastattelua. Avoimessa haastattelussa vuorovaikutus on käytännössä vapaata keskustelua. Opinnäytetyössäni haastattelin autoalan sekä kaasualan ammattilaista polttokennoista, polttokennoautoista sekä vedystä. Haastattelut tehtiin etäyhteydellä, ja haastatelluille lähetettiin kysymykset etukäteen. Toinen haastattelu tapahtui puhelimen välityksellä ja toinen Teams-palaverissa. Opinnäytetyöhön saatiin laajempi näkökulma ottamalla mukaan haastateltujen ajatuksia.

2 Polttokennojen historia

Polttokennon keksi saksalainen Christian Friedrich Schönbein jo vuonna 1838. Seuraavana vuonna artikkeli kennosta julkaistiin Philosophical magazine lehdessä. Samana vuonna myös englantilainen Sir William Grove julkaisi Philosophical lehteen polttokennon toimintaperiaatteen (kuva 1). Yksityiskohtaisen ku-

vauksen polttokennosta Sir William Grove julkaisi vuonna 1842 jonka vuoksi hänet muistetaan modernin polttokennon isänä. Insinööri nimeltä Francis Thomas Bacon rakensi ensimmäisen käytännöllisen polttokennon vuonna 1959. Miehitetyissä Apollo-kuulennoissa käytettiin polttokennoja vuonna 1960. Kuvassa 2. Sir William Grove (1811–1896). [History 2021; Sir William Robert Grove 2020.]



Kuva 1. William Groven kuvaus polttokennosta 1839 (William Robert Grove's Fuel Cells 2017).



Kuva 2. Sir William Groven henkilökuva (Sir William Robert Grove Corrosion Doctors 2020).

Polttokenno-termini sai alkunsa vuonna 1889 kun Ludwig Mond ja Charles Langer yrittivät rakentaa ensimmäisen käytännöllisen polttokennon. Pastori William Cecil ehdotti ensimmäisenä vedyn käyttöä moottorin polttoaineena jo vuonna 1820. Myöhemmin vuonna 1874 tieteilijä Jules Verne kirjoitti: "Polttoaine, jota käytetään hiilen loputtua, on vesi mutta hajotettuna osasikseen. Hajottamiseen käytetään epäilemättä sähköä." Valitettavasti hän ei ikinä paljastanut veden hajottamiseen suunnittelemaansa primäärienergianlähdettä. [History 2021; Sir William Robert Grove 2020].

Polttokennot alkoivat kadota energiatuotannon tekniikoista, mutta kiinnostus polttokennoja kohtaan alkoi nousta taas 1990-luvun jälkipuolella. Vasta 2000-luvulla ihmiset ovat alkaneet ymmärtää polttokennon laajat käyttömahdollisuudet matkapuhelimista jopa laivoihin asti. Polttokennoa voidaan hyödyntää monin eri tavoin esimerkiksi sähkön ja lämmön tuottamiseen. Polttokennojen laajan käytön esteenä on lähinnä tiedon puute sekä kehitys- ja tuotantokustannukset ja polttokennoissa käytettävien polttoaineiden jakeluverkostojen puuttuminen. Tulevaisuus polttokennoja sekä vetyä kohtaan näyttää kuitenkin erittäin lupaavalta. [History 2021; Sir William Robert Grove 2020].

3 Vedyn historiaa

Vedyn löysi sattumalta 1500-luvulla sveitsiläinen alkemisti, lääkäri ja astrologi Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim. Philippus teki löydön sulattamalla metallia hapolla, josta syntyi kaasua, jota me kutsumme vedyksi. Philippus havaitsi vedyn olemassaolon, vaikka ei vielä tiennyt, mistä on kyse. (Kelola 2021: 12.)

Varsinaisen vedyn löytäjän tittelin on saanut englantilainen fyysikko ja kemisti Henry Cavendish. Hän osoitti vuonna 1766 suorittamissaan kokeissa, että hänen nimittämänsä ”palava ilma” eli vety erosi muista kaasuista. Muutama vuosi myöhemmin Cavendish todisti, että palaessa vety muodostaa vettä. Palava ilman nimesi vedyksi vuonna 1700-luvun ranskalainen kemisti nimeltä Antoine Lavoisier. Vety on nimetty kreikan kielen sanan hydrogene mukaan, joka tarkoittaa vedenmuodostajaa. Ennen 1900-lukua ei vedylle ollut vielä keksitty juuri käyttökohteita ilmalaivan sekä kalkkivalojen lisäksi. (Kelola 2021: 12.)

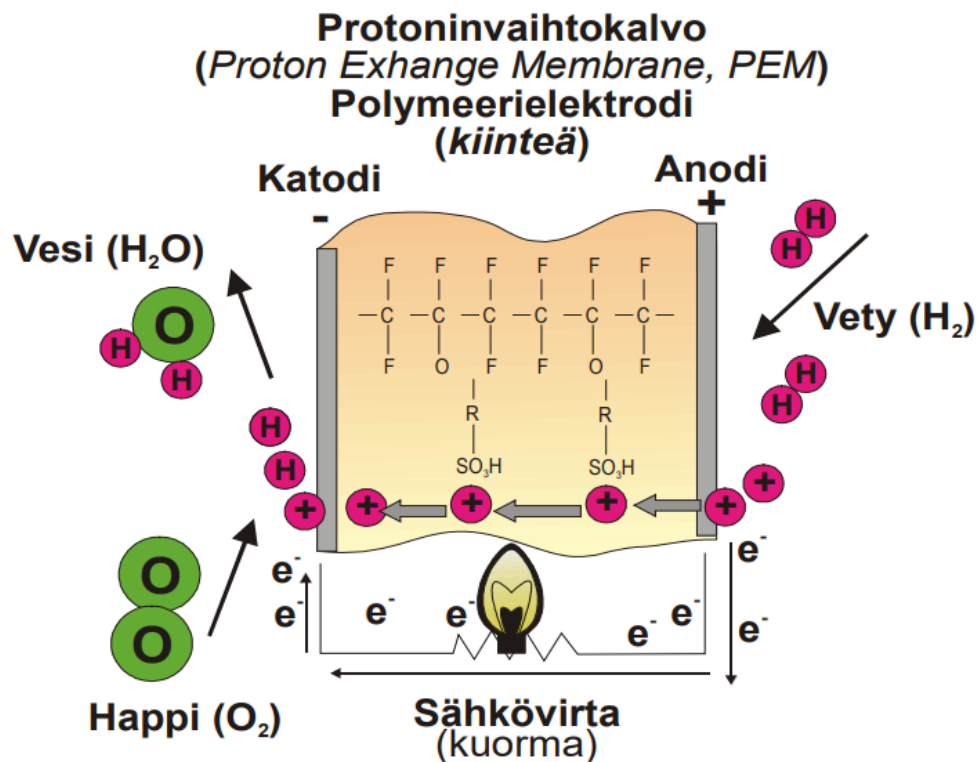
4 Polttokennojen toiminta

Polttokennojen toiminta perustuu kennoon tuotavan aineen reaktioon (kuva 3). Katodille lisätään ilmaa ja anodiin tuodaan poltettavaa ainetta, kuten vetyä, maakaasua tai metanolia. Anodilla elektronit vapautetaan hapettamalla polttoaine ja viedään katodille, missä ilma pelkistyy. Kennon sisällä olevan kalvon tehtävä on erottaa anodi ja katodi sekä estää polttoaineen palaminen. Kalvo päästää läpi vain protonin. Reaktiosta syntyy vettä ja sähköä. Erilaisista kennoista voi tulla lopputuotteena esimerkiksi hiilidioksidia sekä hiilimonoksidia. Päästöt ovat kuitenkin aina paljon alhaisemmat verrattuna perinteiseen polttomoottoriin. (Sohlberg 2013: 15.)

