



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# POLTTOKENNOJEN HYÖDYNTÄMINEN AJO- NEUVOISSA

Tiina Koskela

Opinnäytetyö  
Tammikuu 2018  
Ajoneuvotekniikka  
Korjaamotekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Ajoneuvotekniikka  
Korjaamotekniikka

KOSKELA TIINA

Polttokennojen hyödyntäminen ajoneuvoissa

Opinnäytetyö 32 sivua, joista liitteitä 0 sivua  
Tammikuu 2018

---

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää polttokennojen mahdollisuuksia tulevaisuuden energianlähteinä ajoneuvoissa ja vertailla niiden ominaisuuksia sähköautoihin ja kaasuhybrideihin. Ilmaston lämpeneminen luo paineita kehittää päästötöntä tekniikkaa niin ajoneuvoihin kuin muuhun teknologiaan. Polttokennoja voidaan käyttää sekä pienissä elektroniikan sovelluksissa, kuin isoissa voimalaitoksissa energianlähteenä.

Polttokennoa hyödyntäviä ajoneuvoja on jo valmistettu, mutta ne ovat pääasiassa leasing käytössä. Vain muutama valmistaja on tuonut asiakasmarkkinoille polttokennoa pääasiallisena energialähteenään käyttäviä ajoneuvoja. Sen sijaan markkinoilla on jo paljon sähköllä toimivia ajoneuvoja tai kaasua polttoaineenaan käyttäviä ajoneuvoja ja niiden yhdistelmiä.

Opinnäytetyön aihe on itse valittu mielenkiinnon takia. Aihe on myös tällä hetkellä ajankohtainen, sillä viime vuoden marraskuussa voimaan astuneen Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaan ilmaston lämpeneminen on pysäytettävä puoleentoista asteeseen, joka vaatii radikaaleja muutoksia myös ajoneuvoilta.

---

Asiasanat: polttokenno, vetyauto, sähköauto

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Vehicle Engineering  
Garage Engineering

**KOSKELA TIINA:**

The utilization of a fuel cell in a passenger car

Bachelor's thesis 32 pages, appendices 0 pages  
January 2018

---

The purpose of this thesis is to research the possibilities of fuel cells, especially in car industry, which has a growing need for emission free energy source. The fuel cell vehicles are also compared to electric driven vehicles and gas hybrid vehicles. It is possible to use the fuel cell in small electric components as well as in big power stations.

The Climate change is a major reason for developing new emission free technologies. The car industry has already started to react to this threat and is making for example electric driven vehicles as well as hybrids with lower greenhouse gas emissions. Fuel cell cars have been made too, but until now, they have been only released for leasing and in small scale.

The thesis is made from curiosity for the future. The car industry must change radically so that the limitations of the Paris climate agreement are met. On 4 November, 2016, the new climate agreement came into effect and one of the terms was to keep the rise of the temperature in 1½ degrees Celsius, which is impossible with the technology we possess now.

---

Key words: fuel cell, hydrogen, hydrogen vehicle, alternative energy

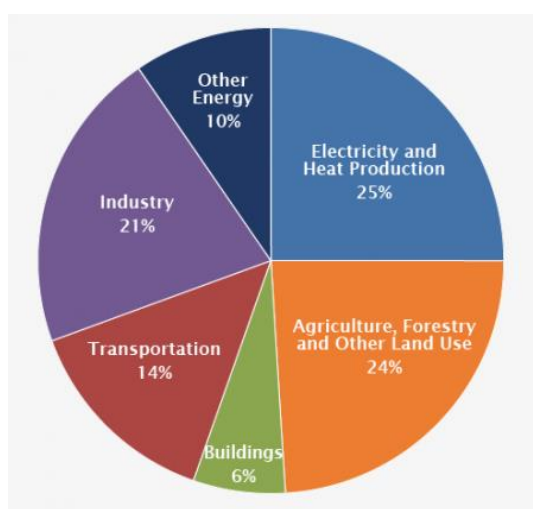
## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	HISTORIA .....	6
3	POLTTOKENNOT .....	8
3.1	Protoninvaihtopolttokenno.....	8
3.2	Suorametanolipolttokenno .....	10
3.3	Kiinteäoksidipolttokenno.....	10
3.4	Alkalipolttokenno .....	11
3.5	Sulakarbonaattipolttokenno .....	11
3.6	Fosforihappopolttokenno .....	12
3.7	Yhteenveto .....	12
4	VEDYN VALMISTUSTAVAT.....	13
4.1	Höyryreformointi .....	13
4.2	Elektrolyysi .....	14
4.3	Biomassan kaasuunnus .....	15
5	VETYSÄILIÖT JA NIIDEN TÄYTTÖ.....	16
6	POLTTOKENNON HYÖDYNTÄMINEN AJONEUVOSSA .....	19
7	SOVELLUKSET AJONEUVOISSA.....	22
7.1	Hyundai ix35 FCEV .....	22
7.2	Toyota Mirai .....	23
7.3	Mercedes-Benz GLC F-Cell .....	24
7.4	Yhteenveto .....	25
8	POHDINTA.....	26
	LÄHTEET.....	29

## 1 JOHDANTO

Ympäristötietoisuus on edelleen kasvava trendi. Maapallon ilmasto on lämmennyt noin 0,9 astetta esiteolliseen aikaan verrattuna (Nasa 2016). Pariisin ilmastositomuksen astuessa voimaan 4.11.2016 sovittiin, että ilmaston lämpeneminen rajattaisiin vain puoleentoista asteeseen, mikä ei nykyteknologialla ole mahdollista. Tämä vauhdittaa vaihtoehtoisten energialähteiden kehitystä myöskin autoteollisuudessa. (Ympäristöministeriö 2016.)

Autoteollisuudella on kovat paineet saada markkinoille aina vain vähänpäästöisempiä ajoneuvoja, sillä kuluttajat ovat entistä ympäristötietoisempia. Ajoneuvo on myös suurimpia yksittäisiä ostoksia, missä kuluttaja voi tehdä ympäristöystävällisemmän valinnan, joten se on monelle kuluttajalle tärkeä osa ostopäätöstä. Autoteollisuus ja yksityisautoilijoiden tuottamat päästöt ovat myös usein esillä mediassa, joten paineet saada päästöt alas on kova. Tästä huolimatta ajoneuvojen osuus kasvihuonekaasuista on kuitenkin vain 14 %, josta yksityisautoilijan osuus on häviävän pieni, sillä 14 % kattaa myös rahdin kuljetuksen, eli rekat ja junat, sekä laivat ja lentokoneet. Esimerkiksi maatalous on jo huomattavasti isompi siivu, tuottaen noin 24 % maailman kasvihuonekaasuista (United State Environmental Protection 2014). Nämä luvut ovat vuodelta 2014, joten prosentit ovat varmasti muuttuneet, mutta suhde on suurin piirtein sama. Tämä ei kuitenkaan näy mediassa läheskään niin paljoa, joten tavallinen kuluttaja ei sitä välttämättä huomaa.



KUVIO 1. Maailman kasvihuonekaasupäästöt ekonominen sektorin mukaan (United State Environmental Protection 2014)

## 2 HISTORIA

Vaikka polttokennot alkavat vasta nyt yleistyä, on niitä valmistettu jo yhtä kauan kuin poltto- ja sähkömoottoreita. Ensimmäisenä polttokennon periaatteen kehitti Humphrey Davy 1801, mutta valmistamaan sen pystyi William Grove vasta vuonna 1839 ja häntä pidetäänkin polttokennon isänä. Hän nimitti polttokennoaan "kaasuakuksi" (gasbattery), jossa hän käytti reaktioaineena vetyä ja katalyyttinä platinaa. Charles Langer ja Ludwig Mond jatko kehittivät Groven kaasuakkua ja valmistivat hiilikaasua reaktioaineena käytävän energianlähteen ja nimesivät sen polttokennoksi. (Fuel Cell Today 2017.)

1900-luvun alussa Daimler kehitti ottomoottorin ja polttomoottorien kehittäminen alkoi kiihkeänä ja polttokennojen kehittäminen jäi toissijaiseksi. Vasta 1950 General Motors kehitti ensimmäisen PEM (Polymer exchange membrane) polttokennon, mutta sitä ei vielä hyödynnetty kaupalliseen käyttöön. 1959 Francis Bacon taas esitteli ensimmäisen alkali polttokennon, joka tuotti noin 5 kW. Tästä polttokennosta Allis-Chalmers muokkasi traktoreihinsa 15 kW tuottavan polttokennoryhmän. Yhtiö kehitti polttokennoja käytettäväksi myös vedenalaisissa ajoneuvoissa, trukeissa ja golf-kärryissä. (Fuel Cell Today 2017.)

1950-luvun lopulla yksi nopeimpia autoja oli Ferrari 4.9, joka kiihtyi nolosta kuuteenkymmeneen mailiin tunnissa (noin 100 km/h) 5,6 sekunnissa (Car and Driver 2017). Auto tuotti maksimissaan 279,5 kilowattia, mikä on noin 18 kertaa enemmän kuin Allis-Chalmersin polttokennoryhmässä. (Automobile catalog 2017.)

Seuraavalla vuosikymmenellä polttokennoja kehitettiin edelleen eteenpäin, kun NASA otti ne käyttöön Gemini-avaruusohjelmassaan. Gemini-avaruuslentoja suoritettiin yhteensä kaksitoista vuosien 1965 ja 1966 aikana, näistä kaksi oli miehittämättömiä. (Potree, Trevino 1997.) Lentojen tarkoituksena oli pohjustaa Apollo-lentoja ja miehite-tyillä lennoilla harjoiteltiin muun muassa avaruuskävelyä. Polttokenno tuotti sähköenergian lisäksi juomavettä miehistölle, mikä on avaruuslennoilla suuri etu. (Fuel Cell Today 2017.)

