



Vetypolttokennotekniikan käyttö henkilöautoissa

Ville Lappalainen

Joni Laulajainen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Ajoneuvotekniikka
Auto- ja Korjaamotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Korjaamotekniikka

LAPPALAINEN, VILLE & LAULAJAINEN, JONI:
Vetypolttokennotekniikan käyttö henkilöautoissa

Opinnäytetyö 62 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2022

Opinnäytetyössä selvitetään vetypolttokennotekniikan mahdollisuuksia olla osana tulevaisuuden globaalia henkilöautoliikennettä. Ilmastonmuutos sekä riippumattomuus fossiilisesta energiasta ohjaavat kuluttajia harkitsemaan vaihtoehtoisia käyttövoimia osana arjen liikkumista, joten työssä selvitetään vetypolttokennolla toimivien henkilöautojen tarjoamia mahdollisuuksia. Työssä käsitellään polttokennojen historiaa, vetyä alkuaineena sekä sen soveltuvuutta henkilöautojen käyttövoimaksi. Lisäksi tarkastellaan vedyn tuotantoa, infrastruktuuria sekä polttokennoautojen käytännön sovellutuksia. Työssä myös pohditaan vetyhenkilöautoiluun liittyviä ongelmia.

Opinnäytetyön aihe valikoitui tekijöiden mielenkiinnosta aihetta kohtaan aiheen ollessa maailmanlaajuisesti ajankohtainen. Euroopan Unioni, kuten myös muut tahot kiristävät ilmastopolitiikkaa sekä vähentävät riippuvuutta fossiilisiin polttoaineisiin, kuten raakaöljyyn. Vallitseva maailmantilanne aiheuttaa öljynhinnan nousua, joka näkyy suoraan myös bensiinin ja dieselin hinnassa. Ajoneuvojen käyttäjät etsivät korvaavia vaihtoehtoja perinteisten polttomoottoriajoneuvojen tilalle. Päästörajoitusten kiristäminen vaikuttaa suoraan ajoneuvojen valmistus- ja ylläpitokustannuksiin vähentäen polttomoottorilla toimivien autojen asiakaskuntaa entuudestaan. Ladattavien sähköautojen valtava kysyntä on ylittänyt valmistajien kapasiteetin tuottaen autoja kuluttajille ja sähköautojen käyttöön liittyy myös erilaisia ongelmia, joihin vetypolttokennolla toimiva henkilöauto tarjoaa ratkaisuja.

Toyota ja Hyundai ovat maailman edelläkävijöitä vetypolttokennolla toimivien henkilöautojen kehityksessä muiden ajoneuvovalmistajien investoidessa ladattavien sähköautojen kehitykseen. Vedyn tankkausinfrastruktuurin ollessa merkittävästi puutteellinen, Aasialaiset merkkiedustukset pyrkivät innostamaan myös muita ajoneuvovalmistajia mukaan vetyautoiluun edistääkseen käyttövoiman yleistymistä maailmalla.

Opinnäytetyössä ilmenneiden tietojen perusteella voidaan todeta vetypolttokennoilla toimivien henkilöautojen olevan varteenotettava vaihtoehto lähitulevaisuuden voimanlähteenä. Suurimmat haasteet ovat puutteellinen vedyn tankkausinfrastruktuuri sekä puhtaan vedyn tuotanto. Uusiutuvan energian tuotannon kasvaessa sekä elektrolyysitekniikan kehittyessä myös vetypolttokennoilla toimivat henkilöautot tulevat osaksi maailmanlaajuisesta tieliikennettä.

Asiasanat: polttokenno, vety, päästöt

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Vehicle Technology
Automotive and Workshop Technology

LAPPALAINEN, VILLE & LAULAJAINEN, JONI:
Use of Hydrogen Fuel Cell Technology in Passenger Cars

Bachelor's thesis 62 pages, appendices 0 pages
May 2022

The purpose of this thesis was to clarify possibilities of hydrogen fuel cell technology to be a part of global passenger car traffic. Climate change and independence from fossil energy are driving consumers to consider alternative ways for everyday mobility, so thesis was made to find out if hydrogen-powered cars can solve this problem. The thesis dealt with history of fuel cells, hydrogen and its production, infrastructure, and practical applications. Problems of hydrogen cars have also been thought of.

The topic of the thesis was chosen by authors interest in hydrogen cars. The subject was very topical as EU has planned to tighten its climate policy even more. Current world situation also caused oil price to rise which correlated to gas and diesel prices. Consumers have begun to look for alternatives to internal combustion engine vehicles. Tightening emission limits will have a direct impact on manufacturing costs, which will affect on customers interest in gas and diesel vehicles. The huge demand for electric vehicles has exceeded the capacity of manufacturers ability to produce cars for consumers. Electric vehicles have their own problems, for which the fuel cell car offers a solution. The automotive industry must figure out a solution where supply and demand meet each other's again.

Only few vehicle manufacturers believe in hydrogen opportunities, which limits development and research of hydrogen fuel cells. The largest manufacturers in hydrogen industry are Toyota and Hyundai. Asian dealerships seek to inspire other vehicle manufacturers to develop hydrogen cars to become more popular in the world, leading to faster infrastructure development.

Based on researched information in the thesis, it was noticed that hydrogen fuel cell vehicles are a viable option in the vehicle market. Due to poor hydrogen infrastructure, fuel cell cars have not achieved breakthrough in the market. Depending on the method of production, hydrogen can be emission-free, which is why hydrogen might be a source of energy in future vehicles. Driving with fuel cell cars is more expensive than driving electric vehicles because of poor infrastructure and low volume on hydrogen cars.

Key words: fuel cell, hydrogen, emissions

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	VETYPOLTTOKENNOTEKNIIKAN HISTORIAA	7
3	VETY	13
	3.1 Vety alkuaineena.....	13
	3.2 Vedyn olomuodot ja ominaisuudet	14
	3.3 Ilmaantuvuus.....	18
4	VEDYN TUOTANTO JA HYÖDYNTÄMINEN	19
	4.1 Höyryreformointi.....	19
	4.2 Elektrolyysi.....	20
	4.3 Biomassan kaasuunutus	22
5	VEDYN JAKELUVERKOSTO	24
	5.1 Infrastrukturi	24
	5.2 Vetysäiliöt ja tankkaus.....	28
6	VETYPOLTTOKENNOT	34
	6.1 Polttokennojen toimintaperiaate	35
	6.2 Protoninvaihtopolttokenno.....	36
	6.3 Kiinteäoksidipolttokenno	37
7	VETYPOLTTOKENNOAJONEUVOT.....	39
	7.1 Toyota Mirai	39
	7.2 Hyundai Nexo.....	41
	7.3 Mercedes-Benz GLC F-Cell	42
	7.4 BMW iX5 Hydrogen.....	43
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	45
	8.1 Historian vaikutus vetyautoilun kehitykseen	45
	8.2 Vedyn käyttö tulevaisuuden henkilöautoliikenteessä	46
	8.3 Vedyn soveltuvuus henkilöautojen polttoaineeksi	47
	8.4 Vedyn ominaisuudet verrattuna muihin energialähteisiin	47
	8.5 Vedyn tuotannon kehittäminen.....	51
	8.6 Vetyautoilun suurimmat haasteet ja ongelmat	53
	8.7 Lähteiden luotettavuuden arviointi.....	55
	LÄHTEET.....	56