Elektrolyytti määrittää kennon sisäisen toimintalämpötilan. Kennojen toiminta on täysin kemiallista. Kennotyypistä riippuen voidaan reaktion nopeuttamiseen käyttää katalyyttejä. Polttokennot toimivat niin kauan kuin niihin syötetään polt-

toainetta eli niitä ei tarvitse ladata kuten akkuja. Elektrolyytti voi olla joko neste-
mäinen tai kiinteä. Katalyyttinä käytetään usein platinaa. Polttokennojen valmis-
tuskustannukset ovat vielä korkeat, mutta erilaisia halvempia katalyytti vaihtoehtoja
kehitetään jatkuvasti. Polttokennorakenteessa kennoja voidaan kytkeä ak-
kujen tapaan sarjaan, jolloin saadaan aikaan suurempi jännite. Yhden kennon
tuottama jännite on pieni, 0,5–1,5 V, riippuen kennotyypistä. Yksittäistä kennoa
kutsutaan termillä MEA (membrane electrode assembly). Kennot yhdistetään
sarjaan kennostoksi, jolla saadaan jännite nousemaan. (Sohlberg 2013: 15.)

PEM-polttokennon toiminta



Kuva 3. PEM-polttokennon toiminta (Laurikko 2015).

5 Polttokennotyypit

Polttokennot luokitellaan joko käytettävän polttoaineen tai niissä olevan elektrolyytin mukaan. Taulukko 1 sisältää erilaisia polttokennotyyppejä sekä niiden spesifikaatioita. Polttoaineita voivat olla muun muassa vetykaasu, metanoli, NH_3 , butaani, propaani, diesel. (Alanen ym. 2003: 54.)

Taulukko 1. Erilaisia polttokennotyyppejä (Alanen ym. 2003: 54–55).

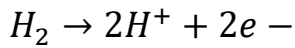
| Tyyppi | PAFC | MCFC | SOFC | AFC | PEMFC | DMFC |
|----------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|----------|--------------|-------------------------------|
| Elektrolyytti | Fosforihappo | Sulakarbonaatti | Keraaminen materiaali | KOH | Polymeeri | Polymeeri |
| Lämpötila | 175–200, 190 °C | 600–1000, 650°C | 600–1000, 1000°C | 65–220°C | 60–100, 80°C | 80–100°C 20 ± 50°C |
| Polttoaine | H_2 | H_2, Co | $H_2, \text{CO}, \text{CH}_4$ | H_2 | H_2 | Metanoli (CH ₃ OH) |
| Hapetin | O_2 | $O_2 + \text{CO}_2$ | O_2 | O_2 | O_2 | O_2 |
| Varauksen kuljettaja | H^+ | CO_3^{2-} | O^{2-} | OH | H^+ | H^+ |
| Katalyytti | Platina | Nikkeli | Nikkeli | Platina | Platina | Platina, ruteeni |

| Tyyppi | PAFC | MCFC | SOFC | AFC | PEMFC | DMFC |
|-------------|---|---|---|--|---|---|
| Teho esim. | 200 kW (11 MW) | 2 MW (100 MW) | 220 kW | 300 W–5 kW | 1000 W–10 MW | 1–100 kW |
| Hyötysuhde | 40–50 % | 50–60 % | 45–55 % | 89 % | 40–50% | 70 % |
| Käyttökohde | Sähkönjakelu, kuljetus | Sähkönjakelu, CHP-tuotanto | Sähkönjakelu, CHP-tuotanto | Avaruustekniikka, sota tekniikka | Sähkönjakelu, kannettavat, kuljetus, CHP-tuotanto | Kulutustuotteet, kuljetus |
| Edut | jopa 85 % hyötysuhde lämmön ja sähkön yhteistuotannossa, epäpuhdas H ₂ käy | Korkea lämpötila: Voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita ja halpaa katalyyttiä | Korkea lämpötila: Voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita ja halpaa katalyyttiä | Nopea reaktio | Matala lämpötila: Nopea käynnistys, kiinteä elektrolyytti | Ei tarvita erillistä polttoaineen reformeria, pieni koko, edullinen |
| Haitat | Iso koko, platina katalyytti, pieni teho ja virta | Korkea lämpötila vaativa komponenteille | Korkea lämpötila vaativa komponenteille | Ilman CO ₂ vähentää elektrolyytin | Matala lämpötila vaatii kalliin katalyytin, puhdas polttoaine | CO ₂ |

Kemiallisten polttokennojen lisäksi on myös biologisia polttokennoja. Toimintaperiaate on muuten samanlainen, mutta biologisissa polttokennoissa on katalyytti. Ne sisältävät joko mikro-organismien tai entsyymien, ja reaktiot tapahtuvat huoneenlämpöisessä neutraalissa liuoksessa. Yleisin polttokennojen polttoaine

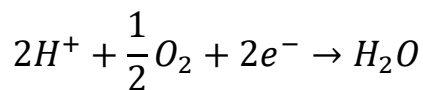
on kuitenkin vety. Vety ja happi -tyyppisen kennon anodilla hajotetaan vety, jonka seurauksena vapautuu elektroneja. (Alanen ym. 2003: 55.)

Kaava 1.



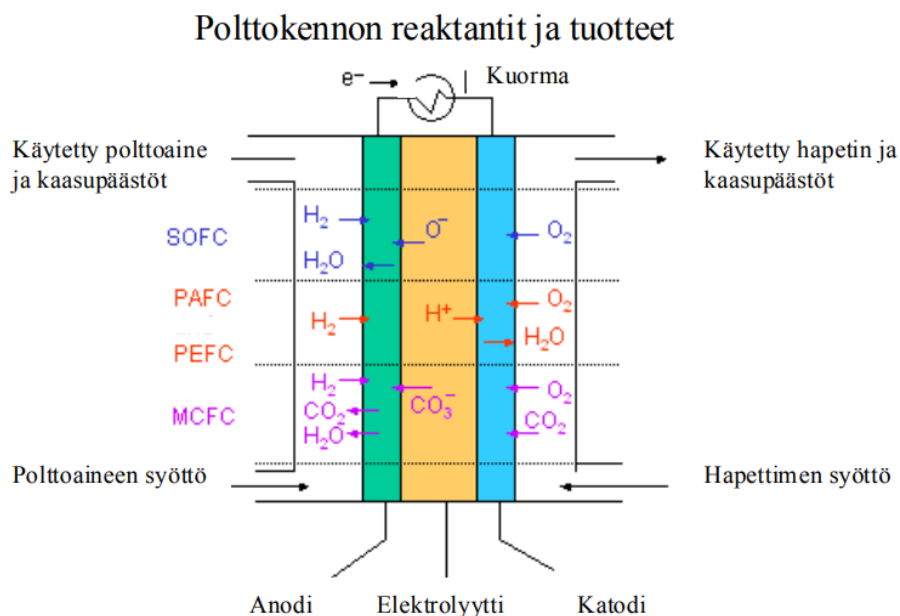
Platinapinnoitteisella katodilla yhdistetään happi, vety sekä elektrodit. Reaktiosta muodostuu vettä ja lämpöä. (Alanen ym. 2003: 55.)

Kaava 2.



Etanoli- ja metanolikäyttöisissä kennoissa ei tarvita erillistä reformeria. Kemiallinen reaktio toteutetaan suoraan polttokennon kalvolla. (Alanen ym. 2003: 55.)

Kuvassa 4 kiteytettynä polttokennon reaktantit ja tuotteet.

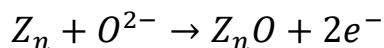


Kuva 4. Polttokennon reaktantit ja tuotteet (Alanen ym. 2003: 56).

Metalli-ilmapolttokennot eroavat vety-happipolttokennoista siten, että anodi voi kulua loppuun ja se voidaan kemiallisesti päällystää uudelleen eli "varata". Esimerkiksi sinkki-ilmapolttokennoissa anodi on sinkkiä, jonka tarkoitus on oksidoida hapen kanssa. (Alanen ym. 2003: 57.)