1970-luvulla alkanut öljykriisi vauhditti vaihtoehtoisten energialähteiden kehitystä ja seuraavalla vuosikymmenellä polttokennoja käytettiin jo USA:n laivaston sukellusve-neissä. 1990-luvulla polttokennojen kehittäminen kohdistui isoihin paikallaan pysyviin

polttokennoihin, joita voitaisiin käyttää kaupallisissa sovelluksissa ja voimalaitoksissa. Myynti alkoi kuitenkin vasta 2000-luvun puolivälin paikkeilla, jolloin niitä myytiin voimalaitoksille ja käytettiin voimanlähteenä mm. busseissa ja junissa. (Fuel Cell Today 2017.)

Kaksituhattaluvun loppupuolella ja kaksituhattakymmenen luvun alussa polttokennojen moni autovalmistaja alkaa kehittää polttokennoautoja ja polttokennoautojen kehitys lähtee nousuun. 2000-luvulla myös pienakkujen ja sähkölaitteiden, joissa hyödynnetään polttokennoa, kaupallinen myynti alkoi Japanissa ja niitä on myyty jo miljoonia. Akkuja käytetään muun muassa puhelimissa ja muussa pienelektronikassa. (Fuel Cell Today 2017.)

### 3 POLTTOKENNOT

Polttokenno on laite, joka muuttaa kemiallisen energian sähköenergiaksi. Kuten sähkö- ja polttomoottorit, myös polttokenno tarvitsee jonkin energianlähteen toimiakseen. Polttokennoissa käytetään polttoaineena eri aineita, jotta saadaan aikaan eri palamislämpötiloja ja käyttöominaisuuksia, kohteen tarpeista riippuen. Tämän vuoksi polttokennot jaotellaankin karkeasti korkea- ja matalalämpötilaisiin. Korkeissa lämpötiloissa on saavutettu parempia hyötysuhteita, mutta polttokennon soveltuvuuteen vaikuttavat myös muut tekijät.

Polttokennotyyppejä on paljon ja ne on suunniteltu soveltumaan eri käyttötarkoituksiin. Polttokennotyyppejä ovat protoninvaihto-, suorametanol-, kiinteäoksidi-, alkali-, sulakarbonaatti- ja fosforihappopolttokenno. Ajoneuvoissa käytetään protoninvaihtopolttokennoa, jonka sivutuotteena syntyy pelkästään vettä. Ajoneuvojen lisäksi polttokennoja käytetään mm. sähköön tuottamiseen voimalaitoksissa ja pienelektroniikassa. (Fuel Cell Today 2017 PEMFC.)

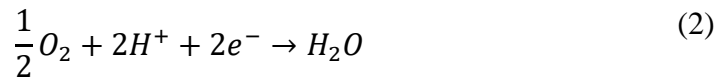
Polttokenno koostuu monesta kennosta, jotka on kytketty sarjaan, jotta saadaan korkeampi jännite. Kennostossa on myös mm. tiivisteitä ja muita osia valmistajasta riippuen. (VTT 2007 Polttokennot.)

#### 3.1 Protoninvaihtopolttokenno

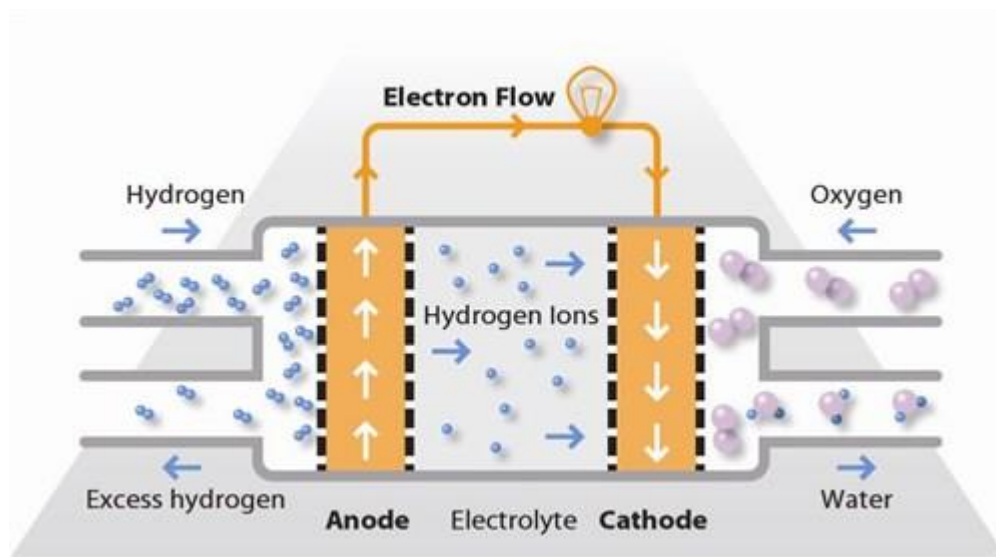
Protoninvaihtopolttokenno, eli PEM -polttokenno (proton exchange membrane), tuottaa sähköenergiaa elektrolyysin kautta. Polttokenno koostuu anodista ja katodista ja niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Anodi ja katodi on päällystetty toiselta puolelta katalyytillä, yleensä jalometallilla, joka nopeuttaa elektrodilla tapahtuvaa reaktiota. (Fuel Cell Today 2017 PEMFC.) PEM-polttokennossa vetyä syötetään anodille, jossa se reagoi katalyytin kanssa synnyttäen vetyioneja ja elektroneja alla olevan reaktiokaavan mukaisesti.



Vain vetyionit kulkeutuvat elektrolyytin läpi, joten negatiivisesti varautuneet elektronit kulkevat sähköjohdinta pitkin aiheuttaen sähkövirran. Vetyionit ja elektronit kulkeutuvat katodille, jolle syötetään happea. Happi reagoi vetyionien ja elektronien kanssa synnyttäen vettä seuraavan kaavan mukaisesti. (VTT 2007 Polttokennot.)



Polttokenno on käytännössä täysin päästötön, sillä reaktion sivutuotteena syntyy vain vettä. Vedyn valmistus kuitenkin kuluttaa paljon energiaa, ja jos tätä energiaa ei tuoteta käyttäen uusiutuvaa energiaa, ei vetyä voi sanoa puhtaaksi polttoaineeksi. (Fuel Cell Today 2017 PEMFC.) Alla olevassa kuviossa on havainnollistettu polttokennon eri osat ja kuinka vety- ja happikaasu tulevat polttokennolle ja kuinka elektronit ja ionit kulkevat.



KUVIO 2. PEM-polttokenno (Fuel Cell Today 2017 PEMFC)

PEM-polttokennoja on karkeasti jaoteltuna kahta tyyppiä, korkea- ja matalalämpötilaista. Korkealämpötilaisessa polttokennossa lämpö voi nousta jopa kahteensataan celsiusasteeseen ja siinä elektrolyytti on mineraalihappopohjainen. Matalalämpötilaisessa lämpötila on kahdeksankymmenen ja sadan celsiusasteen välissä ja elektrolyytti on vesipohjainen. Matalalämpötilaisessa on korkeampi tehotehiys kuin korkealämpötilaisessa, joten se on

parempi vaihtoehto, kun tarvitaan nopeasti purkautuvaa tehoa, kuten esimerkiksi ajoneuvoissa. Korkealämpötilaisessa sen sijaan on kestävä enemmän epäpuhtauksia, joten se on edullisempi vaihtoehto. (Fuel Cell Today 2017 DMFC.)

### **3.2 Suorametanolipolttokenno**

Suorametanolipolttokenno toimii hyvin samankaltaisesti kuin protoninvaihtopolttokenno, mutta vedyn sijasta polttokennoon syötetään metanolia. Metanoli reagoi anodilla synnyttäen elektroneita sekä vetyioneja. Vetyionit reagoivat katodilla hapen kanssa synnyttäen vettä samalla tavalla kuin protoninvaihtopolttokennossa. Polttokennossa on polymeerikalvot, kuten protoninvaihtopolttokennossakin, mikä mahdollistaa reaktion toimivuuden. (Fuel Cell Today 2018 DMFC)

Suorametanolipolttokenno on suosittu vaihtoehto, sillä se on yhtä lailla päästötön kuin protoninvaihtopolttokenno, mutta sen polttoaineeksi käy metaani, jota on huomattavasti helpompi valmistaa kuin vetykaasua. Sitä onkin käytetty muun muassa varastoissa käytettävissä haarukkatrukeissa. (Fuel Cell Today 2018 DMFC)

### **3.3 Kiinteäoksidipolttokenno**

Kiinteäoksidipolttokennossa polttoaineena käytetään synteetikaasua, esimerkiksi vedyn ja hiilimonoksidin yhdistelmää, joka reagoi anodilla katodin läpi tulevan hapen kanssa synnyttäen sähkövirran, sekä hiilidioksidia, että vettä. Reaktio vaatii erittäin korkean lämpötilan, jolla voidaan myös nostaa koko prosessin hyötysuhdetta, jos haihtuva lämpö saadaan otettua talteen tai hyödynnettyä. (Fuel Cell Today 2018 SOFC.)