1 JOHDANTO

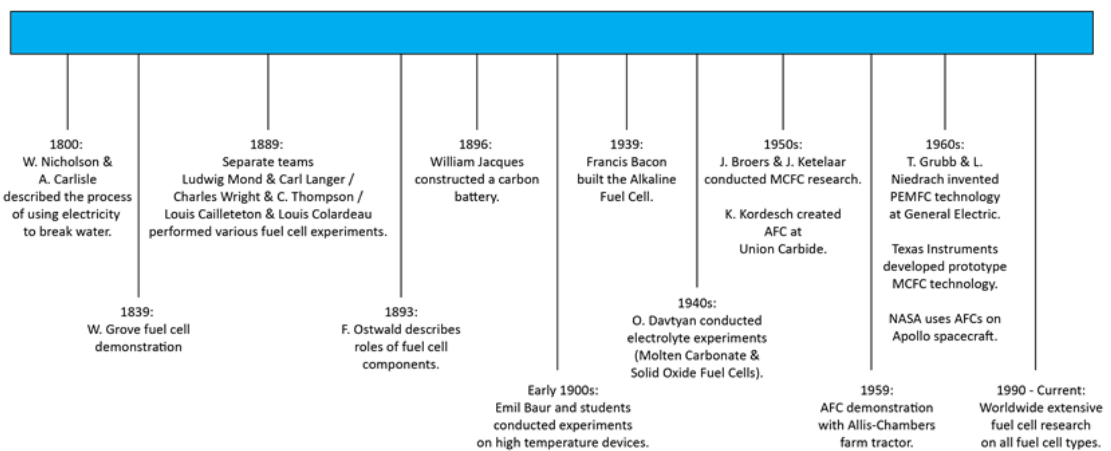
Liikenteen käyttämien fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat kasvihuone- ja hiilidioksidipäästöt ovat kasvaneet tasaisesti vuosikymmenten saatossa tähän päivään saakka. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna kaikki liikkumismuodot aiheuttavat entistä enemmän hiilidioksidipäästöjen yhteiskertymää, erityisesti kehitysmaiden talouskasvun myötä ajoneuvojen kappalemäärien ja yhteenlaskettujen ajokilometrien kasvaessa. Vuoden 2020 tilastoissa maailmanlaajuinen koronapandemia vähensi tieliikenteen päästöjä hetkellisesti, mutta päästölukemat tulevat jatkamaan kasvuaan vielä joitain vuosia ennen kuin ne kääntyvät kansainvälisten päästötoimien avulla laskuun (IEA 2021). Kansainväliset päästörajoitukset vaativat ajoneuvovalmistajia tehostamaan nykyisten polttomoottoriautojen pakokaasujärjestelmiä entisestään, vaikkakin nykyiset polttomoottoritekniikat ovat kehittyneet hyötysuhteen kautta energiatehokkaammiksi. Tämän myötä ajoneuvovalmistajat ovat alkaneet miettimään vaihtoehtoisia voimanlähteitä ongelman ratkaisemiseksi.

Yhteiskunnallisesti lisääntyneet jännitteet ovat lisänneet useiden maiden halua ja tarvetta olla riippumattomia fossiilisista energianlähteistä, kuten raakaöljystä. Lisäksi kiristyneiden ilmastotavoitteiden seurauksena ajoneuvovalmistajat tuovat markkinoille kiihtyvällä tahdilla sähköautoja vähentäen uusien polttomoottoriautojen tuotantoa. Tällä hetkellä ajoneuvoteollisuus sähköistyy voimakkaasti ja polttomoottoriautojen tuotanto tullaan lopettamaan lähitulevaisuudessa mahdollisesti kokonaan. Kuluttajien siirtymää täyssähköautoihin ovat helpottaneet tarjolla olevat hybridimallistot, joiden avulla sähköistä siirtymää on voitu toteuttaa kuluttajaystävällisesti porrastamalla. Sähköautojen hyvistä puolista huolimatta ongelmia aiheuttavat esimerkiksi suuret valmistuskustannukset, ajoakustosta johtuva autojen suuri omamassa sekä latausinfrastruktuurin puute. Lisäksi sähköautojen toimintamatka on pääsääntöisesti alhainen ja erittäin lämpötilariippuvainen. Akustojen lataaminen on myös hidasta ja voisi suuressa mittakaavassa aiheuttaa sähköverkkoon ongelmia kuormitushuippujen takia.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää vetypolttokennotekniikan käyttämistä henkilöautoissa osana tulevaisuuden henkilöautoliikennettä. Vetypolttokennoilla toimivat ajoneuvot ovat paikallispestöttömiä ja täten vartenotettava vaihtoehto ilmastoystävällisempien liikkumismuotojen kehityksessä. Riippuen vetykaasun tuotantotavasta, vetypolttokennoilla on mahdollista päästä liikkumaan jopa täysin puhtaasti vihreän vedyn avulla. Työssä käsitellään vedyn- ja polttokennojen historiaa, vetyä energianlähteenä sekä vetykaasun tuotantoa. Lisäksi työssä käydään lävitse globaalia vedynjakeluverkostoa sekä sen kehitystä ja tulevaisuutta. Työssä on myös tutkittu vedyn varastointia ja ajoneuvojen tankkausta sekä polttokennotekniikkaa henkilöautoissa ja esitelty eri valmistajien sovellutuksia aiheesta. Pohdinnassa on vertailtu laajasti vedyn hyötyjä ja haittoja muihin voimälähteisiin sekä käsitelty sen mahdollisuuksia tulevaisuudessa. Opinnäytetyössä on lisäksi käsitelty siinä käytettyjä lähdemateriaaleja sekä arvioitu niiden luotettavuutta.