Sinkki-ilmapolttokennon kennoreaktio on esitetty kaavassa 3.

Kaava 3.



5.1 PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), fosforihappopolttokenno

Fosforihappopolttokennoissa katalyytti on platinaa ja elektrolyytinä toimii fosforihappo. Kennojen toiminta lämpötila on 150–220 °C. (Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020.)

5.2 MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), sulakarbonaattipolttokenno

MCFC-kennoissa käytetään vedyn lisäksi myös kevyitä hiilivetypolttokaasuja, kuten metaania. Elektrolyytinä alkalikarbonaattiseos. Lämpötilat ovat polttokennojen korkeimmasta päästä. Kennon toimintalämpö voi ylittää jopa 700 °C. (Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020.)

5.3 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), kiinteäoksidipolttokenno

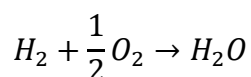
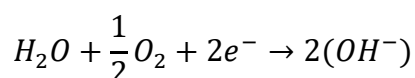
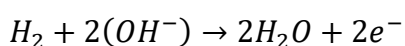
SOFC-kennojen elektrolyytinä toimii yttriumilla stabiloitu zirkoum. Katalyytti on nikkeliä, ja reaktioaineena toimii vedyn lisäksi metaani sekä hiilimonoksidi. Kenno toimii hyvin suurissa paljon voimaa vaativissa sovelluksissa, esimerkkinä laajat sähkökeskukset. Kenno voi toimia jopa lähes 1000 °C:n lämpötilassa sekä saavuttaa melkein 60 %:n hyötysuhteen. (Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020.)

Kiinteäoksidipolttokennosta on myös pienellä lämpötilalla operoiva versio LT-SOFC (Low temperature Solid Oxide Fuel Cell), joka toimii noin 300–600 °C:n välillä. [Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020].

5.4 AFC (Alkaline Fuel Cell), alkalipolttokenno

Alkalipolttokennojen elektrolyytteinä toimii erilaiset alkalit, kuten kaliumhydroksidi tai natriumhydroksidi. Katalyytti on nikkeliä tai hopeaa. Kennon toiminta tapahtuu noin 65–220 °C:n lämpötilassa. [Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020].

Alkalipolttokennon merkittävin ero polymeerikennoon on elektrolyytin läpäisevät hydroksyyli-ionit protonien sijaan. Elektrodireaktiot sekä kokonaisreaktio on esitetty seuraavissa yhtälöissä:



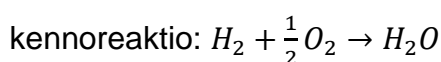
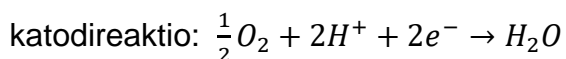
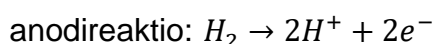
(Aarnio & Leiviskä 2008: 2-6).

5.5 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), protoninvaihtokalvopolttokenno

Protoninvaihtopolttokennoja pidetään kaikkein lupaavimpana kennotyyppinä korvaamaan muita energian lähteitä. Niiden matala toimintalämpötila sekä päästöttömyys korkean hyötysuhteen kanssa tekee siitä erinomaisen ajoneuvokäyttöön. PEMFC-kennot myös käynnistyvät nopeasti. [Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020].

Protoninvaihtopolttokenno toiminta perustuu anodille syötetyn vedyn sekä katodille syötetyn hapen reaktioon, josta syntyy vettä. Elektroodin välissä oleva elektrolyyttikalvon sähkökemiallinen reaktio päästää protonin lävitseen. PEMFC-kennossa elektrolyytti on polymeeriä ja katalyyttinä toimii yleensä platina. Kennot ovat matalalämpöisiä ja toimivat 80–100 °C:n lämpötilassa. (Sohlberg 2013: 19.)

Kennon sisäiset reaktiot ovat seuraavat:



(Aarnio & Leiviskä 2008: 2–6.)

5.6 DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), suora metanolipolttokenno

Elektrolyyttinä toimii polymeeri ja polttoaineena metanoli. Käyttölämpötilat ovat alhaiset. Katalyytti on platinaa tai ruteenia. [Alanen ym. 2003: 55; Polttokennoautot 2020.]

5.7 Elektrolyysi

Elektrolyysin keksijä Michael Faraday kirjoitti keskeisimmät sitä koskevat lait vuonna 1833. Faraday tutki ilmiötä hyvin laajasti ja kiinnostui siitä ollessaan oppipoikana Humphrey Davylle. Humphrey oli ensimmäinen, joka sai veden elektrolyytisesti hajotettua hapeksi sekä vedeksi. Tänä päivänäkin käytetty elektrolyysisanasto on Faradayn kehittämää. (Heikkilä 2013: 8–11.)

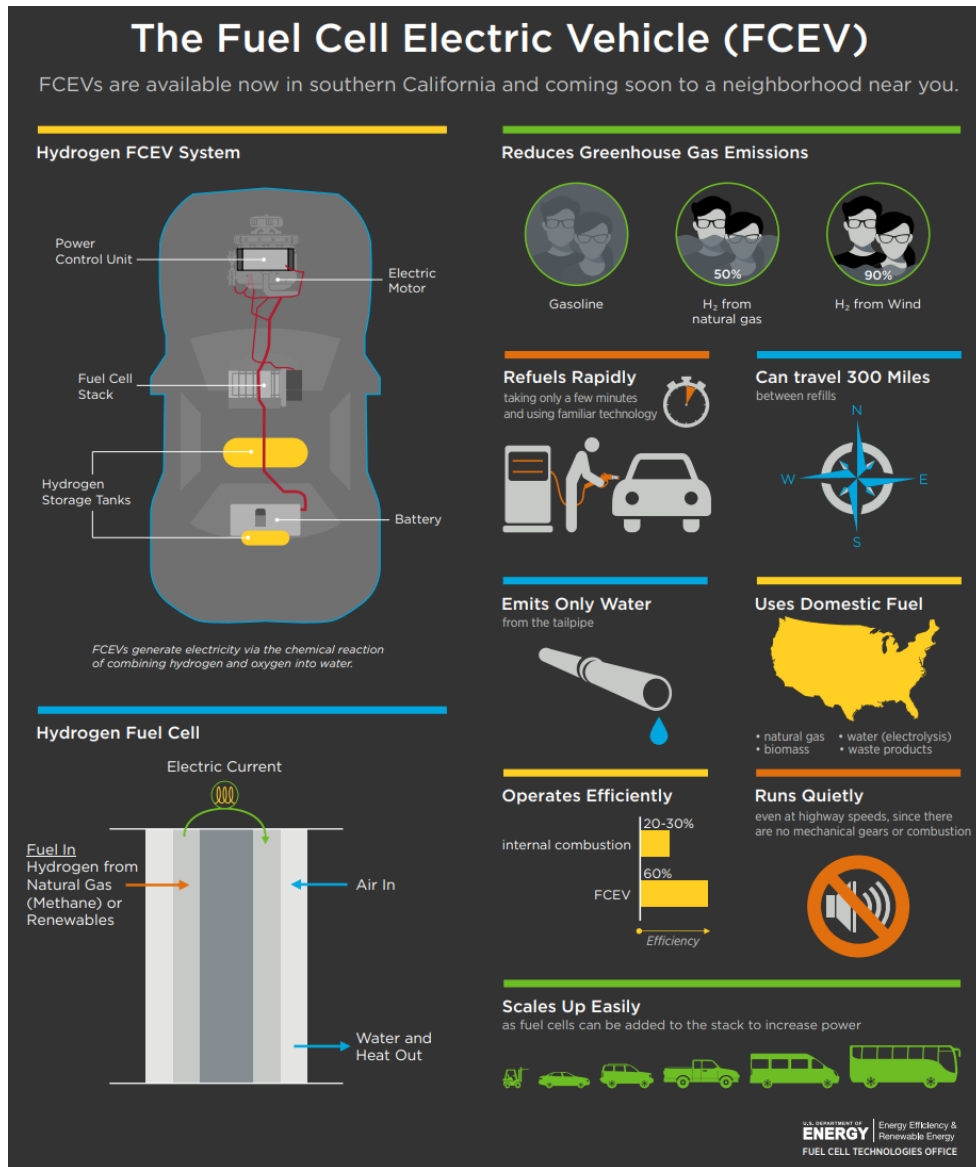
Elektrolyysi tarkoittaa hapettumis-pelkistysreaktiota, joka tapahtuu sähkövirran avulla. Kennon sisällä on kaksi elektrodiä, joiden välissä on elektrolyyttiliuos.