Hyötysuhteen paranemisen lisäksi korkea käyttölämpötila laskee valmistuskustannuksia, sillä katalyytin ei tarvitse olla metallinen. Siitä on kuitenkin myös haittaa, sillä korkean käyttölämpötilan vuoksi sen käynnistäminen on hidasta, sillä käyttölämpötilan saavuttaminen vie aikaa. Kaikkien polttokennojen tulee saavuttaa käyttölämpötilansa, ennen kuin reaktio toimii täydellisesti ja niitä voidaan hyödyntää. (Fuel Cell Today 2018 SOFC.)

Kiinteäoksidipolttokennoa käytetään lähinnä varavirran lähteenä ja virranlähteenä pienissä mobiilikäytöissä. Kiinteäoksidipolttokennon hyviä puolia on sen todella hyvä hyötysuhde, sekä sen kyky hyödyntää eri katalyyttejä, mikä laskee valmistuskustannuksia.

Huonoina puolina ovat korkean käyttölämpötilan vuoksi tapahtuva korrosio, sekä hidas toimivuuden aloitus. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.) Kiinteäoksidipolttoainetta voidaan käyttää myös voimalaitoksissa sähköntuottamiseen (Fuel Cell Today 2018 SOFC).

### **3.4 Alkalipolttoainetta**

Alkalipolttoainetta on yksi vanhimpia polttoainetyppejä ja niitä käytettiin jo Apollo-lennoilla. Sen jälkeen niitä on hyödynnetty avaruusteknologiassa, puolustusvoimissa, sekä rahtien kuljetuksissa. Alkalipolttoainet soveltuvat hyvin myös varavirraksi. Alkalipolttoainet ovat suosittuja, sillä niihin voidaan käyttää monia eri materiaaleja, mikä tekee niistä muunneltavia. Käyttölämpötila on myös muita polttoainetta matalampi, joten käyntiinlähtö on nopea. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

Alkalipolttoainet polttoaineena käytetään vetykaasua ja lopputuotteena syntyy vettä kuten suorametanolin ja protoninvaihtopolttoainet. Alkalipolttoainetta on protoninvaihtopolttoainetta halvempi, sillä platinan sijasta katalyyttinä käytetään yleensä nikkeliä. (Fuel Cell Today 2018 AFC.)

### **3.5 Sulakarbonaattipolttoainetta**

Sulakarbonaattipolttoainet polttoaineena käytetään synteetikaasua kuten kiinteäoksidipolttoainet. Reaktiosta syntyy sähköä lisäksi hiilidioksidia ja vettä. Sulakarbonaattipolttoainet käyttökohteita ovat lähinnä voimalaitokset. Sen käyttölämpötila on korkea, joten sen valmistukseen ei tarvitse käyttää jalometalleja, mikä vaikuttaa positiivisesti valmistuskustannuksiin. (Fuel Cell Today 2018 MCFC.)

Sulakarbonaattipolttoainet hyötyjä ovat mm. korkea hyötysuhde ja joustavuus polttoaineen suhteen. Siinä on samoja vikoja, kuin kiinteäoksidipolttoainet, sekä matala energiatiheys. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

### 3.6 Fosforihappopolttokenno

Fosforihappopolttokennon toimintaperiaate on samankaltainen, kun esimerkiksi protoninvaihtopolttokennossa, eli anodille syötetään vetykaasua, joka reagoi hapen kanssa synnyttäen sähköä ja vettä. Se eroaa protoninvaihtopolttokennosta korkeammalla käyttölämpötilalla ja näin ollen sitä käytetäänkin lähinnä voimalaitoksissa sähköntuottamiseen. Fosforihappopolttokennoa voidaan hyödyntää myös suuremmissa ajoneuvoissa, kuten busseissa. (Fuel Cell Today 2018 PAFC.)

### 3.7 Yhteenveto

Alla olevasta taulukosta löytyy luetellut polttokennotyypit ja niiden käyttölämpötilat ja hyötysuhteet, sekä elektrolyytit. Taulukosta huomataan, että polttokennolla saavutetaan huomattavasti parempia hyötysuhteita kuin polttomoottorilla, mutta ei yhtä hyviä kuin sähkömoottorilla.

TAULUKKO 1. Polttokennotyypit (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy 2016.)

Tyyppi	Elektrolyytti	Lämpötila	Hyötysuhde	Kennon koko
Protoninvaihto	Vesi	80-100 °C	50-60 %	1-100 kW
Protoninvaihto	Mineraalihappo	yli 120 °C	40-60 %	1-100 kW
Suorametanoli	Polymeeri kalvo	60-130 °C	20 %	
Kiinteäoksidi	Kiinteä keraami; zirkonium oksidi	500-1000 °C	60 %	1 kW-2 MW
Alkali	Alkalimetalli, kaliumhydroksidi	100-250°C	60 %	1-100 kW
Sulakarbonaatti	sulakarbonaattisuola jäädetyttynä huokoiseen keraamimatriisiin	650 °C	60-70 %	300 kW
Fosforihappo	Fosforihappo	150-200 °C	40 %	5-400 kW

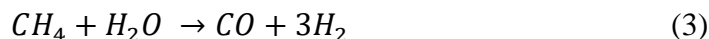
## 4 VEDYN VALMISTUSTAVAT

Vety on maapallon kymmeneksi yleisin alkuaine ja maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Sitä ei kuitenkaan esiinny luonnossa puhtaana vetynä, vaan se on sitoutunut muihin aineisiin. Suurin osa maapallon vedystä on sitoutuneena veteen, mutta sitä löytyy myös esimerkiksi mineraaleista ja orgaanisista aineista (Encarta MSN 2007). Normaaliolosuhteissa vety esiintyy kaasuna, joka on hajutonta ja mautonta. Se palaa lähes näkymättömällä, sinertävällä liekillä (Helsinki, opettajan aineisto 2003). Vety on atomirakenteensa vuoksi herkästi reagoivaa, mikä nostaa sen hyötysuhdetta. Reaktiivisuus aiheuttaa kuitenkin varastoinnissa ongelmia, sillä vety on myös herkästi syttyvää. (Ranta, Noponen, Granström, Scotti, Kanninen, Franssila & Halme 2010.)

Yleisin vedyn valmistustapa on höyryreformointi, eli biokaasusta erottaminen. Sitä voidaan valmistaa myös elektrolyyysillä ja kaasuunnuttamalla biomassaa, jonkin verran vetyä syntyy myös kemianteollisuuden sivutuotteena. (Helsinki, opettajan aineisto 2003.) Tällä hetkellä USA:ssa vetyä valmistetaan pääosin maakaasusta höyryreformoinnilla. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.).

### 4.1 Höyryreformointi

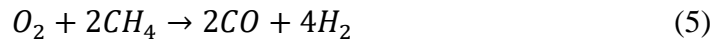
Vetyä pystytään valmistamaan jo olemassa olevasta polttoaineesta kemiallisesti erottamalla. Sitä valmistetaan esimerkiksi metaanista lisäämällä siihen vettä. Prosessin kemiallinen kaava on



Prosessissa metaani hajotetaan kemiallisesti vesihöyryn avulla vedyksi ja hiilimonoksidiksi. Metaani saadaan maakaasusta ja se ei saa sisältää epäpuhtauksia kuin pieniä määriä, jotta reformoinnissa syntyy tarpeeksi puhdasta vetyä. Prosessi vaatii lisättyä lämpöä toimiakseen. Sivutuotteena syntyy hiilimonoksidia, joka on kasvihuonekaasu ja näin haitallinen sivutuote. (Lund, Himanen 2003.) Hiilimonoksidia voidaan jatkojalostaa vedyksi ja hiilidioksidiksi lisäämällä siihen vesihöyryä alla olevan reaktiokaavan mukaisesti (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d.).



Metaanista voidaan valmistaa vetyä myös osittaishapettamalla. Reaktion sivutuotteena syntyy lämpöä ja hiilimonoksidia. Alla olevassa kaavassa on kuvattu metaanin osittaishapetuksen reaktiokaava

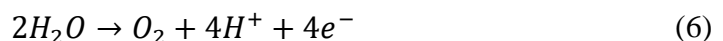


josta syntyvä hiilimonoksidi voidaan jalostaa edelleen vedyksi ja hiilidioksidiksi kaavan 4 mukaisesti (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d.).

## 4.2 Elektrolyysi

Elektrolyysissä vetyä valmistetaan vedestä erottamalla. Tällä tavalla vedyn valmistaminen onnistuu jopa kotiloissa, sillä metodi on hyvin yksinkertainen. Veden lävitse johdetaan sähköä, joka erottaa vesiatomissa olevan vedyn ( $H_2$ ) ja hapen (O) toisistaan. Elektrolyysin toteuttamiseen käytetään elektrolysoimislaitetta. Näitä laitteita on erilaisia ja ne eroavat toisistaan pääasiassa käyttämällään elektrolyytillä. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

Elektrolysoimislaitte voi käyttää muun muassa polymeerikalvoa, jolloin reaktiokaavaksi anodille saadaan



Vesi-ioni reagoi anodilla muodostaen happikaasua, vetyioneja ja elektroneja. Elektronit kulkeutuvat sähköjohdinta pitkin katodille synnyttäen sähkövirran. Samalla vetyionit kulkeutuvat polymeerikalvon lävitse katodille, jossa ne reagoivat seuraavan kaavan mukaisesti synnyttäen vetykaasua. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)



Elektrolyysi on haluttava vaihtoehto vedyn tuottamiseen, sillä sitä hyödyntämällä voidaan käyttää uusiutuvaa energiaa ja vähentää hiilidioksidipäästöjä. Paras hyöty saataisiin aikaan, jos vetyä valmistettaisiin ylijäämäenergialla, jota ei pystytä syöttämään sähköverkkoon. Vedyn sisältämä energia saadaan käyttöön, kun sähköä ei pystytä tuottamaan tarpeeksi sen hetkiseen kulutukseen verrattuna. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

### **4.3 Biomassan kaasuunus**

Biomassaa on kaikki orgaaninen aine, jota kasvaa luonnossa. Ainoastaan jatkojalostusta varten kasvatettava biomassa on esimerkiksi paju tai lännenhirssi. Biomassana käytetään myös maataloudesta ylijäävää kasvistoa, kuten viljan kasvattamisesta jääviä olkia. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.) Käyttämällä jätettä biomassan raaka-aineena vähennetään huomattavasti kaatopaikoille joutuvaa jätettä ja näin ollen myös metaanipäästöjä. Muuten jätteeksi joutuvan biomassan hyödyntäminen tukee myös ravinnon kasvatusta, sillä silloin maapinta-alaa ei tarvitse käyttää erikseen biomassan kasvatukseen, jolloin ravintoa saadaan kasvatettua enemmän. (GSTC n.d.)