2 VETYPOLTTOKENNOTEKNIIKAN HISTORIAA

Muutama vuosikymmen vedyn löytymisen jälkeen vuonna 1800 englantilaiset ystävät, kemisti William Nicholson ja kirurgi Anthony Carlisle, keksivät elektrolyysin (kuvio 1). He demonstroivat, kuinka sähkö avulla vesi voidaan erotella vedyksi ja hapeksi. (Fuelcellstore 2017.) Vuonna 1801 kemisti Humphrey Davy sai luotua periaatteen, jonka avulla kaasuvoltin akku toimisi, nykyiseltä nimeltään polttokenno (Fuelcelltoday n.d).



KUVIO 1. Polttokennotekniikan kehitysaskleet (Fuelcellstore 2017)

Vuonna 1839 brittiläinen fyysikko William Grove esitteli ensimmäisen tiedossa olevan polttokennon. Grove näki Nicholsonin ja Carlislen muistiinpanoja ja ajatteli, että hän voisi ”muodostaa vettä uudelleen” yhdistämällä elektrodeja sarjaan ja pian hän saikin tämän aikaan ”kaasuakusi” kutsutulla laitteella. Toimintaperiaate koostui platinaelektrodeilla hapessa ja vedyssä, joka on upotettu laimeaan rikkihappoelektrolyyttiliuokseen. Suljetuissa säiliöissä oli vettä ja kaasuja ja näitä tutkiessaan Grove havaitsi, että veden taso nousi molemmissa putkissa, kun niissä kulki virtaa. Laite sai lempinimekseen ”Grove-kenno”, joka tuotti noin 12 A virtaa jännitteen ollessa 1,8 V. (Fuelcellstore 2017.)

1880 – luvun loppupuolella kaksi brittiläistä kemistiä Carl Langer ja saksalaissyntyinen Ludwig Mond jatko kehittivät Groven polttokennoa. Polttokennon käyttöikä oli pidempi käyttämällä huokoista, sähköä johtamatonta ainetta elektrolyytin yllä-

pitämiseksi. Myöhemmin todettiin hiilipohjaisen polttokennon tarvitsevan vähemmän platinaa, jolloin saksalainen kemisti Wilhelm Ostwald ehdotti lämpömoottorigeneraattorien korvaamista sähkökemiallisilla kennoilla. Sähkökemiallisissa kennoissa hiili hapetettiin hiilidioksidiksi hapen avulla. 1900-luvun alussa Fritz Haber ja Walther H. Nernst Saksassa ja Edmond Bauer Ranskassa kokeilivat kennoja käyttäen kiinteää elektrolyyttiä. Heikko menestys ja suuret taloudelliset kustannukset tukahduttivat kiinnostuksen jatkaa kehitystyötä. (Britannica n.d.)

Cambridgen professori Francis Bacon muokkasi Mondin ja Langerin laitteita vuonna 1932 kehittääkseen ensimmäisen alkalipolttokennon, mutta Bacon esiteli käytännöllisen 5 kW:n polttokennojärjestelmän vasta vuonna 1959. Samoihin aikoihin amerikkalainen Harry Karl Ihrig asensi muunnellun 15 kW:n Bacon-kennon Allis-Chalmersin maataloustraktoriin. Allis-Chalmers kehitti myöhemmin yhteistyössä Yhdysvaltojen ilmavoimien kanssa lukuisia polttokennokäyttöisiä ajoneuvoja, kuten esimerkiksi golfkärryn, trukin ja vedenalaisen aluksen. (FuelCellToday n.d.)

Vuodesta 1932 aina pitkälle toisen maailmansodan jälkeen Bacon ja hänen työ-kaverinsa Cambridgen yliopistossa työskentelivät luodakseen käytännöllisiä vety-happipolttokennoja alkalisella elektrolyytillä. Työskentely tuotti tulosta ja he keksivät kaasudiffuusioelektrodit, joissa polttokaasu pidetään toisella puolella tehokkaasti kontrolloidussa kosketuksessa vesipitoisen elektrolyytin kanssa ollessa vastakkaisella puolella. Vuosisadan puolivälissä neuvostoliittolainen O.K Davtyan julkaisi kokeelliset tulokset kiinteistä elektrolyyteistä korkean lämpötilan polttokennoihin sekä korkean- ja matalalämpötilan alkaliin elektrolyyttivety-happikennoihin. (Britannica n.d.)

1950- ja 1960-luvuilla tarve erittäin vakaille ja tehokkaille virtalähteille avaruussatelliittejä ja miehitettyjä avaruusaluksia varten oli suuri, joten polttokennojen kehittäminen loi uusia jännittäviä mahdollisuuksia fyysikoille (Britannica n.d). Nasa alkoikin kehittämään yhteistyössä teollisten kumppaneiden kanssa polttokennogeneeraattoreita miehitettyihin avaruustehtäviin. Tuloksena he saivat kehitettyä ensimmäisen protonivaihtopolttokennon (PEMFC), josta kunnian otti itselleen Willard Thomas Grubb General Electricistä (FuelCellToday n.d.) Kolme vuotta

myöhemmin General Electricin kemisti Leonard Niedrach kehitti protonivaihtopolttokehoa, jonka seurauksena platinaa voitiin kerrostaa kalvolle sen toimiessa katalyyttinä tarvittaville vedyn hapettumis- ja pelkistysreaktioille. Tämä sai nimekseen "Grubb-Niedrach polttokeho". NASA ja McDonnell Aircraft jatkoi teknologian kehittämistä General Electricin kanssa, jonka seurauksena polttokehoja alettiin käyttää Gemini-avaruusohjelmassa. 1960-luvulla Pratt & Whitney lisensoi Baconin Yhdysvaltain patentit käytettäväksi avaruusohjelmissa, joiden avulla miehistön oli mahdollista saada sähköä lisäksi myös juomavettä. (Fuel Cells. n.d.)

Ensimmäinen polttokehoilla toimiva ajoneuvo keksittiin vuonna 1966 GM Motorin toimesta (kuva 1). GM nimisi ajoneuvonsa Electrovaniksi. Electrovanin aikaansa nähden huomattavan tehoviheen polttokeho tuotti 32 kW jatkuvan tehon ja sen huipputeho oli huipussaan jopa 160 kW. (Frankmarkus 2016.)