Liuos sisältää liikkumiskykyisiä ioneita. Yleinen sovittu sähkövirran kulkusuunta on positiivisesta negatiiviseen. Elektronien kulkusuunta on sen vastainen. Pelkistymisreaktio tapahtuu kennon katodilla, eli positiiviset ionit kulkevat katodia kohden ja pelkistyvät sen pinnalla. Hapettumisreaktio tapahtuu anodilla, joten liuoksen negatiiviset ionit hapettuvat anodin pinnalla. Elektrolyysillä on monia eri käyttötarkoituksia erilaisten metallien päällystämistä, puhdistamisesta jopa vetykaasun erotteluun vedestä asti. (Heikkilä 2013: 8–11.)

6 Polttokennoautot

Polttokennoautot ovat käytännössä sähköautoja. Tavallisten fossiilisten polttoainoiden sijaan käytetään vetykaasua energian tuottamiseen. Kennolle syötetty vetypolttoaine tuottaa sähköä, lämpöä ja vettä. Tämä kennossa tuotettu sähkö syötetään joko suoraan invertterin kautta sähkömoottorille tai ladataan autossa olevaan akustoon. (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021.)

Vetyautojen toimintamekanismi on verrattavissa täyssähköautoon. Se sisältää samat komponentit kuin täyssähköauto ja lisäksi polttokennon sekä vetysäiliön. Sähkömoottorin takia vetyauton energiatehokkuus on parempi kuin diesel- tai bensiiniauton. Vedyn muuttaminen sähköksi kennon avulla hukkaa kuitenkin energiaa, joten täyssähköauton tasolle energiatehokkuudessa ei päästä. Yleisin ajoneuvokäytössä oleva polttokennotyyppi on PEM eli protoninvaihtopolttokenno. Se sopii parhaiten liikennekäyttöön suuren energiatihedysten ja matalan käyttölämpötilan takia. Siinä on myös lyhyt lämmitysaika. (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021.) Kuvassa 5 on lyhyt tiivistelmä polttokennoautoista.



Kuva 5. Polttokennoauton ominaisuuksia (U.S. Department of energy 2015).

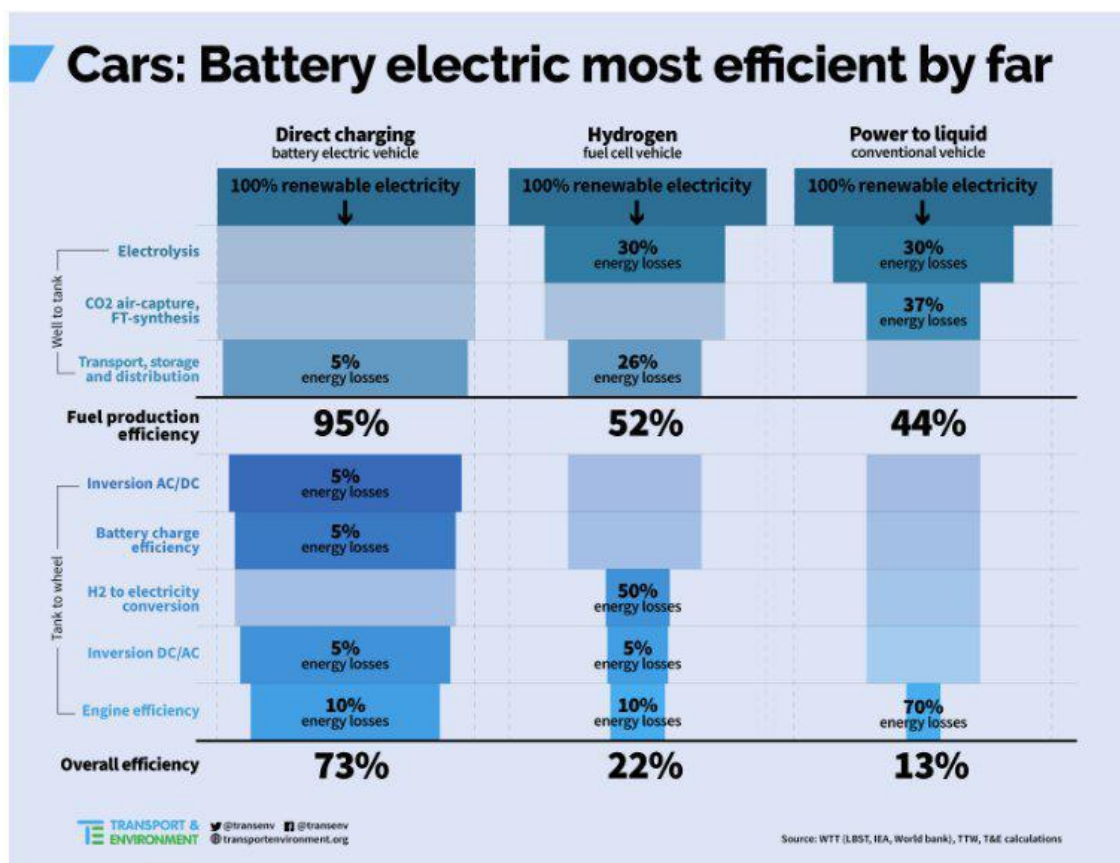
6.1 Polttokennojen energiatehokkuus

Polttokennojen erittäin hyvä ominaisuus on, että niissä ei ole liikkuvia osia, mikä parantaa niiden energiatehokkuutta. Osien staattisuus vähentää huollon tarvetta, mikä soveltuu erittäin hyvin ajoneuvokäyttöön. Polttokennon kokonais-teho muodostuu ympäristöön siirtyvästä lämmöstä ja sen tuottamasta sähkötehosta. Polttokennolla on vähemmän energiahäviökohteita verrattuna polttomoottoriin, eli siinä on parempi hyötysuhde. (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021.)

Polttomoottorissa monimutkaisen mekaanisen tehonsiirron seurauksena polttoaineesta katoaa erilaisiin häviöihin hyvin paljon energiaa. Suurin osa polttoaineen energiasta ei välity tiehen vaan muuttuu lämpöenergiaksi. Uudemmissa moottoreissa häviöt on saatu jatkuvasti pienemmäksi ja kulutus maltillisemmaksi. Useimmissa sähköllä toimivissa autoissa moottori on alennusvaihteiston kautta yhteydessä vetoakseleihin ja siitä renkaiden kautta tienpintaan, joten mekaanisen liikkeen tuottamat energiatappiot ovat pienemmät. Alennusvaihteistolla pudotetaan sähkömoottorin pyörintänopeus vetoakseleille sopivaksi, millä saadaan aikaiseksi suurempi vääntömomentti. Sähkömoottorien teho- ja vääntöalueet ovat riittävän laajoja, niin ettei tavallista vaihteistoa tarvita. (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021.)

Suurin osa tavallisen autoilun energiahäviöstä tapahtuu jo polttoaineen valmistus prosessissa. Raakaöljyn jalostaminen polttoaineeksi pumppaamisen ja kuljetuksen ohella hukkaavat ison osan öljyn potentiaalisesta energiasta. Tämän lisäksi moottorissa sekä vaihteistossa tapahtuvat häviöt saavat energiatehokkuuden putoamaan todella alhaiseksi. Lähes 90 % autoon tankatusta polttoaineesta muuttuu hukkalämmöksi ja vain loppu liikuttaa autoa. (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021.)