Biomassasta valmistetaan biokaasua lämmön, höyryn ja ilman avulla, mutta kuitenkin polttamatta sitä. Biomassan valmistukseen on monia eri tapoja ja lopputuloksena syntyvä kaasu riippuu biomassan koostumuksesta. (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.) Suomessa biomassaa jalostaa muun muassa Valmet (Valmet 2018).

Ennen biomassan kaasuuntumista se yleensä kuivataan, sillä kasvit ja muu orgaaninen aine sisältävät paljon vettä, mikä laskee kaasuuntumisen lämpötilaa ja hyötysuhdetta. Biomassa jalostetaan tavallisesti samankokoiseksi hakkeeksi, jotta sitä voidaan syöttää tasaisesti parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi. (GSTC n.d.) Tämän jälkeen biomassa kuivatislataan, hapetetaan ja redusoidaan valmistustavasta riippuen. (BIOS n.d.) Lopputuloksena syntyy biokaasua ja tuhkaa.

## 5 VETYSÄILIÖT JA NIIDEN TÄYTTÖ

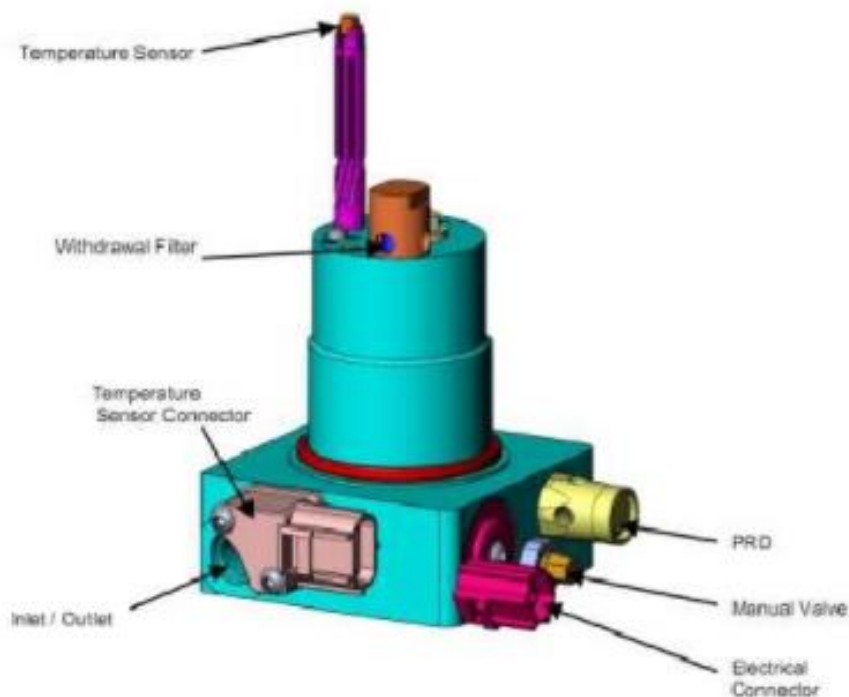
Vetysäiliön täyttäminen vaatii oman polttoaine aseman, jossa on vetyautolle sopiva täyttöpiste. Näitä vetyasemia löytyy Euroopasta jo muutamia kymmeniä, mutta verkosto ei ole vielä kovinkaan kattava. Vetyasemia rakennetaan jatkuvasti ympäri Eurooppaa, sekä USA:han, että Japaniin. Varsinkin Saksassa vetyasemien yleistyminen tapahtuu nopeaa tahtia. Tällä hetkellä siellä on 20-40 asemaa (Friedlmeier 2015) ja asemien määrä lisätään sataan asemaan vuosien 2018 ja 2019 aikana. Vuoteen 2023 mennessä on suunnitteilla avata neljäsataa vetyasemaa (H2 Mobility 2017). Suomessa on kaksi vetyasemaa, toinen Helsingissä Vuosaarella ja toinen Voikoskella. Suomessa vetyä toimittaa ja valmistaa tällä hetkellä Oy Woikoski Ab, joka on myös rakennuttanut Suomen vetyasemat (Ammattiautot 2014).

Henkilöautokäytössä polttoainesäiliön täyttö ja siihen liittyvät toiminnot on hyvä saada mahdollisimman helpoiksi, jotta ajoneuvo on kuluttajalle houkutteleva valinta. Vety säilötään ajoneuvoissa kaasuna, joka paineistetaan seitsemänsadan baarin paineeseen. Tällä hetkellä polttokennoautoissa on polttomoottorikäyttöiseen autoon verrattava täyttö, jossa ajoneuvon takaosassa oleva vetysäiliö, tai vetysäiliöt, täytetään tankkausasemalla pistoolilla, joka lukkiutuu ajoneuvoon. (H2 Mobility 2017.)



KUVA 1. Toyota Mirain polttoainesäiliön täyttö (Inside EVs 2016)

Vetysäiliössä on sille suunniteltu venttiili, joka mahdollistaa turvallisen täytön ja tyhjen-nyksen korkeasta paineesta riippumatta. Venttiili takaa, että täyttö ei tapahdu liian nope-asti, jotta vetykaasu ei ylikuunene. Venttiili takaa myös sen, että vetykaasu purkautuu tulipalon sattuessa turvallisesti yhdestä kohtaa, aiheuttamatta vaaratilannetta. Venttiilissä on tästä syystä muun muassa lämpötilasensorit. (Friedlmeier 2015.)



KUVIO 3. Vetysäiliön täyttöventtiili (Friedlmeier 2015)

Vety on erittäin reaktiivinen aine, joten vetysäiliöiden täytyy olla turvallisia törmäys- tai ylikuumenemistilanteissa. Vetysäiliön ulkopintaan ja sisäpintaan kohdistuu suuria voimia, jonka vuoksi säilön rakenteen täytyy olla joustava, mutta kestävä. Vety säilötään kaasuna seitsemänsadan baarin paineessa ja täyttö sekä tyhjentäminen muuttavat säiliön tilavuutta. Tämän vuoksi vetysäiliö koostuu monesta kerroksesta, jotka valmistetaan eri materiaaleista, jotta kokonaisuus on tarpeeksi tukeva. Sisäkerroksena on yleensä metalli- tai komposiittikerros, joka ei reagoi vetykaasun kanssa ja kestää korroosiota. Päälimmäisenä kerroksena käytetään yleensä lasikuitukomposiittia, joka vahvistaa säiliötä ja antaa sille kestävä kuoren, sekä ulkoisille kolhuille, että paineesta johtuvalle muodonmuutok-selle.

Vetykaasu on ilmaa kevyempää ja sen tiheys normaalissa ilmanpaineessa on vain 0,09 g/dm<sup>3</sup>, kun ilman tiheys on 1,293 g/dm<sup>3</sup> (Mäkelä, Soinen, Tuomola, & Öistämö 2005, 179). Pienen tiheyden vuoksi vetykaasu täytyy paineistaa suureen paineeseen, jotta energiatiheys olisi parempi (Freidlmeier 2015). Seitsemäsadan baarin paineessa ja viiden-toista asteen lämpötilassa vedyn tiheys on 40 g/dm<sup>3</sup>, eli huomattavasti parempi kuin normaalissa ilmanpaineessa.

Toyota Mirain vetysäiliö koostuu alla olevan kuvion mukaisesti sisällä olevasta polymeerikerroksesta (1), keskellä olevasta hiilikuitukomposiitista (2) ja ulkokuorena olevasta lasikuitukomposiitista (3). Hiilikuitukomposiitti tuo säiliölle vahvuutta ja lasikuitukomposiitti suojaa ulkoisilta kolhuilta. (Toyota 2017.)