KUVA 1. GM Electrovan (Hydrogen cars now n.d)

Polttokenno koostui 32:sta ohutelektrodimoduulista, jotka oli kytketty sarjaan. Moottori ja voimansiirto sekä niihin vaadittava ohjaus asennettiin etupenkien alle ja väliin. Lattian alle oli piilotettu 32 polttokennomoduulia, jotka yhdistyivät toisiinsa muoviputkilla. Keskimmäisten penkkien taakse oli asennettu kryogeeniset vety- ja happisäiliöt sekä elektrolyyttisäiliö. Säiliöt sisälsivät 170 litraa kaliumhydroksidia, joka täytti moduulit, putket ja säiliön. Elektrolyytti itsessään painoi jo 248 kg ja koko auto 3195 kg. Suuresta massasta huolimatta ajoneuvon huippunopeus oli 112 km / h ja se kiihtyi 0–100 km / h 30 sekunnissa. Ajoneuvolla pystyi ajamaan yhdellä tankillisella 240 kilometriä. Electrovanilla ajettiin vain GM:n omistamien kiinteistöjen teillä. Hieman sen jälkeen, kun ajoneuvo oli rakennettu, testattu ja julkistettu lehdistölle projekti romutettiin kustannussyistä. Vedyn heikko infrastruktuuri ja platinan suuri hinta olivat pääsyinä kehityksen lakkauttamiselle. (Frankmarkus 2016.)

Vuonna 1973 arabien ja israelilaisten välisen sodan aikana öljynviejämaiden järjestön arabijäsenet (OPEC) määräisivät kauppasaarron Yhdysvaltoja vastaan kostoksi siitä, että Yhdysvallat päätti varustaa Israelin armeijaa saadakseen päättävävaltaa sodanjälkeisiin rauhaneuvotteluihin. OPEC-järjestö laajensi kauppasaartoa myös muihin maihin, jotka tukivat Israelin armeijaa. Israelin armeijaa tukevia maita olivat Hollanti, Portugali ja Etelä-Afrikka. Kauppasaarto kielsi öljyn viennin kohdemaihin sekä rajoitti heidän öljyntuotantoansa. Kauppasaarto rasitti voimakkaasti Yhdysvaltojen taloutta, joka oli kasvanut yhä riippuvaisemmaksi ulkomaisesta öljystä. Presidentti Richard M. Nixon ja hänen hallituksensa yrittivät lopettaa kauppasaarron, jolla alkoi olla jo maailmanlaajuinen vaikutus öljyn hinnan nousukierteen vuoksi. Ensiksi öljyn hinta tynnyriltä kaksinkertaistui ja sitten nelinkertaistui aiheuttaen suuria kustannuksia kuluttajille. (Office of the historian n.d.)

Vuoden 1973 öljysaarron jälkeisinä vuosina useat tutkimuslaitokset, autoyhtiöt, yksityishenkilöt ja jopa hallitus alkoivat miettiä ratkaisua öljypulan kasvavaan todennäköisyyteen. Samaiseen keskusteluun otettiin myös mukaan polttomoottori-ajoneuvojen saasteet. Hallitukset alkoivat asettaa autoteollisuudelle yhä tiukempia päästörajoitusmääräyksiä, jotka vaativat autoteollisuutta miettimään uudenlaisia ratkaisuja. 1970- ja 1980-luvuilla useat autoalan yritykset alkoivat muutta-

maan moottoreitaan toimimaan vedyllä. Nasa oli saanut autoalan yritykset vakuutettua vedyn turvallisuudesta antamalla virallisen lausunnon aiheesta. Jotain yrityksiä käyttää vetyä vaihtoehtoisena liikenteen energianlähteenä ilmaantui myös tavallisten ihmisten, insinöörien- ja tiedemiesten toimesta. Kokeilut olivat aluksi lähinnä marginaalisia, eikä ajateltu mahdollisuutta, että vedystä voisi tulla pian välttämätön energianlähde teollisuuden kasvaessa vedyn ympärillä. Yritykset sekä yksityishenkilöt, eritoten Japanissa aloittivat käytännönkokeilut ja he alkoivat tuottaa vetykaasua eri menetelmin. Japanin energiansaanti oli 80 %:sesti riippuvainen maan ulkopuolisesta energiasta, jonka seurauksena se oli yksi pioneerimaista tutkien vakavasti vaihtoehtoisia polttoaineita. Muutamit yritykset yrittivät tosissaan saada vetyä toimimaan, mutta useimmat kallistuivat jälleen fossiilisiin polttoaineisiin öljyn kohdistuneen kauppasaarron kumoutuessa. (Wand 2017.)

Öljykriisin loputtua vety unohdettiin hetkeksi, kunnes taas 1990-luvulla autonvalmistajat kiinnostuivat vetypolttokennoista. Saksassa, Japanissa ja Iso-Britanniassa alettiin rahoittaa polttokennoteknologian kehittämistä asuinrakentamiseen, joka auttoi myös autoteollisuutta jatkojalostamaan polttokennoja. Vuonna 1990 California Air Resources Board (CARB) otti käyttöönsä Zero Emission Vehicle (ZEV) – valtuutuksen. Tämä oli maailman ensimmäinen päästöstandardi, joka ei perustunut polttomoottorin parantamiseen sen keskittyessä nimenomaisesti vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön. Autonvalmistajat, kuten silloinen DaimlerChrysler, Toyota ja General Motors vastasivat tähän investoimalla polttokennotutkimuksiin. (Fuel cell works n.d.)

2000-luvulla alussa Euroopan unioni, Kanada, Japani, Etelä-Korea ja Yhdysvallat olivat kaikki mukana korkean profiilin demonstraatiohankkeissa, jotka koskivat liikenteenpäästöjä. Polttokennoteknologian tarjoamat hyödyt verrattuna perinteisiin teknologioihin ovat vaikuttaneet niiden käyttöönoton edistämässä. Kymmeniä polttokennobusseja otettiin käyttöön 2000-luvun alkupuolella osana HyFleet/CUTE- projektia Euroopassa, Kiinassa ja Australiassa. Busseja pidettiin ja pidetään yhä lupaavana polttokennotekniikan käyttökohteena, sillä niissä yhdistyy korkea hyötysuhde painoon nähden, paikallispäästöttömyys ja tankkauksen helppous, niiden liikennöinti reittien ollessa ennalta tiedossa. (Fuelcelltoday n.d.)