Kuvassa 6 vertaillaan polttoaineen tuotannon sekä kulutuksen hyötysuhdetta.



Kuva 6. Cars: Battery electric most efficient by far (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021).

Vetyautoja on Suomessa odotettu jo pitkään. Tekniikkaa ovat kehittäneet niin yksittäiset keksijät kuin tutkimuslaitokset. Matka vetyautoihin ja fossiilisista polttoaineista pois siirtyminen on äärimmäisen mutkikas, mutta monet uskovat, että vedyn aika koittaa vielä. Vedyllä kulkevat autot ovat jopa ympäristöystävällisempiä kuin sähköautot. Suomesta ei löydy ainuttakaan tankkausasemaa, joten polttokennoautoja ei pysty ajamaan vielä. (Sähköauton ylivertainen energiatehokkuus 2021.)

6.2 Vetytankin turvallisuus

Polttokennoautoissa vetytankki on sijoitettuna auton alustassa akselien väliin. Tankit on varmistettu monivaiheisilla turvaohjelmilla sekä testattu useilla eri tör-

mäystesteillä. Onnettomuuden tapahtuessa venttiilit ovat suunniteltu sulkeutumaan välittömästi estäen vedyn jakelun polttokennolle. Vetykaasu on pakattu useampaan pienempään tankkiin auton alustassa. Yleensä noin 2–3 700 bar:n paineista tankkia. Yksi tankki sisältää vetyä vain 4–5 kiloa. (Polttokennoauto 2021.)

Polttokennoautojen käytölle ei ole asetettu rajoituksia maanalaisiin tunneleihin tai parkkihalleihin. Vaurio suuripaineiseen kaasusäiliöön, josta tapahtuu äkillinen paineen vapautus rakenteiden pettäessä, voi synnyttää sisätiloissa huomattavaa vahinkoa. Vety on kaasuna hyvin kevyttä, joten se nousee ylöspäin nopeasti. Paineeton tila täyttyy ylhäältä alaspäin, ja vetykaasu kulkeutuu poistoilmakanaviin. Suljetussa tallissa saa asetuksen 855/2012 mukaan olla enintään 60 litraa polttoainetta ajoneuvosäiliön lisäksi ilman pelastusviranomaisten hyväksyntää. Tilan sisältämässä sammuksalustossa pitää myös ottaa huomioon varastoitu vety. Pelkästään ajoneuvosäiliössä oleva vety ei sisällä mitään erityismääräyksiä; tämä koskee korjaamotiloja sekä pysäköintihalleja. (Kauranen ym. 2013.)

7 Vetytalous

Vetytaloudella tarkoitetaan energian siirtämistä sekä varastointia molekylaarista vetyä käyttäen eli puhutaan maaöljypohjaisten liikennepolttoaineiden korvaamisesta kestävämmällä ratkaisulla. On monia eri tapoja valmistaa vetyä, esimerkiksi elektrolyysillä, jossa erotetaan vesimolekyyleistä happi ja vety toisistaan sähkönenergian avulla (Kelola 2021: 15). Uusiutuva vety on ratkaisu osaan ilmastomuutoksen torjunnan haasteita. Vedyn laajojen käyttömahdollisuuksien takia sillä voidaan vähentää haitallisia päästöjä monilla toimialoilla, jotka tuottavat hiilipäästöjä, esimerkiksi pitkänmatkan kuljetuksissa sekä rauta- ja terästeollisuudessa.

Kriittisimpiin polttoaineisiin kuuluu esimerkiksi öljy, jonka korvaaminen on erittäin vaikeaa sen hyvien ominaisuuksien vuoksi. Koska öljy on nestemäistä sekä

todella kompaktia, se tekee siitä erittäin monikäyttöistä. Lähes kaikki ajoneuvo-liikenne mopojen tai lentokoneiden välillä perustuu melkein täysin öljypohjaisten polttoaineiden hyödyntämiseen. Kansainvälisen energia-alan yritys BP:n arvion mukaan öljyvarat riittävät nykyisellä kulutuksella 50 vuotta ja hiilivarat 153 vuotta. On tärkeää tyydyttää energiantarve uusituvilla ympäristöystävällisillä lähteillä, jotta sähköntuotanto voi jatkua myös 100 vuoden kuluttua. (Haugaard Nielsen 2019.)

7.1 Vetytalouden edut

Vety on kaikista alkuaineista kaikkein kevein sekä yksinkertaisin. Vedyn atomi koostuu vain yhdestä protonista sekä sitä kiertävästä elektronista. Kaikesta maailmankaikkeuden aineesta vetyä on noin 90 %. Maassa vetyä on erityisen paljon vedessä sekä hiilivedyissä. Palaessaan siitä saa massaansa nähden paljon energiaa ja palamistuotteena syntyy vettä. Vetykaasu koostuu kaksiatomisista vetymolekyyleistä, jotka nousevat ilmaan nopeasti sekä laimenevat ilmakehässä muuttuen hapen kanssa vedeksi. Näiden ominaisuuksien kanssa vety on todella hyvä vaihtoehto öljypolttoaineille. (Hydrogen properties 2001: 1.) Taulukossa 2 vertaillaan vedyn korkeaa lämpöarvoa.

Taulukko 2. Lämpöarvojen vertailu (Polttoaineiden ominaisuusvertailu).

| | | |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Vety | Lämpöarvo HHV 120 MJ/kg | Lämpöarvo LHV 11 MJ/kg |
| Bensiini | Lämpöarvo HHV 47 MJ/kg | Lämpöarvo LHV 42,7 MJ/kg |
| Metanoli | Lämpöarvo HHV 22,7 MJ/kg | Lämpöarvo LHV 20 MJ/kg |

| | | |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| Etanoli | Lämpöarvo HHV 29,7 MJ/kg | Lämpöarvo LHV 27 MJ/kg |
| Metaani | Lämpöarvo HHV 55,5 MJ/kg | Lämpöarvo LHV 50.1 MJ/kg |

Vetytalouden idea on korvata vedyllä nestemäiset polttoaineet. Tämä johtaisi myös siihen, että polttoaineen asema muuttuisi primäärienergianlähteestä energian kantajaksi. Vety pitää ensin valmistaa käyttämällä energiaa. Fossiilisten polttoaineiden käyttöön liittyvät haitalliset päästöt kuitenkin vähenisivät. Vety-polttoaineen ympäristövaikutukset olisivat vain liitoksissa sen tuotanto- ja jakeluketjuissa käytön sijaan. Täten vähennettäisiin polttoaineiden aiheuttamia päästöjä sekä riippuvuutta hupenevasta öljystä. (Mitä on vetytalous 2021; Piesala 2021.)

7.2 Vetytalouden haasteet

Vetytalouden keskeisiä ongelmia ovat valmistus, kuljetus, varastointi sekä turvallisuus. Isoja haittapuolia ovat räjähdysalttius sekä varastoinnin vaikeus. Vedyn valmistaminen on energiaa vievä prosessi koska vety esiintyy yhdisteinä ja se pitää hajottaa. Energian kantajaksi vety sopeutuu hyvin, mutta energian lähteeksi siitä ei ole. (Hydrogen properties 2001: 1–9.)

Vetyatomi on kooltaan erittäin pieni, ja huonona puolena on sen tunkeutuminen diffuusion avulla teräkseen haurastuttaen sitä. Kaasumaisen vedyn varastoinnissa pitää säiliöt saada todella tiiviiksi. Vuotohäviöt voi olla merkittäviä, ellei säiliötä olla rakennettu asianmukaisesti. (Hydrogen properties 2001: 1–9.)