1. **Inner:** polymer-lined layer to hold the hydrogen
2. **Middle:** structural layer of carbon-fiber-reinforced polymer to provide strength
3. **Outer:** glass-fiber-reinforced polymer layer to help protect from surface-abrasions

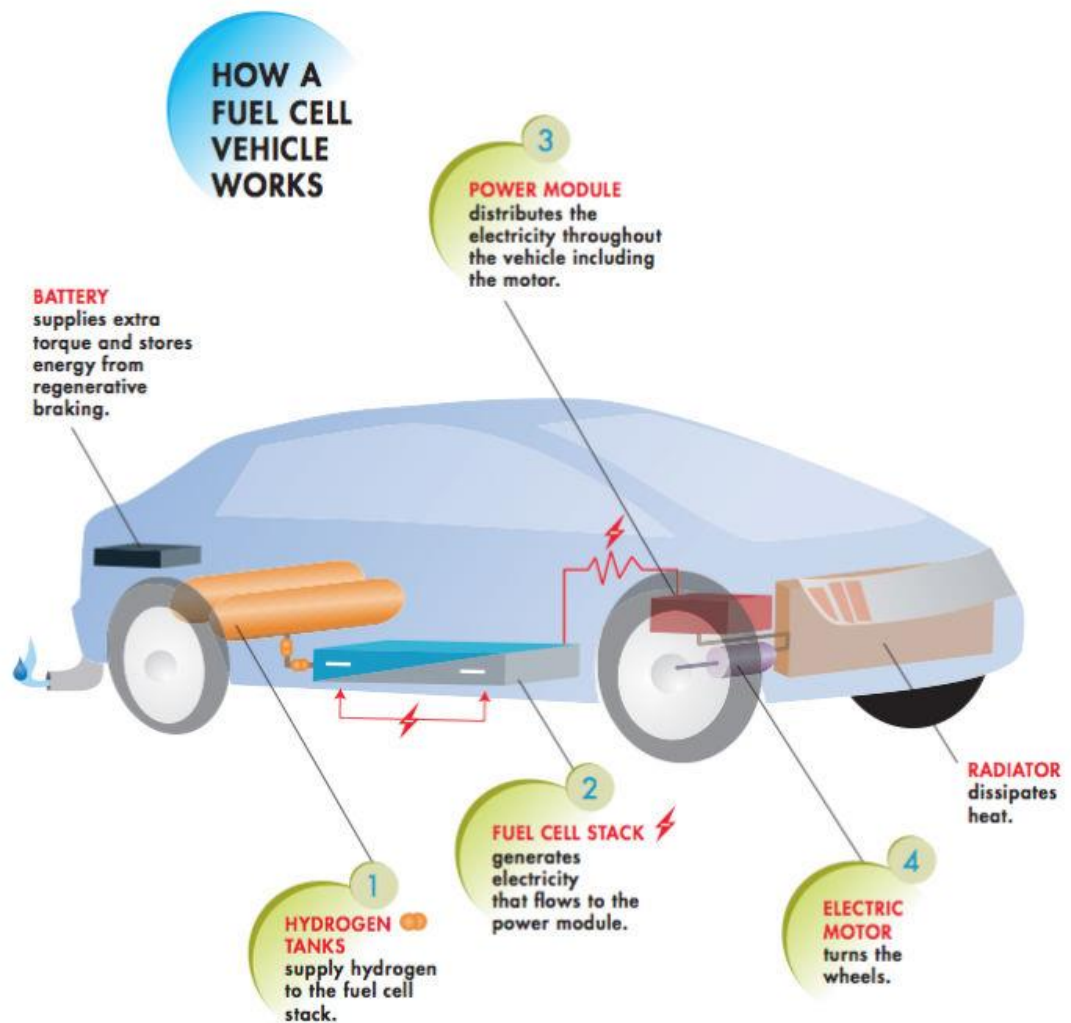
KUVIO 4. Toyota Mirain vetysäiliö (Toyota 2017)

## 6 POLTTOKENNON HYÖDYNTÄMINEN AJONEUVOSSA

Polttokennoa hyödyntävän ajoneuvon etuna polttomoottorikäyttöiseen autoon verrattuna on ensisijaisesti pienemmät päästöt. Vetypolttokennot tuottavat pelkästään vettä palamisreaktion tuloksena. Polttomoottoriin verrattuna etuna on myös liikkuvien osien määrä, sillä huoltotarve pienenee, kun kuluvien osien määrä vähenee (Zheng 2017).

Täyssähköautoon verrattuna polttokennon etuna on pidempi kantama, sekä nopeampi tankkausaika. Vedyn tankkaaminen kestää alle viisi minuuttia, kun taas sähköauton akustoa saa ladata puolesta tunnista kymmeneenkin tuntiin (Tesla 2017).

Polttokennoauton voimansiirtolinjan pääkomponentteja ovat polttokenno, sähkömoottori, akusto ja vetysäiliöt. Vetykaasu kulkeutuu vetysäiliöstä polttokennolle, joka tuottaa vedystä ja ilmasta sähköä. Polttokennon tuottama sähkö kulkeutuu ohjainlaitteelle, joka säätelee sähkönkulkua käyttölaitteille ja sähkömoottorille. Sähköä voidaan ohjata myös akustolle, mikäli sitä halutaan ladata ajon aikana. Polttokennossa reaktiotuotteena syntyvä vesihöyry kulkeutuu pakoputkeen. Kuten hybridiajoneuvoissa myös polttokennoajoneuvoissa voidaan säästää energiaa sammuttamalla moottori esim. liikennevaloissa tai keräämällä jarrutusenergia talteen (UCSUSA n.d.). Akuston tehtävänä on tarjota lisävirtaa vaativissa tilanteissa, kuten nopeissa kiihdytyksissä. Alla olevassa kuviossa näkyy esiteltyjen komponenttien sijainnit ja tehtävät.



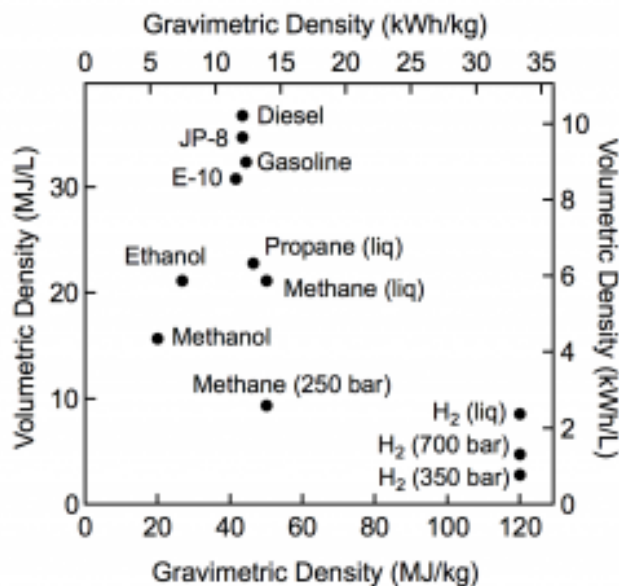
KUVIO 5. Kuinka polttokennoauto toimii (Hybrid cars 2013)

Sähkökäyttöisillä autoilla akustot pyritään suunnittelemaan niin, ettei niitä tarvitse auton elinkaaren aikana vaihtaa ollenkaan. Tämä minimoi sähköautojen huoltotarvetta. Akut ovat kuitenkin myös sähköautojen haittapuoli, sillä ne ovat raskaita ja lisäävät auton massaa huomattavasti. Polttokennot vaativat myös energianlähteen ja vetysäiliöt tuovat yhtä lailla ylimääräistä massaa auton rakenteeseen. Sekä akut, että vetysäiliöt on suunniteltava niin, etteivät ne aiheuta turvallisuusriskejä, esimerkiksi ajoneuvon ylikuumentuessa, mahdollisen sähkövian tai muun häiriön vuoksi. (Zheng 2017.)

Vedyn hyödyntäminen sähköntuotannossa on kannattavaa, koska sähkön kuljettaminen akuissa on hankalaa. Akut ovat raskaita ja niiden varaustaso putoaa tasaisesti akusta riippuen 2-30 % kuukaudessa, johtuen sisäisistä reaktioista (Battery and Energy Technologies 2005). Vetyä pystytään varastoimaan kaasuna, nesteinä ja kiinteinä käyttökohteesta riippuen ja sen vuoksi sitä on helpompi kuljettaa ympäri maailmaa. Vedyn sisältämä ener-

gia ei myöskään kulu siirrettäessä ja tämän vuoksi vedyn tuotanto voidaan sijoittaa sellaisiin paikkoihin, missä pelkkä sähköntuotanto ei olisi kannattavaa. Näin saadaan uusia energian lähteitä, kuten aurinko- ja tuulivoima, paremmin käyttöön. (Toyota Mirai 2015 Hope.)

Alla olevassa kuviossa on vasemmalla sivulla polttoaineiden energiatiheys megajouleina litraa kohden ja oikealla sivulla kilowattitunteina litraa kohden. Vaakaviivoilla on massa-analyttinen energiatiheys, eli massaan perustuva energiatiheys. Alhaalla se on megajouleina kilogrammaa kohden ja ylhäällä kilowattitunteita kilogrammaa kohden. Kuviossa nähdään eri polttoaineiden energiatiheksiä toisiinsa verrattuna.



KUVIO 6. Energiatiheyksien vertailu (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy n.d)

Yllä olevan kuvion perusteella perinteisillä polttoaineilla, dieselillä ja bensiinillä, on kohdallinen gravimetrinen energiatiheys, eli kilogrammassa on noin kaksitoista kilowattituntia energiaa. Tilavuuteen perustuva energiatiheys sen sijaan on huomattavasti parempi kuin vedyllä, sillä litrassa dieseliä on yli kymmenen kilowattituntia energiaa. Vetykaasuilla, sekä nestemäisellä vedyllä, sen sijaan on huomattavasti parempi gravimetrinen energiatiheys, eli noin 120 kilowattituntia kilogrammaa kohden. Volumetrinen energiatiheys on sen sijaan todella pieni, sillä vetykaasun tiheys on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi dieselin. Myöskin nestemäisellä vedyllä volumetrinen energiatiheys on vain kahden kilowattitunnin luokkaa litraa kohden.