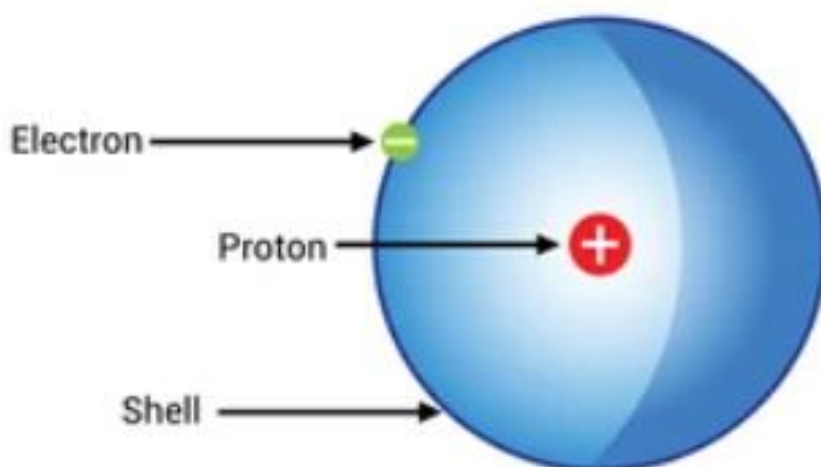
Polttokennojen kaupallinen aikakausi alkoi vuonna 2007, kun niitä alettiin myydä yksityishenkilöille. Ajoneuvoihin luvattiin samanlaiset huolto- ja takuukäytännöt kuin polttomoottoreilla toimiviin ajoneuvoihin (Fuelcelltoday n.d.) Vuonna 2008 Honda aloitti maailman ensimmäisenä ajoneuvovalmistajana toimittamaan yksityishenkilöille vetypolttokennoilla toimivia ajoneuvoja. Asiakkaat eivät kuitenkaan saaneet ajoneuvoja yksityisomistukseen vaan he saivat autot käyttöönsä leasing-sopimusten avulla. Ohjelma perustui kolmen vuoden vuokrasopimukseen, jonka hinta oli noin 600 dollaria kuukaudessa ja se oli suunnattu kuluttajille Etelä-Kaliforniaan. Vain valitut asiakkaat saivat oikeuden leasing-sopimuksille. Asiakkaiden sijainnin oli oltava lähellä vedyn tankkausasemia, jonka jälkeen asiakkaille lähetettiin lisäselvitys sähköpostitse. Kyselyssä asiakkailta tiedusteltiin ajoneuvojen käyttötarvetta ajotottumuksien, varastoinnin ja taloudellisten kriteerien perusteella. (Green car congress 2008.)

2010-luku oli litiumioniakun vuosikymmen. Maailmanlaajuinen tuotantokanta vuonna 2010 oli energiakapasiteetiltään 19 GWh ja hinnat yli 1000 dollaria kilowattitunnilta. Vuoteen 2019 mennessä energiakapasiteetti kasvoi 160 GWh:iin ja hinta laski 156:een dollariin kilowattitunnilta. Akku on tullut yhä käytännöllisemmäksi kaikenlaisissa liikenne-, kuljetus- ja energiasovelluksissa. Polttokennojen markkinat puolestaan olivat suhteellisen hitaita 2010-luvulla. Vuosikymmenen viimeisenä vuotena maailmanlaajuiset toimitukset ylittivät kuitenkin ensimmäistä kertaa akustojen 1 GW:n kokonaiskapasiteetista. Polttokennojen tuottama energiakapasiteetti olisi ollut jo silloin suurempi, ellei Kiinassa olisi ollut useita myöhästyneitä polttokennojen tilauksia. Lukema ei ole suuri verrattuna litiumioniakujen tuottamaan kokonaisenergia määrään, mutta se on kuitenkin merkittävä polttokennojen kehityksen kannalta. 2020-luku voisi olla vedyn ja polttokennon vuosikymmen, koska ilmastonmuutoksen aiheuttama ilmaston lämpeneminen ja ilmanlaadun heikkeneminen etenee. (Innovation newsnetwork 2020.)

3 VETY

3.1 Vety alkuaineena

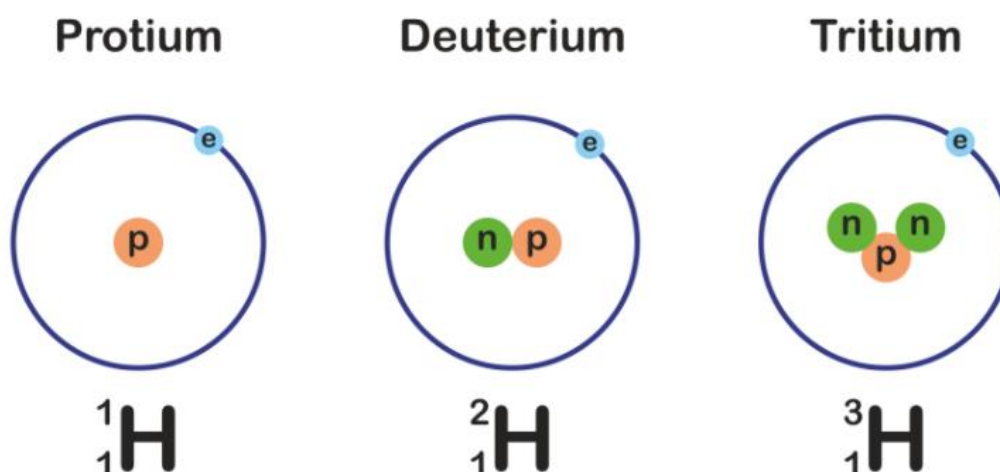
Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen alkuaine ja sen kemiallinen tunnus on H. Vety on epämetalli, vaikka jaksollisessa järjestelmässä se kuuluu ensimmäiseen sarakkeeseen alkalimetallien kanssa. Se on rakenteeltaan yksinkertaisin atomi, jonka ytimessä on positiivisesti varautunut protoni, jota kiertää negatiivisesti varautunut elektroni (kuva 2). Se on ainut alkuaine, jonka atomirakenteessa ei ole neutronia (Kirchoff 2016). (William 2022.)



KUVA 2. Vetyatomien rakenne (Shutterstock n.d.)

Vetymolekyyli H_2 on yksinkertaisin molekyyliyhdiste, jossa kaksi vetyatomia on sitoutunut yhteen muodostaen kovalenttisen sidoksen. Tämän kovalenttisen sidoksen avulla vetymolekyylit muodostavat vetykaasun. (William 2022.) Vetymolekyylissä molempien atomien elektronit ovat vuorovaikutuksessa kummankin positiivisesti varautuneiden vetyatomien ydinten kanssa, jolloin elektroneiden painopiste keskittyy atomien välille (Chemistry Channel 2018). Vetymolekyylien muodostuminen on eksotermiini eli lämpöä vapauttava reaktio, jossa vapautuu energiaa ympäristöön 432 kJ/mol^{-1} . Toisaalta vetymolekyylin sidoslujuus on myös vastaava 432 kJ/mol^{-1} , jolloin kahden atomin erottaminen toisistaan vaatii vastaavan määrän energiaa. (Nagwa 2022.)