Tulevaisuus vedyn polttoainekäytössä on kiinni siitä, saadaanko ratkaistua taloudellinen tapa valmistaa, varastoida sekä jakaa sitä energiakäyttöön. Nykypäivänä se on jo mahdollista, mutta parannuksia vaaditaan, jos halutaan päästä henkilöautojen tasolle sähköautojen yleistyessä. Sähköautoille latauspisteitä on

paljon helpompi rakentaa kuin vedylle jakeluasemia. Vedyn kuljetus, jakelu sekä varastointi ovat ongelma. (Bergmann 2021.)

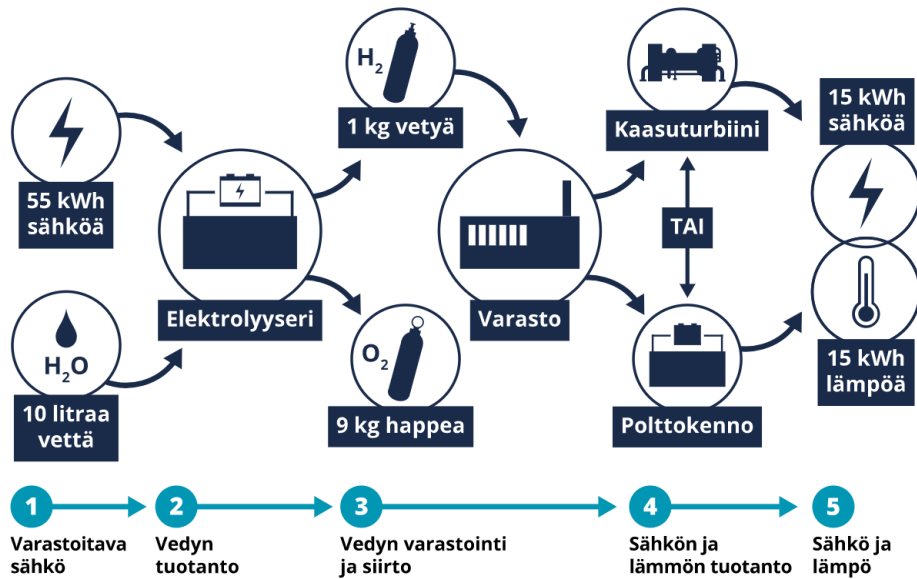
7.3 Vetyraati

Vetyraati on vuonna 2017 perustettu järjestö, johon kuuluu monia isoja yrityksiä energia-, liikenne- ja teollisuusosalta. Järjestöllä on yhtenäinen tavoite saada vety yleiseksi energiamuodoksi sekä rohkaista isoimpia alalla toimivia tahoja ottamaan vety huomioon, kun tehdään päätöksiä energiaan liittyvissä asioissa. Ohjaavina jäseninä järjestöön kuuluu muun muassa autoalalta Toyota, Hyundai, Honda, BMW sekä Daimler. Muita ohjaavia jäseniä esimerkiksi Airbus Group, Michelin, Shell ja BP. (Karvinen 2020.)

Euroopassa isolla tasolla toimiva Hydrogen council eli vetyraati tekee merkittävää työtä varmistaakseen, että vety saataisiin hyötykäyttöön, ja pyrkii lisäämään tietoisuutta sen mahdollisuuksista. Hallitsevaa käytössä olevaa energiamuotoa ei muutama tiedeartikkeli tai konsepti muuta miksiäkään. Usealta autovalmistajalta on julkaistu käyttökelpoinen polttokennoauto. Näiden autojen ostoa ihmiset kuitenkin välttävät, kun ei ole tankkausasemia, joista saisi polttoainetta. Uusia tankkausasemia taas ei rakenneta pienen kysynnän vuoksi. (Karvinen 2020.)

7.4 Matka kohti hiilettömyyttä

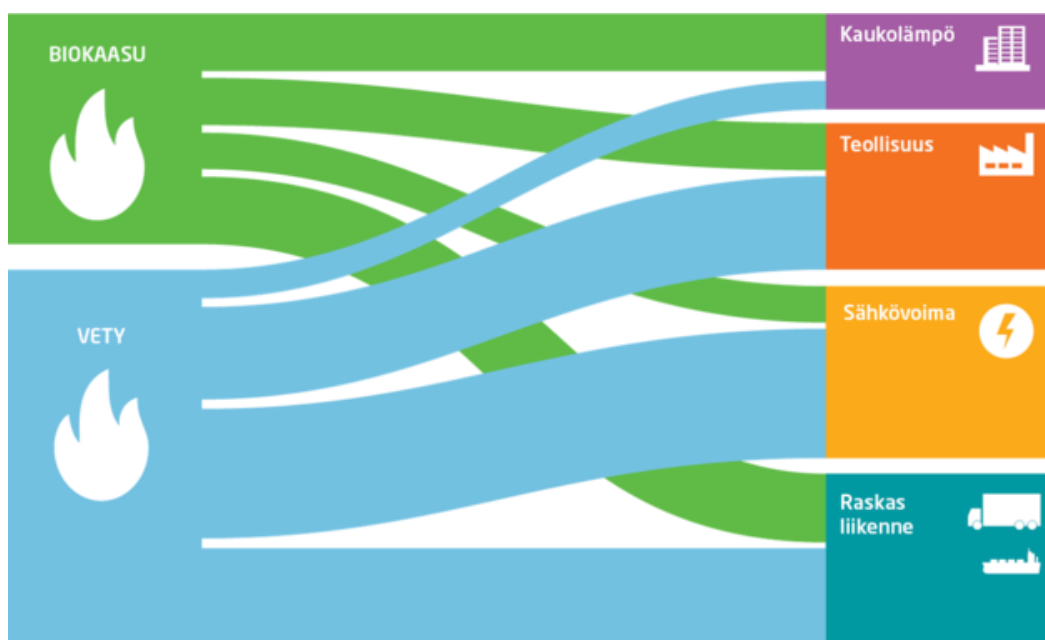
Vetyä voidaan käyttää tasaamaan tulevaisuuden energiajärjestelmissä energiatuotannon ja -kulutuksen vaihteluja. Varastoitu vety toimii ratkaisuna silloin, kun tuuli- tai aurinkovoimalla ei saada tuotettua tarpeeksi energiaa. Jos taas tuuli- tai aurinkoenergian tuotanto ylittää kulutuksen, voidaan ”ylimääräistä” energiaa käyttää vedyn tuotantoon. Vetyä käytetään joko polttokennoissa tai erityisissä kaasuturbiineissa, joista siitä tuotetaan sähköä. Kuvassa 7 on esitetty vedyn tuotanto prosessi. (Vartiainen 2020.)



Kuva 7. Vedyn tuotantoprosessi (Vartiainen 2020).

Vedyn tuotannon kustannukset ovat jatkuvasti laskussa. Elektrolyysilaitteiden yleistyessä hinnat halpenevat kilpailun takia ja vedyn tuotantoa saadaan laajennettua isommalle kohdeyleisölle. Jopa neljäsosa maailman energiantarpeesta voitaisiin kattaa tulevaisuudessa vedyn avulla. Tähän tarvitaan merkittävää elektrolyysin kasvua sekä laitteiston hinnan laskua. Aurinko- ja tuulivoiman hinnan lasku on suorassa yhteydessä vedyntuotannon kustannuksen alenemiseen. Sähkö on tällä hetkellä vedyntuotannossa isoin kustannuserä. (Vartiainen 2020.)

Puhtaille kaasuille ryhdytään EU:ssa laatimaan pelisääntöjä. Kansallisten EUpäätösten johdosta vetytaloutta tuetaan vuoden 2021 tukipaketilla. Paketti sisältää konkreettiset pelisäännöt kaasumarkkinoiden vähähiilistymiselle sekä vedyn laajamittaiselle käyttöönotolle Euroopassa. Linjauksissa on vaihtelua erilaisten poliittisten suuntausten mukaan, minkä seurauksena lähestyminen kokonaisvaltaisesti katsotaan unohtuneen. Teknologianeutraalia lainsäädäntöä odotetaan sekä toivotaan, jotta murrosta ei hidastettaisi energiateollisuuden ylimääräisillä rajoituksilla. Ilmastonmuutoksen hillinnässä biokaasun rooli otetaan paketissa huomioon. Kuvassa 8 verrataan biokaasua sekä vetyä energianlähteenä EU:ssa vuonna 2050. (Kaasumarkkinat ja vety 2021.)