## 7 SOVELLUKSET AJONEUVOISSA

Monet autonvalmistajat ovat jo tehneet polttokennoautoja. Ensimmäisenä kaupallisille markkinoille vuonna 2013 polttokennoauton toi Hyundai, jota löytyy jo myös Suomesta Voikoskelta. Muita kaupallisia vetyautoja ovat Mercedes-Benz GLC F-Cell ja Toyota Mirai. Tämä lisäksi muutkin autovalmistajat ovat valmistaneet vetyautoja, mutta ne ovat olleet joko prototyyppejä tai leasingautoja. Vetyautomalleja on ollut mm. Audi A7 H-tron, Honda Clarity, Ford Focus FCV, Chevrolet Equinox FCV, Nissan X-Trail FCV.

### 7.1 Hyundai ix35 FCEV

Hyundai toi ensimmäisenä autovalmistajana markkinoille kaupalliseen myyntiin tarkoitetun vetyauton, jota alettiin valmistaa Koreassa 2013. (Hyundai 2014) Hyundain vetyautoja on myyty mm. Pariisiin taksikäyttöön ja niitä löytyy jopa Suomesta yksi (Hyundai 2015). Autosta käytetään myös nimeä Hyundai Tucson, jolla sitä markkinoidaan USA:ssa.

Hyundain voimansiirtolinja koostuu vetysäiliöstä, joka on alla olevan kuvion mukaisesti sijoitettu auton takaosaan, auton keskellä olevasta akustosta ja keulalta löytyvistä sähkömoottorista ja polttokennostosta. Sähköntuottamiseksi vety kulkeutuu vetysäiliöstä polttokennolle auton etuosaan. Etupuskurissa olevista ilma-aukoista tulee ilmaa, joka reagoi polttokennossa vedyn kanssa, tuottaen sähköä sähkömoottorille. Polttokennolta lähtee pakoputki auton perään, joka kuljettaa reaktioaineena syntyvän vesihöyryn ulos.



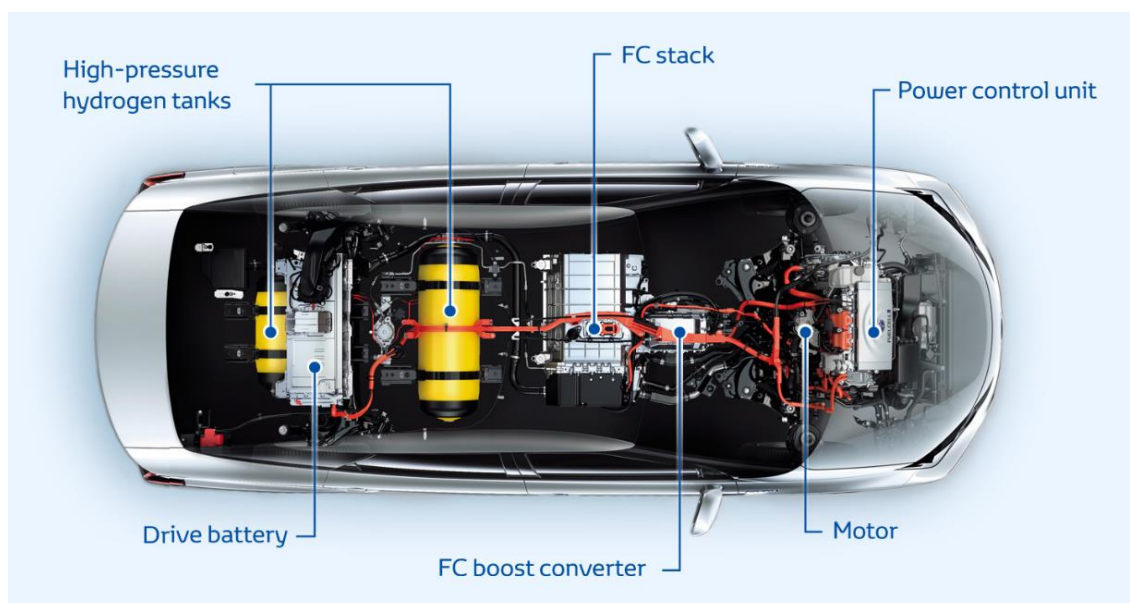
KUVIO 7. Hyundai ix35:n voimansiirtolinja (EV World 2014)

Syksyn 2017 Frankfurtin autonäyttelyssä Hyundai esitteli seuraavan sukupolven vetyauton, joka on paranneltu versio nykyisestä mallista. Uudessa mallissa on mm. noin 20 % enemmän tehoa vanhaan malliin verrattuna. Uuden sukupolven autolla ei ole vielä omaa nimeä ja autosta saadaankin lisätietoa vasta alkuvuonna 2018. (CNET 2017.)

## 7.2 Toyota Mirai

Toyota aloitti Mirain valmistuksen 2014 ja ensimmäiset autot olivat myynnissä USA:ssa 2015. Mirai on malliltaan viisiovinen sedan ja eroaa näin ollen GLC:stä ja ix35:sta.

Alla on kuvattu Mirain voimansiirtolinja auton alustassa. Vetysäiliö ja polttokenno on sijoitettu auton keskiosaan, sähkömoottori keulalle ja akusto auton takaosaan, jotta paino on jakautunut tasaisesti koko rungon mitalle. Ilmaa polttokennolle tulee isojen, auton keulassa sijaitsevien ilmanottoaukkojen kautta. (Toyota 2017.)



KUVIO 8. Toyota Mirain voimansiirtolinja (Toyota 2017)

Tämän hetkinen korimalli on seitsemättä sukupolvea, sillä Toyota on alkanut valmistaa vetyautoja jo 1996. Kuudennen ja seitsemännen sukupolven välillä on kuitenkin tapahtunut suuria muutoksia. Uuden sukupolven Miraissa polttokennosta saadaan esimerkiksi kaksinkertainen määrä tehoa vanhempaan verrattuna. Myös valmistuskustannuksia on saatu huomattavasti pienennettyä. Toyota käyttää Miraissa muissa malleissaan käytettäviä osia, mikä helpottaa tuotantoa ja tekee osista halvempia. (Forbes 2016.)

### 7.3 Mercedes-Benz GLC F-Cell

GLC-sarjan vedyllä toimiva malli esiteltiin ensimmäisen kerran syksyn 2017 Frankfurtin autonäyttelyssä ja se on ensimmäinen plug-in-hybridi, joka hyödyntää polttokennotekniikkaa. Autossa on siis sekä laturinpistoke akuille, että täyttö vetysäiliöille. (CNET. 2017.)

Alla olevassa kuvassa on kuvattu näyttelyssä esillä ollut GLC:n voimansiirtolinja. Sähkömoottori ja polttokenno on sijoitettu perinteiseen moottoritilaan ja akusto ja vetysäiliö on sijoitettu auton takaosaan. B-sarjan vetyhybridiin verrattuna GLC:ssä on saatu pienennettyä polttokennon kokoa, jolloin se on saatu sijoitettua kokonaan moottoritilaan. Polttokennossa on myös vähennetty huomattavasti platinan käyttöä, mikä laskee valmistuskustannuksia ja luonnonvarojen käyttöä. Polttokennosta saatava teho on myös kasvanut B-sarjalaiseen verrattuna. (Daimler 2017.)



KUVA 2. GLC:n voimansiirtolinja (Moottori 2017)

Sähkömoottorina GLC:ssä on epätahtimoottori, joka tuottaa tehoa 147 kilowattia ja vääntöä 350 Newton metriä. Sähkömoottori ei tarvitse kardaaniakselia, joten sen paikalla kulkee pitkittäin yksi vetytankki ja toinen on sijoitettu yllä olevan kuvanmukaisesti takais-tuimen alapuolelle. Keskilinjaa kulkee myös pakoputki polttomoottorilta auton takaosaan, josta reaktiona syntyvä vesihöyry poistuu (Daimler 2017.)

GLC:ssä on neljä eri ajotilaa, joista jokainen hyödyntää voimanlähteitä hieman eri lailla. Autoa voi käyttää hybridi-tilassa, joka hyödyntää tilanteen mukaan sekä polttokennoa,

että akustoa, tai sitä voidaan ajaa käyttäen vain toista voimanlähdettä. Neljännessä ajotilassa pyritään lataamaan akustoa, eli ajetaan polttokennosta saatavalla energialla ja ylijäävällä energialla ladataan akustoa. Ylijäämäenergiaa syntyy esim. polttokennosta, jos kaikkea tehoa ei käytetä ja jarrutettaessa. (Daimler 2017.)

## 7.4 Yhteenveto

Alla olevaan taulukkoon on koottu yllä mainittujen ajoneuvojen tärkeimmät tiedot vertailtavaksi. Taulukosta huomaa, että ajoneuvot ovat hyvin samankaltaisia suorituskyvyiltään. Hyundain mallista on esillä syksyn 2017 tiedot, uuden sukupolven mallissa, joka julkaistaan 2018, on tehokkaampi moottori (CNET 2017). Näin ollen se ei ole enää selvästi kahta muuta esiteltyä autoa tehottomampi.