Vedyn isotoopit ovat protium, deuterium sekä tritium (kuva 3). Protium on vetyatomin yksinkertaisin muoto, jossa protoni ja sitä kiertävä elektroni ovat kaikesta vallitsevin isotooppi 98,98 % osuudellaan. Protiumia esiintyy harvoin yksiatomisessa muodossa, mutta ne muodostavat kaksi atomisia molekyyliisidoksia keskenään tai muiden alkuaineiden kanssa. Deuterium koostuu protonista, neutronista ja elektronista, kun taas tritiumissa on deuteriumiin verrattuna protoni ja elektroni, mutta kaksi neutronia yhden sijaan. Deuterium on raskaampaa verrattuna protiumiin, jolloin se reagoi myös hitaammin soveltuen täten käytettäväksi kemiallisissa ja biokemiallisissa tutkimuksissa kevyttä vetyä paremmin (Augustyn n.d). Tritium on luonnollisissa olosuhteissa erittäin harvinainen, radioaktiivinen yhdiste, jota muodostuu vähäisinä määrinä ilmakehässä avaruudesta tulevan kosmisen säteilyn vuorovaikutuksessa ilmakehän typpiatomien kanssa. Tritiumin puoliintumisaika on 12,32 vuotta. (William 2022.)



KUVA 3. Vedyn eri isotoopit (Embibe 2021)

3.2 Vedyn olomuodot ja ominaisuudet

Vedyn sulamispiste on $-259,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kiehumispiste on $-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$, joten $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen lämpötilassa sekä normaalissa ilmanpaineessa merenpinnan yläpuolella ($1,013\text{ bar}$) puhdas vety on olomuodoltaan kaasu (Thermopedia 2011). Vety molekyyleinä eli kaasuna se on hajuton, väritön ja mauton sekä herkästi syttyvä aine. Vedyn palaessa eli yhtyessä hapen kanssa syntyy räjähdyskaasu, jonka

reaktiotuotteena muodostuu vettä ja vapautuu lämpöenergiaa. Vedyn energiatiheys on lähelle 120 MJ/kg, joka on sähkötermeiksi muutettuna noin 33,6 kWh (Molloy 2019). (William n.d.)

Alkuaineet voidaan luokitella ei-reaktiivisiin, reaktiivisiin sekä erittäin reaktiivisiin alkuaineisiin. Alkuaineiden reaktiivisuuteen vaikuttaa niiden kokonaisvaraus, uloimman elektronikuoren eli valenssikuoren elektronien lukumäärä sekä elektronien etäisyys atomin ytimeistä. Reaktiivisuutta voidaan tarkastella aineiden ionisaatioenergian, elektroniaffiniteetin sekä elektronegatiivisuuden kautta. Aineen ionisaatioenergia ilmaisee aineen kykyä vastustaa elektronin poistumista atomin tai ionin elektronikuorelta (kuva 4) (Professor Dave Explains 2015). Alkuaineiden ionisaatioenergia selittääkin usein aineen reaktiivisia ominaisuuksia muiden aineiden ja yhdisteiden kanssa (Helmenstine 2019). (Stile education 2020.)

1										18											
1	H 1312.0																			He 2372.3	
2	Li 520.2	Be 899.5																			
3	Na 495.8	Mg 737.7																			
4	K 418.8	Ca 589.8	Sc 633.1	Ti 658.8	V 650.9	Cr 652.9	Mn 717.3	Fe 762.5	Co 760.4	Ni 737.1	Cu 745.5	Zn 906.4	Ga 578.8	Ge 762.2	As 944.5	Se 941.0	Br 1139.9	Kr 1350.8			
5	Rb 403.0	Sr 549.5	Y 599.9	Zr 640.1	Nb 652.1	Mo 684.3	Tc 702	Ru 710.2	Rh 719.7	Pd 804.4	Ag 731.0	Cd 867.8	In 558.3	Sn 708.6	Sb 830.6	Te 869.3	I 1008.4	Xe 1170.3			
6	Cs 375.7	Ba 502.9	La 538.1	Hf 658.5	Ta 728.4	W 758.8	Re 755.8	Os 814.2	Ir 865.2	Pt 864.4	Au 890.1	Hg 1007.1	Tl 589.4	Pb 715.6	Bi 703.0	Po 812.1	At	Rn 1037.1			
7	Fr 393.0	Ra 509.3	Ac 498.8	Rf 580	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup						

KUVA 4. Eri alkuaineiden ionisaatioenergiat taulukoituna (Chemistry Libretexts™ n.d.)

Vety on reaktiivinen aine ja sen ionisaatioenergia on 1312 kJ/mol, jolloin luovuttaessaan elektronin, siihen tarvitaan vastaava määrä energiaa. Koska vedyn elektronikuorella on vain yksi elektroni, luovuttaessaan sen, siitä tulee vetyioni eli protoni H^+ . Tällöin vetyioni on positiivisesti varautunut kationi. (Chemistry Libretexts™ 2020.)

Päinvastoin kuin aineen ionisaatioenergia, elektroniaffiniteetti kuvastaa alkuaineen atomille tai molekyylille ominaista energiamäärää, joka vapautuu aineen

vastaan ottaessa elektronin (kuva 5) (Britannica n.d). Elektroniaffiniteetti on ionisaatioenergian sekä elektronegatiivisuusarvon ohessa tärkeimpiä mittareita tarkastellessa aineen reaktiivisuutta ja affiniteetti arvot määritellään alkuaineiden ollessa kaasumaisessa olomuodossa. (Nuclear Power 2022.)

1A								8A
1 H -73							2 He >0	
3 Li -60	4 Be >0	5 B -27	6 C -122	7 N >0	8 O -141	9 F -328	10 Ne >0	
11 Na -53	12 Mg >0	13 Al -43	14 Si -134	15 P -72	16 S -200	17 Cl -349	18 Ar >0	
19 K -48	20 Ca -4	31 Ga -30	32 Ge -119	33 As -78	34 Se -195	35 Br -325	36 Kr >0	
37 Rb -47	38 Sr -11	49 In -30	50 Sn -107	51 Sb -103	52 Te -190	53 I -295	54 Xe >0	

KUVA 5. Alkuaineiden elektroniaffiniteetti arvoja taulukoituna. Kuvassa negatiiviset arvot kuvastavat energian vapautumista. (Chemistry Libretexts™ n.d.)

Vedyn vastaanottaessa elektronin, siitä tulee negatiivisesti varautunut ioni eli anioni. Tämä kemiallinen prosessi vapauttaa energiaa 72,8 kJ/mol (Nuclear Power 2021). Mitä negatiivisempi elektroniaffiniteetti aineella on, sitä helpommin elektroni pyrkii liittymään atomiin. (Chemistry Libretexts™ n.d.)