Kuva 8. Biokaasu ja vety enegianlähteenä EU:ssa vuonna 2050 (Kaasumarkkinat ja vety 2021).

8 Asiantuntijahaastattelut

8.1 Haastatteluiden tavoite

Haastatteluiden tavoite oli saada eri alojen ammattilaisilta näkemyksiä vedyn sekä polttokennoautojen ja teknologian nykytilasta sekä tulevaisuuden mahdollisuuksista ja haasteista. Haastateltavina olivat Toyota Auto Finlandin tiedotuspäällikkö Pekka Karvinen sekä Woikoski tuotanto & tekniikka -yrityksen tekninen johtaja Olli Bergmann. Valitsin eri alan henkilöt haastateltaviksi tähän työhön, jotta saisin erilaisia näkökulmia ja tietoa eri osa-alueista teorian tueksi.

Olli Bergmann on töissä Woikoskella, joka rakensi Suomen ensimmäiset vetytanksasemat autoilijoille. Woikoskella on osaamista vetyinfrastruktuurin rakentamiseksi sekä sillä on myös Suomen ainoa rekisteröity polttokennoauto käytössä. Pekka Karvinen työskentelee Toyotalla sekä on kirjoitellut Toyotaway-lehteen artikkeleita vedystä ja polttokennoautoista.

Lähestyin haastattelua liitteessä 1 ja 2 esitetyin kysymyksin. Kysymysten kautta hain vastauksia vetyautoteollisuuden laajentamisen haasteisiin, turvallisuusriskeihin sekä vedyn käyttöön energianlähteenä. Halusin tarkemmin selvittää, mitä käytännön haasteita vetyautojen laajentumiselle on tunnistettu sekä polttoainejakeluun että korjaamotoimintaan liittyen.

8.2 Keskeiset havainnot ja johtopäätökset

Molemmat haastateltavista olivat optimistisia vedyn sekä polttokennoautojen tulevaisuuden suhteen. Haasteltavat kokevat Suomen olevan vielä kehitysvaiheessa polttokennoautojen sekä vetyinfrastruktuurin suhteen. Asiantuntijat olivat sitä mieltä, että raskaan kaluston puolella vety on äärimmäisen hyvä energianlähde ja Suomessa olisi hyvä aloittaa infrastruktuurin rakentaminen sen pohjalta.

Ensimmäisenä tavoitteena olisi rakentaa isojen moottoriteiden varteen vetytankkausasemia raskaan kaluston kuljetukselle. Sitä kautta saataisiin samalla paremmin edistettyä polttokennoteknologiaan perustuvaa infrastruktuuria myös yksityishenkilöiden käyttöön. Ei kukaan tahdo ostaa autoa, jota ei voi tankata missään, eikä kukaan tahdo perustaa tankkausasemia, kun ei ole autoja. Tämä noidankehä voitaisiin saada rikottua aloittamalla raskaan kaluston puolelta.

Bergmann (2021) totesi: ”Woikoski on luopunut käytännössä vetytankkausasemabisneksestä kokonaan. Olemme profiloituneet vedyn valmistajiksi. Teemme mielellämme vetyä näihin tuleviin tankkausasemiin, mutta tankkausasemabisnekseen emme enää lähde. Woikoski teki näitä tankkausasemia kolme välillä 2010–2014, ja se oli valitettavasti aivan liian aikaisin.”

Kuvassa 8 näkyy Woikosken vetytankkausasema sekä Woikosken vetyauto.



Kuva 8. Woikosken vetytankkausasema sekä yrityksen vetyauto (Vedyn edelläkävijä 2020).

Haastateltujen mukaan raskaan kaluston puolella sähkö ei tule missään nimessä pärjäämään vedylle. Perusteluna on, että akkuapplikaatiot ovat liian painavia raskaan kaluston käyttöön. Akkuteknologialla on mahdollista vastata raskaan kaluston tarpeisiin, mutta se ei ole kustannustehokasta.

Polttokennokäyttöiset työskentelykoneet sisähalleihin ovat myös hyvä aloituskohte. Sisähalleihin ei tule haitallisia päästöjä – tosin ladattavat akulliset koneet ovat vieneet voiton tällä linjalla.

Korjaamotoiminnan osalta nousi haastattelussa esiin, että polttokennoautot tulevat asettamaan erilaisia tilavaatimuksia turvallisen työskentelyn takaamiseksi. Tilaa tarvitaan mahdollisten polttokennoautojen vedyn vuototutkimuksille. Tämä asettaa erityisiä vaatimuksia ilmanvaihdon tehokkuudelle. Korjaamisessa voidaan osittain hyödyntää samoja työkaluja kuin sähköautojen korjauksessa tarvitaan. Haastattelussa poikkeuksena nousi esiin erikoistyökalut, joita tarvitaan vetyvuotojen havaitsemiseen sekä vetytankin tiiviyden varmistamiseen.

Asiantuntijat olivat vahvasti vielä sitä mieltä, että tankkauspisteiden rakentaminen henkilöautokäyttöön on Suomessa vielä liian suuri riski. Jonkin yrityksen pitäisi rakentaa tankkauspisteitä omaan käyttöön, esimerkkinä vaikka lähetti- tai kuljetuspalvelu.

Julkisuudessa on paljon tietoa siitä, että vedyn valmistus ei olisi Suomessa kannattavaa. Olli Bergmannin mukaan se ei kuitenkaan pidä paikkaansa, koska vedyn valmistus on kannattavaa, kun se suhteutetaan siihen, kuinka paljon vetykäyttöisellä autolla ajaminen maksaa. Vety on tällä hetkellä aavistuksen verran halvempaa kuin bensiini tai dieselöljy, mutta auton pääomakustannus on vielä toistaiseksi liian korkea. Ajaminen vedyllä on vielä halpaa, kun vetyä ei energiamuotona veroteta. Tämä tulee kyllä muuttumaan, kun polttokennot viimein yleistyvät.

9 Pohdinta

Työssäni totesin, että polttokennot, vety ja ympäristöystävällisempi energialähteiden tulevaisuus näyttävät lupaavilta maailmalla. Suomessa olemme siltä osin pahasti jäljessä. Ainoa suomalainen vetytankkauskoikeilu oli lyhyt epäonnistuminen. Woikoski tähtäsi 20 vetytankkausasemaan polttokennoautoja varten vuoteen 2030 mennessä. Polttokennoautokannan vähyyden vuoksi yritys joutui vaihtamaan suunnitelmiaan vuonna 2014. Tankkausasemat myytiin, ja nyt ei Suomessa ole tällä hetkellä yritystä, joka lähtisi tätä infrastruktuuria rakentamaan.

Asiantuntijoiden näkemykset polttokennoista raskaan kaluston puolella olivat erittäin myönteiset. He olivat samaa mieltä siitä, että vetytankkaus ja paineistettu vetytankki ajoneuvossa ovat turvallisia. Vetytankkaus on käytännössä tehty mahdolliseksi operoida väärin useiden anturien avulla. Sähköautot ovat olleet valokeilassa jo useamman vuoden. Uskon, että valokeila siirtyy enemmän myös polttokennojen puolelle lähivuosien aikana, koska teknologia halventuu ja tieto polttokennoautoista ja niiden eduista sähköautoihin verrattuna lisääntyy.

Tulevaisuudessa tullaan tarvitsemaan ympäristöystävällisempiä energianlähteitä. Vetyyn, sähkö- ja polttokennoautoihin tullaan panostamaan enemmän. Aikaisemmat suomalaiset polttokennoautoinfrastruktuurin kokeilut ovat epäonnistuneet. On vain ajan kysymys, milloin joku isompi yritys ottaa haltuun Suomen vetytalouden tankkauspisteiden muodossa.