TAULUKKO 2. Teknisten tietojen yhteenveto

	Toyota Mirai	MB GLC	Hyundai ix35
Markkinoille	2015	2019 (tavoite)	2013
Kantama (yhdistetty)	500 km	480 km	600 km
Tankin maksimitäyttö	5 kg	4,4 kg	5,6 kg
Tankin täyttöaika	3-5 min	3 min	3 min
Maksimiteho	113kW	147 kW	100 kW
Maksimivääntö	335 Nm	350 Nm	221 Nm
Huippunopeus	179 km/h	160 km/h (rajoitettu)	160 km/h
PA-järjestelmän paine	700 bar	700 bar	700 bar
Akkutyypä	nikkelimetalli	litiumioni	litiumioni

Henkilöajoneuvot eivät ole ainoa kohde mihin hybriditeknologiaa halutaan soveltaa. Sitä voidaan hyödyntää kaikissa laitteissa, joissa tällä hetkellä käytetään polttomoottoria. Hybriditeknologiaa on sovellettu jo rahtiliikenteessä, eli junissa ja laivoissa.

## 8 POHDINTA

Vedystä on ennustettu seuraavaa energian pääraaka-ainetta, mutta sen kehitys on tällä hetkellä vasta alussa. Vedylle tarvittavan jakeluverkoston rakentaminen on vasta aloitettu ja vedyn valmistus itsessään ei ole tällä hetkellä edullista. Teknologia ei kehity niin nopeasti, sillä vain muutama autovalmistaja on tosissaan siihen paneutunut. Moni autovalmistaja panostaakin nyt täyssähkö- ja sähköhybridiajoneuvoihin. Akkuteknologian toivotaan kehittyvän paremmaksi muutaman vuoden kuluessa ja joitain läpimurtoja onkin tehty, mutta tällä hetkellä paras teknologia on vielä liian kallista massatuotantoon. Tämä puoltaisi vetyajoneuvojen kehitystä, sillä ne, kuten polttomoottorihybriditkin, älykkäästi vaihtelevat sähkökäytön ja polttoaineen käytön välillä optimoidakseen parhaan kantaman ja suorituskyvyn.

Täyssähköautoihin verrattuna vetykäyttöisellä ajoneuvolla on parempi kantama ja vedyn tankkaaminen on nopeampaa kuin akkujen lataaminen. Hinta on kuitenkin korkeampi verrattuna halvimpiin täyssähköautoihin. Tällä hetkellä markkinoiden halvin täyssähköauto on kaksipaikkainen Renault Twizy, jonka lähtöhinta on vain 14 000 euroa. Renaultin kantama jää sataan kilometriin. Mikäli halutaan kantamaltaan perinteistä autoa vastaava täyssähköauto, lähimmäksi osuu Teslan Model S ja Model X. Teslan kantama on neljästä sadasta jopa kuuteensataan kilometriin, mutta hinta on jo huomattavasti korkeampi, 86 000 – 171 000 euroa. Toyota Mirain kantama on viisisataa kilometriä ja sen hinta on noin satatuhatta euroa. Mirai ei ole vielä Suomessa markkinoilla, joten hinta voi olla Suomessa eri, kuin muualla Euroopassa. (Vihreäkaista 2017.)

Sähkön hinta vaihtelee kolmesta ja puolesta sentistä hieman yli yhdeksään senttiin kilowattitunnilta (Energiavirasto 2018). Sähköauton sähkönkulutuksen voi laskea kertomalla sähkönhinnan (snt/kWh) sähköauton kulutuksella sataa kilometriä kohden (kWh). Sähköauton energiankulutukseen vaikuttavat sen akuston koko, sekä luonnollisesti sen massa ja moottorin hyötysuhteet, sekä energiankulutusta lisäävät tekijät, kuten sähkölaitteiden käyttö. Sähkönkulutus on laskettu maksavan noin kaksi euroa sataa kilometriä kohden, kun polttomoottorikäyttöisellä autolla kulutus on noin kymmenen euroa (Vihreäkaista 2015). Sähkönkulutus riippuu vuodenajasta ja sääolosuhteista, sekä ajotyylillä. Tämän vuoksi sähköauton käyttökustannusten hintahaitaria on vaikea arvioida.

Vetykaasu maksaa noin kymmenen euroa kilo, eli säiliön täyttö maksaisi noin viisikymmentä euroa. Tällöin polttoainekustannuksia tulisi noin kymmenen euroa sataa kilometriä kohden. Hinta ei ole kilpailukykyinen sähköautoon verrattuna, mutta se on samaa luokkaa polttomoottorikäyttöisen auton kanssa. Sähköautoon verrattuna säiliön täyttö vetyajoneuvossa on huomattavasti nopeampaa ja näin kuluttajaystävällisempää. Etenkin matkalla ollessa huoltoasemalla täyttö on helpompaa ja nopeampaa kuin akuston lataaminen.

Vetyautoja myydään jo Euroopassa, USA:ssa ja Japanissa ja niille tarvittavaa infrastruktuuria luodaan jatkuvasti. Vetyautojen yleistymiseen vaikuttaa polttoaineverkoston ohella niiden yleinen hyväksyttävyyys, sekä autojen ulkonäkö, että niillä saavutettavat tavoitteet. Ihmiset tavoittelevat ajoneuvolla eri asioita riippuen siitä, mikä heille on tärkeää. Toiset ihmiset nostavat autolla asemaansa, toiset haluavat mahdollisimman halvan auton ja toiset haluavat pienentää omaa hiilijalanjälkeään. Vetyautojen yleistyminen vaatii ensisijaisesti enemmän malleja muilta autovalmistajilta kilpailun parantamiseksi ja huomattavaa hinnan pudotusta. Euroopassa vetyautojen markkinaosuus kasvaa todennäköisesti jo 2020-luvulla, ellei akkuteknologiassa tapahdu suuria muutoksia.

Suomessa vedyn käyttö ajoneuvoissa ei tule yleistymään ainakaan kymmeneen vuoteen. Vedyn jakelulle tarvittava verkosto puuttuu vielä täysin ja verkoston rakentamisen jälkeen kestää muutama vuosi, että kuluttajat löytävät uuden teknologian. Suomessa oleva autokanta on muuta Eurooppaa huomattavasti vanhempaa, joten siirtyminen uusiin teknologioihin koko maassa on hitaampaa kuin Euroopassa.

Suurin hyöty polttomoottoriautoon verrattuna vetyautossa on päästöttömyys. Ilmastonmuutoksen edetessä myös henkilöautojen ja rahtiliikenteen päästöjä on saatava järkevällä tavalla vähennettyä. Rahtiliikenteessä, joka kulkee tiettyä reittiä, on vetykaasun saatavuus helposti toteutettavissa. Juna ja laivaliikenteeseen polttokenno on hyvä ratkaisu päästöttömyyden lisäämiseen. Vetysäiliöt ovat myös turvallisempia kuin tavalliset polttoainesäiliöt, joissa on fossiilista polttoainetta. Räjähdysvaara ei ole läheskään niin suuri ja sytyessään vetykaasu palaa lähes näkymättömällä liekillä synnyttämättä rajuja lämpötiloja.

Huonoja puolia polttokennoissa on korkea hinta, joka aiheutuu polttokennon monimutkaisuudesta ja kalliista osista. Myöskin huollot ja korjaukset ovat todennäköisesti hintavia ja ainakaan Suomessa niihin ei tällä hetkellä ole laajaa osaamista. Polttokennoautossa on

polttokennon lisäksi akusto, joka on myös hintava komponentti. Akuston huolto ja korjaus vaativat osaavan ammattilaisen ja ovat näin ollen yleensä kalliita.

Vedyn käyttäminen polttoaineena muissakin kuin ajoneuvoissa on erittäin kannattavaa, sillä vety on mainio energiavarasto, jolla voidaan tasapainottaa uusiutuvan energian käyttöön liittyviä energiapiikkejä. Hyvillä vetyvarastoilla voidaan hyödyntää myös esim. aavikoilta saatava aurinkoenergia paremmin, sillä sinne ei tarvita niin suurta sähkönjakeluverkkoa. Auringosta saatava energia varastoidaan vedyksi, joka voidaan helpommin kuljettaa muualle maailmaan, rakentamatta laajaa sähköverkostoa. Energian varastointi helpottaa myös saarivaltioiden energian tuottamista ja kulutusta, sillä ne voivat olla paremmin itsenäisiä käyttämällä uusiutuvaa energiaa ja tasoittamalla varastoinnin avulla energiapiikkejä. Esimerkiksi saarivaltioissa tuulienergian käyttöä helpottaa, kun kovan tuulen aikana energiaa saadaan kerättyä talteen ja voidaan käyttää varastosta tyynellä säällä.

Vetyauton ja vedyn käyttöä polttoaineena lisää tulevaisuudessa sen valmistuksen muutos. Tällä hetkellä vetyä valmistetaan käyttäen fossiilisia polttoaineita, mutta kun vetyä pystytään valmistamaan pelkästään uusiutuvalla energialla, on se täysin päästötön polttoaine. Hyötysuhde polttokennossa ei ole yhtä hyvä kuin täyssähköautossa, sillä vety joudutaan ensin valmistamaan sähköllä, mutta polttokennoautoa voi käyttää hätätilanteessa myös sähkölähteenä paremmin kuin sähköautoa. Toyota lupaaikin, että Miraita pystyy käyttämään sähkötalon koittaessa sähkön lähteenä. Tällä hetkellä polttokennoteknologia ei ole vielä täysin valmis, mutta sen kehittäminen on ehdottomasti kannattavaa. Ajoneuvojen siirtyminen pelkkiin täyssähköautoihin ei ole todennäköistä ja rinnalle tarvitaan toimiva päästötön hybridimalli.