Elektronegatiivisuus kuvastaa aineen kykyä vetää elektroneja puoleensa muodostaessa yhteisiä sidoksia toisten alkuaineiden kanssa. Mitä suurempi elektronegatiivisuus luku aineella on, sitä voimakkaammin molekyyli-sidoksissa olevat elektronit pyrkivät hakeutumaan kyseisen alkuaineen atomin vaikutukseen (kuva 6). Elektronegatiivisuus tasapainottelee atomien ionisaatioenergian ja elektroniaffiniteetin erojen välillä. Yleisesti aineiden ionisaatioenergia ja elektronegatiivisuus arvot korreloivat keskenään eli aineet, jotka omaavat korkean ionisaatioenergian, omaavat myös korkean elektronegatiivisuus arvon ja sama toisinpäin (Helmenstine 2020). (Ouelette & Rawn 2015.)

Pauling Electronegativity Values																
1 H 2.20																
3 Li 0.98	4 Be 1.57											5 B 2.04	6 C 2.55	7 N 3.04	8 O 3.44	9 F 3.98
11 Na 0.93	12 Mg 1.31											13 Al 1.61	14 Si 1.90	15 P 2.19	16 S 2.58	17 Cl 3.16
19 K 0.82	20 Ca 1.00	21 Sc 1.36	22 Ti 1.54	23 V 1.63	24 Cr 1.66	25 Mn 1.55	26 Fe 1.83	27 Co 1.88	28 Ni 1.91	29 Cu 1.90	30 Zn 1.65	31 Ga 1.81	32 Ge 2.01	33 As 2.18	34 Se 2.55	35 Br 2.96
37 Rb 0.82	38 Sr 0.95	39 Y 1.22	40 Zr 1.33	41 Nb 1.6	42 Mo 2.16	43 Tc 1.9	44 Ru 2.2	45 Rh 2.28	46 Pd 2.20	47 Ag 1.93	48 Cd 1.69	49 In 1.78	50 Sn 1.96	51 Sb 2.05	52 Te 2.1	53 I 2.66
55 Cs 0.79	56 Ba 0.89	57 La 1.1	72 Hf 1.3	73 Ta 1.5	74 W 2.36	75 Re 1.9	76 Os 2.2	77 Ir 2.20	78 Pt 2.28	79 Au 2.54	80 Hg 2.00	81 Tl 1.62	82 Pb 2.33	83 Bi 2.02	84 Po 2.0	85 At 2.2
87 Fr 0.7	88 Ra 0.9															

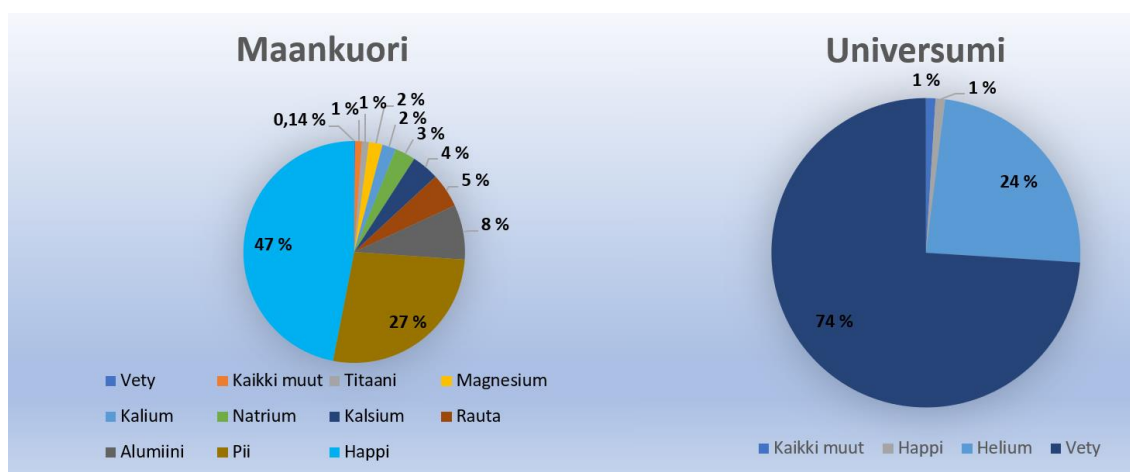
KUVA 6. Alkuaineiden elektronegatiivisuusarvot taulukoituna (Awesome Inc n.d.)

Vedyn elektronegatiivisuusarvo eli kyky vastaanottaa elektroneja muilta alkuaineilta on 2,2. Vetyatomit usein luovuttavat elektronin yhteiseen käyttöön muiden elektronegatiivisempien alkuaineiden kanssa muodostaen sidoksia ja yhdisteitä. (ThoughtCo n.d.)

Atomivety on erittäin reaktiivista, koska se voi muodostaa yhdisteitä eli hydridejä useiden eri aineiden kanssa. Vedyn ollessa molekyylinä huoneenlämmössä se reagoi monen aineen kanssa, mutta johtuen vetymolekyylien sidoslujudesta reaktionopeudet ovat suhteellisen hitaita. Tällöin kemialliset reaktiot ovat miltei huomaamattomia, mutta jos lämpötila ja sen myötä paine nousevat, reaktiot voivat olla todella nopeita. Kipinät tai tietynlainen säteily voivat aiheuttaa vedyn ja kloridin räjähdysreaktion tuottaen vetykloridia. Vety ja happi reagoivat merkittävästi vasta yli 300 °C lämpötilassa. Yhdistelmä, jossa on 4–94 % vetyä, syttyy palamaan 550–600 °C lämpötilassa tai jos kemialliseen reaktioon tuodaan katalyytti eli reaktiota nopeuttava aine, kipinä tai liekki. Seossuhde, jossa vetyä on 2:1 happeen on erittäin räjähdysherkkä. (William 2022.)

3.3 Ilmaantuvuus

Vety on universumin yleisin alkuaine (kuvio 2) ja se on kymmenenneksi yleisin alkuaine maankuoressa 0,14 % osuudellaan massaprosentteina (William 2022). On arvioitu, että yli 90 % kaikista universumin atomeista on vetyatomeja ja noin kolmeneljäsosaa universumin massasta muodostuisi vedystä (Thermopedia 2011). Maapallolla sitä esiintyy molekyyliyhdisteisenä kaasuna erittäin vähän, koska maapallon painovoimakenttä ei ole tarpeeksi voimakas estääkseen vety-molekyylien haihtumista avaruuteen (Seeker 2015).