Lähteet

Aarnio, Janne & Leiviskä, Kauko. 2008. Vetytolttokennojen dynaamiset mallit. Verkkoaineisto. < <https://www.oulu.fi/sites/default/files/content/bno067.pdf>>. Luettu 14.11.2021.

Alanen, Raili; Koljonen, Tiina; Hukari, Sirpa & Saari, Pekka. 2003. Energian varastoinnin nykytila. Verkkoaineisto. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>> Luettu 10.11.2021.

Bergman, Olli. 2021. Tekninen johtaja, Woikoski Oy. Teams. Haastattelu 24.9.2021.

Haugaard Nielsen, Rolf. 2019. Verkkoaineisto. <Tulevaisuuden energianlähteet | tieku.fi>. Luettu 15.11.2021.

Heikkilä, Seppo. 2013. Kaupallinen elektrolyysikenno autossa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

History. 2021. Verkkoaineisto. Fuel cell today. <<http://www.fuelcelltoday.com/history>>. Luettu. 17.12.2020.

Hydrogen properties. 2001. Verkkoaineisto. College of the Desert. <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf>. Luettu 3.10.2021.

Kaasumarkkinat ja vety. 2021. Verkkoaineisto. Energiatieteollisuus. <https://energia.fi/energiapolitiikka/kaasumarkkinat_ja_vety>. Luettu 14.11.2021.

Karvinen, Pekka. 2020. Verkkoaineisto. < <https://toyotaway.fi/ymparisto/kohti-vety-yhteiskuntaa>>. Luettu 10.5.2021.

Karvinen, Pekka. 2021. Tiedotuspäällikkö, Toyota Auto Finland Oy. Puhelin haastattelu 5.5.2021.

Kauranen, Pertti; Solin, Jussi; Törrönen, Kari; Koivula, Jouko & Laurikko, Juhani. 2013. Vetytiekartta-Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle.

<<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2013/VTT-R-02257-13.pdf>>. Luettu 7.9.2021.

Kelola, Katri. 2021. Vety. Helen asiakaslehti 3/2021, s. 11–15.

Laurikko, Juhani. 2015. Mitä fossiilisen öljyn jälkeen. MOTT ry:n syysseminaari. 26.11.2015.

Mattila, Risto. 2021. Vedyllä kulkevat autot ovat jopa sähköautoja ympäristöystävällisempiä – Suomessa niillä ei ajeta, sillä tankkausasemia ei ole. Verkkoaineisto. Yle uutiset. <<https://yle.fi/uutiset/3-12079587>>. 9.9.2021. Luettu 6.10.2021.

Mitä on vetytalous. 2021. Verkkoaineisto. LUT University. <[https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/mita-on-vetytalous-ja-miten-sen-avulla-vahennetaan-hiilidioksidipaastoja->](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/mita-on-vetytalous-ja-miten-sen-avulla-vahennetaan-hiilidioksidipaastoja-). Luettu 15.11.2021.

Piesala, Pirjo. 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.oph.fi/fi/oppimateriaali/luovasti-luonnonvaroista/luonnonvarojen-kayttajia/energiantuotanto>>. Luettu 15.11.2021.

Polttoaineiden ominaisuusvertailu. Verkkoaineisto. Terralander <<https://asiakas.kotisivukone.com/files/terralander.fi.kotisivukone.com/polttoainevertailu2.pdf>>. Luettu 20.10.2021.

Polttokennoauto. 2020a. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyyppi/polttokennoauto>. Luettu 10.11.2021.

Polttokennoautot. 2020b. Verkkoaineisto. Motiva. <[Sir William Grove. 2020. Verkkoaineisto. Corrosion Doctors. <<http://www.corrosion-doctors.org/Biographies/GroveBio.htm>>. Luettu 17.12.2020.](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/polttokennoautot.>.>. Päivitetty 4.8.2020. Luettu 4.11.2021.</p></div><div data-bbox=)

Sir William Robert Grove. 2006. Verkkoaineisto. Wayback machine. <<http://web.archive.org/web/20060904132508/http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/grove.htm>>. Luettu 17.12.2020.

Sohlberg, Sami. 2013. Insinööriyö. Hybridisovellukset laivajärjestelmissä. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Sähköauton ylivoimainen energiatehokkuus. 2021. Verkkoaineisto. <<https://autolle.com/blogi/sahkoauton-ylivoimainen-energiatehokkuus>>. Päivitetty 18.5.2021. Luettu 8.11.2021.

U.S. Department of energy. 2015. Verkkoaineisto. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/07/f24/fcto_fcev_infographic_0.pdf>. Luettu 6.8.2021.

Vartiainen, Eero. 2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. Verkkoaineisto. <<https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>>. Luettu 5.6.2021.

Vety. 2020. Verkkoaineisto. Woikoski. <<https://www.woikoski.fi/woikoski/vedyn-edellakavija.html>>. Luettu 14.10.2021

William Robert Grove's Fuel Cells. 2017. Verkkoaineisto. UPS Battery center. <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/william-robert-groves-fuel-cells/>>. Luettu. 5.5.2021.

Haastattelu Pekka Karvinen 5.5.2021

Toyota Auto Finland Tiedotuspäällikkö

1. Minkälaisena näet polttokennoautojen tulevaisuuden Suomessa/ulko-
mailla?
2. Milloin uskot polttokennoautojen yleistyvän?
3. Minkälaisia haasteita polttokennoautot tuovat korjaamoille?
4. Jääkö polttokennoautojen yleistymisen pois sähköautojen takia?
5. Minkälaisia varatoimenpiteitä pitäisi tehdä huolto/korjaustöissä polttoken-
noautojen kanssa?
6. Minkälaisia erikoistyökaluja tarvitaan polttokennoautojen kanssa työsken-
telyyn?
7. Löytyykö sinulta näkemyksiä, miten vedyn jakeluverkostointi voisi Suo-
messä toimia?
8. Onko vetysäiliöt mielestäsi turvallisia?

Olli Bergmann haastattelu 24.9.2021

Woikoski Oy Tuotanto & tekniikka tekninen johtaja

1. Millaisena näet polttokennoautojen tulevaisuuden Suomessa?
2. Tuleeko Suomen polttokennoautoilu jälkijunassa?
3. Minkälaisia haasteita vetyasemien järjestäminen aiheutti?
4. Näetkö Suomen polttokennoautoilun tilanteen sellaisena, että kannattaa investoida vetyasemiin? Onko se vielä liian suuri riski?
5. Mikä on teknologian suurin haaste vetyautojen laajentumiselle?
6. Miten kuluttajat saadaan kiinnostumaan polttokennoautoista, kun valokeilassa ovat sähköautot?
7. Miten kuvailisit syytä ostaa polttokennoauto tavallisen sähköauton sijaan?
8. Onko vety oikeasti ympäristöystävällinen valinta, jos ajatellaan koko prosessia tuottamisesta kuluttamiseen?
9. Onko Woikoski Oy:n suunnitelmat muuttuneet vetytankkausasemien suhteen?

"Woikoski aikoo kasvattaa vetytankkausasemien määrään kahteenkymmeneen vuoteen 2030 mennessä, yritys kertoi lokakuussa." Iltä-Sanomat 16.11.2015
10. Onko paineistetun vedyn tankkaaminen mielestäsi turvallista/turvallisempaa kuin tavallisten polttoaineiden?

11. Näkemyksenne raskaasta kalustosta, kumpi voittaa vety vai sähkö?

12. Onko Woikoskella otettu käyttöön jo polttokennolla toimivia ajoneuvoja?

13. Jos Suomessa olisi kunnolla vetytankkauspisteitä polttokennoautoille, olisitteko valmis vaihtamaan käyttöautosi polttokennoautoon?