## LÄHTEET

Automobile Catalog. 2017. Ferrari 4.9. Luettu 30.3.2017. [http://www.automobile-catalog.com/auta\\_details1.php](http://www.automobile-catalog.com/auta_details1.php)

Ammattiautot. 2014. Woikoski avasi toisen vetyaseman. Luettu 2.1.2018. <http://www.ammattiautot.fi/uutiset/woikoski-avasi-toisen-vetyas.eman/>

Battery and Energy Technologies. 2005. Battery Performance Characteristics. Luettu 2.1.2018. <http://www.mpoweruk.com/performance.htm>

BIOS. N.d. Description of the biomass CHP technology based on biomass gasification. Luettu 8.1.2018. <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/biomass-gasification.html>

Car and Driver. 2017. The 10 Quickest Cars of the 1950s. Luettu 30.3.2017. <http://www.caranddriver.com/flipbook/car-and-driver-tested-the-10-quickest-cars-of-the-1950s#11>

Carlowicz, M. 2017. Earth Observatory. Global Temperatures. Luettu 31.3.2017. <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/decadaltemp.php>

CNET. 2017. Mercedes GLC F-Cell takes a unique approach to hydrogen. Luettu 22.11.2017. <https://www.cnet.com/roadshow/news/mercedes-glc-f-cell-takes-a-unique-approach-to-hydrogen/>

Daimler. 2017. GLC F-Cell goes into preproduction. Luettu 22.11.2017. <https://www.daimler.com/innovation/specials/iaa-2017/glc-fcell-2.html>

Encarta MSN. 2007. Hydrogen. Luettu 12.4.2017. [http://web.archive.org/web/20080409084818/http://encarta.msn.com/encyclopedia\\_761552913/Hydrogen.html](http://web.archive.org/web/20080409084818/http://encarta.msn.com/encyclopedia_761552913/Hydrogen.html)

Energy Observer. 2017. The first hydrogen vessel around the world. Luettu 2.1.2017. <http://www.energy-observer.org/en/#actu>

Energiavirasto. 2018. Sähkön hintavertailu. Luettu 2.1.2018. <https://www.sahkon-hinta.fi/results>

EV World. 2014. Hyundai Fuel Cell Engine Named Among 10 Best for 2015. Luettu 9.11.2017. <http://evworld.com/news.cfm?newsid=34781>

Ewing, M. Forbes. 2016. Toyota Mirai Fuel Cell Hybrid Vehicle Test Drive: A Hydrogen Future. Luettu 22.11.2017. <https://www.forbes.com/sites/markewing/2016/11/07/toyota-mirai-fuel-cell-hybrid-vehicle-test-drive-a-hydrogen-future/>

Friedlmeier, T. 2015. Renewable Energy Sources and Carriers. University of Applied Sciences Esslingen. Oppimateriaali.

Fuel Cell Today. 2018. AFC. Luettu 8.1.2018. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/afc>

Fuel Cell Today. 2018. DMFC. Luettu 8.1.2018. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/dmfc>

Fuel Cell Today. 2018. MCFC. Luettu 8.1.2018. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/mcfc>

Fuel Cell Today. 2017. History. Luettu 6.4.2017. <http://www.fuelcelltoday.com/history>

Fuel Cell Today. 2017. PAFC. Luettu 8.5.2017. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pafc>

Fuel Cell Today. 2017. PEMFC. Luettu 6.4.2017. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>

Fuel Cell Today. 2018. SOFC. Luettu 8.1.2018. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/sofc>

Gencell. 2017. Types of Fuel Cell. Luettu 18.5.2017. <http://www.gencell-energy.com/en/technology/fuels/>

GSTC. N.d. Biomass Gasification. Luettu 8.1.2018. <http://www.gasification-syn-gas.org/applications/biomass-gasification/>

H2 Mobility. 2017. H2 stations. Luettu 2.1.2018. <http://h2-mobility.de/en/h2-stations/>

Halinen, M. 2007. Polttokennot. VTT Teknologiasta liiketoimintaa. PDF-tiedosto. Luettu 19.10.2017. <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen107.pdf>

Helsinki, opettajan aineisto. 2017. Vety. Luettu 18.5.2017. <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/kaasut/vety.html>

Hybrid Cars. 2013. How Fuel Cell Vehicles Work. Luettu 8.1.2018. <http://www.hybrid-cars.com/how-fuel-cell-vehicles-work/>

Hyundai. 2015. Hyundai ix35 Fuel Cell. Luettu 7.11.2017. <https://www.hyundai.fi/hyundai-ix35-fuel-cell/>

Hyundai. 2015. Hyundaiin polttokennoautoja Pariisiin taksiin. Luettu 7.11.2017. <https://www.hyundai.fi/hyundaiin-polttokennoautoja-pariisin-taksiin/>

Hyundai. 2014. Suomen ensimmäinen vetykäyttöinen Hyundai ix35. Luettu 7.11.2017. <https://www.hyundai.fi/suomen-ensimmainen-vetykayttoinen-hyundai-ix35/>

Hyundai USA. 2017. Tucson fuel cell. Luettu 22.11.2017. <https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell/index.aspx>

Inside EVs. 2016. Toyota envisions mobile hydrogen fueling stations. Luettu 8.1.2018. <https://insideevs.com/toyota-envisions-mobile-hydrogen-fueling-stations/>

Lund, P., Himanen, O. 2003. Vetyteknologiat. Helsinki University of Technology Publications in Engineering Physics. PDF-tiedosto. Luettu 2.1.2018

Nasa. 2016. Global Temperature. Luettu 2.1.2017. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

Moottori. 2017. Mercedes Benz: GLC F-Cell-lataushybridi esituotantoon. Luettu 22.11.2017. <https://www.moottori.fi/ajoneuvot/jutut/mercedes-benz-glc-f-cell-lataushybridi-esituotantoon/>

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2005. Tekniikan kaavasto. 5. painos. Tampere: AMK-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. 2016. Fuel Cells comparison chart. [https://energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto\\_fuel\\_cells\\_comparison\\_chart\\_apr2016.pdf](https://energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto_fuel_cells_comparison_chart_apr2016.pdf)

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d. Comparison of Fuel Cell Technologies. Luettu 2.1.2018. <https://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. N.d. Hydrogen production: Biomass gasification. Luettu 8.1.2018. <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. N.d. Hydrogen Production: Electrolysis. Luettu 8.1.2018. <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d. Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. Luettu 6.10.2017. <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d. Hydrogen Production Pathways. Luettu 6.10.2017. <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-pathways>

Potree, D., Trevino, R. 1997. Walking to Olympus: An EVA Chronology. PDF-tiedosto. Luettu 9.5.2017. <https://www.jsc.nasa.gov/history/walking/EVACHron.pdf>

Ranta, A., Noponen T., Granström T., Scotti, G-M., Kanninen P., Franssila S., Halme, A., 2010. Professori-lehti. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu. PDF-tiedosto. Luettu 13.10.2017. <https://trip.ayy.fi/wiki/images/METANOLIPATRUUNA.pdf>

Tesla. 2017. Lataaminen. Luettu 8.11.2017. [https://www.tesla.com/fi\\_FI/charging?redirect=no](https://www.tesla.com/fi_FI/charging?redirect=no)

Tivi. 2008. Polttokenno valmis kauppoihin. Luettu 26.4.2017. <http://www.tivi.fi/Videot/2008-10-07/Polttokenno-valmis-kauppoihin-3157895.html>

Toyota. 2017. Learn about hydrogen. Luettu 23.11.2017. <https://ssl.toyota.com/mirai/fuel.html>

Toyota. 2017. Mirai Product Information. PDF-tiedosto. Luettu 22.11.2017. <https://ssl.toyota.com/mirai/assets/core/Docs/Mirai%20Specs.pdf>

Toyota. 2017. 2017 Toyota Mirai Fuel Cell Vehicle. Luettu 23.11.2017. <https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>

Toyota Global. 2015. ToyotaMirai: Hope: The Hydrogen Society and Energy Sources of the Future. Youtube-video. Katseltu 8.11.2017. <https://www.youtube.com/watch?v=Kg3OJgOkTKk>

Toyota Global. 2017. Powering the future. Luettu 8.11.2017. [http://www.toyota-global.com/innovation/environmental\\_technology/fuelcell\\_vehicle/](http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/)

United State Environmental Protection Agency (EPA). 2014. Global Emissions by Economic Sector. Luettu 3.3.2017. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>

UCSUSA. N.d. Clean Vehicles. Luettu 8.1.2018. <https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/how-do-hydrogen-fuel-cells-work#.WIN1ad9I9PY>

Valmet. 2018. Valmet CFB Gasifier for biomass and waste. Luettu 8.1.2018. <http://www.valmet.com/energyproduction/gasification/>

Vihreäkaista. 2017. Suomessa myytävät sähköautot. Luettu 2.1.2018. <https://vihreäkaista.fi/fi-fi/article/sahko/suomessa-myytavat-sahkoautot-2017/676/>

Ympäristöministeriö. 2016. Pariisin ilmastopimus. Luettu 31.3.2017. <http://www.ym.fi/pariisi2015>

Zheng, W. 2012. A Novel Structure of a Direct Methanol Fuel Cell: Design, Research and Assembly. Turun Yliopisto. PDF-tiedosto. Luettu 26.4.2017. [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77483/PhD\\_Zheng\\_Wukui\\_doria.pdf?sequence=1](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77483/PhD_Zheng_Wukui_doria.pdf?sequence=1)