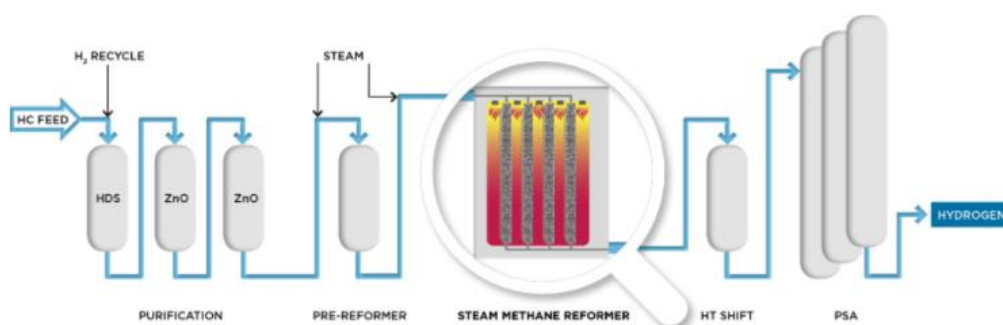
KUVIO 2. Vedyin osuus maankuoressa ja universumissa massaprosentteina

Vetyyhdisteet ovat voimakkaita dipoli-dipolisydoksia, jotka muodostavat kovalenttisia sidoksia elektronegatiivisten aineiden, kuten hapen, typen ja fluorin kanssa (Chem purdue n.d). Maapallolla vety onkin sitoutuneena pääasiassa eri yhdisteisiin kuten veteen, jäähän, happoihin sekä melkein kaikkiin orgaanisiin yhdisteisiin, kuten hiilivetyihin. Vedyin erottaminen vaatii paljon energiaa ja hyödyntäminen energianlähteenä on toistaiseksi vielä kallista. (ScienceDirect 2022.)

4 VEDYN TUOTANTO JA HYÖDYNTÄMINEN

4.1 Höyryreformointi

Höyryreformointi on yleisin tapa tuottaa vetyä, esimerkiksi Yhdysvalloissa 95 % tuotetusta vedystä on valmistettu höyryreformoinnilla. Myöskin Euroopassa noin kymmenenmiljoonaa tonnia vetyä tuotetaan höyryreformoinnin avulla (Eberhard 2021). Höyryreformoinnilla vetyä tuotetaan jo valmiista polttoaineista, kuten esimerkiksi maakaasusta, bensiinistä, etanolista ja propaanista. Höyryreformoinnissa käytetään yleisimmin maakaasua eli metaania. Vetyä voidaan valmistaa metaanista kemiallista prosessia käyttäen, jossa metaanin sekaan laitetaan vettä. Tuotantoprosessissa käytetään vesihöyryä 700–1000 °C lämpötilassa, jolloin höyryreformoinnissa metaani reagoi vesihöyryn kanssa 3–25 baarin paineessa hajoten vedyksi ja hiilimonoksidiksi, sekä pieneksi määräksi hiilidioksidia (kuva 7). Prosessin aikana lämpöä täytyy ylläpitää, jotta reaktio pysyy aktiivisena. Prosessissa syntynyttä hiilimonoksidia jatkojalostetaan vesihöyryn avulla. Vesihöyry reagoi hiilimonoksidiin katalyytin avulla, jolloin prosessissa erottuu vetyä ja hiilidioksidia. Katalyyttinä käytetään platinaryhmän metalleja, joista yleisimmin käytössä on nikkeli (Johnson 2022). Jalostuksen viimeisessä vaiheessa kaasuvirrasta poistetaan hiilidioksidi ja muut epäpuhtaudet, jolloin jäljelle jää vain puhdasta vetykaasua. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)



KUVA 7. Höyryreformointi (Clariant 2022)

Metaanista voidaan valmistaa vetyä myös osittaishapetuksella. Osittaishapetuksessa metaani ja muut maakaasun hiilivedyt reagoivat hapen kanssa, jonka määrää rajoitetaan. Rajoitettu hapen määrä estää hiilivetyjä muodostumaan kokonaan hiilidioksidiksi ja vedeksi. Hapen määrän ollessa rajoitettu reaktiossa ei saavuteta stoikiometristä seosta, jonka seurauksena reaktiotuotteet sisältävät pääasiassa vetyä ja hiilimonoksidia sekä pienen määrän hiilidioksidia ja muita yhdisteitä. Syntynyt hiilimonoksidi reagoi veden kanssa muodostaen lisää vetykaasua ja hiilidioksidia. Osittaishapetus on nopeampi prosessi kuin höyryreformointi, mutta prosessissa saadaan valmistettua vähemmän vetyä suhteessa annosteltuun polttoainemäärään verrattuna höyryreformointiin. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

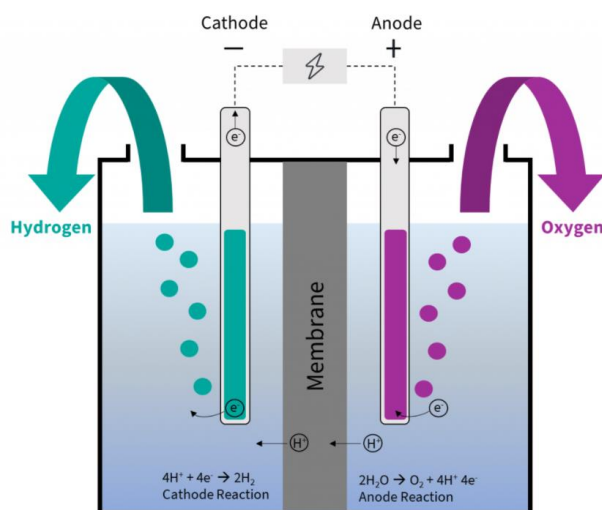
Höyryreformoinnin etuna on sen alhaiset kustannukset. Verrattuna elektrolyysiin höyryreformoinnilla valmistettu vety maksaa noin 2 €/kg, kun elektrolyysillä sen tuottaminen kustantaisi yli kolminkertaisen hinnan. Höyryreformoinnin haittapuolena on sivutuotteena syntyvä hiilimonoksidi, joka on kasvihuonekaasu. Hiilimonoksidista jatkojalostettu vety jättää jälkeensä vielä sivutuotteena hiilidioksidia. Höyryreformoinnin hyötysuhde on 60–70 %. (SFC energy 2022.)

4.2 Elektrolyysi

Elektrolyysi on sähkökemiallinen prosessi, jossa sähkövirtaa johdetaan aineen lävitse kemiallisen muutoksen aikaansaamiseksi. Muutoksessa aine, joko luovuttaa tai vastaanottaa elektronin. Prosessia kutsutaan myös aineen hapetus- ja pelkistys reaktioksi. Maailmanlaajuisesti noin 5 % vetykaasusta on tuotettu elektrolyysin avulla. Tuottaessa vetyä elektrolyysin avulla, sähköön energiahäviö on noin 30 % (Real Engineering 2019). (Britannica n.d.)

Vetypolttokennotekniikassa elektrolyysissä käytetään sähköä erottelemaan vedestä vety- ja happiatomit (kuva 8). Tämä reaktio saadaan aikaan elektrolysaattori kennossa, joita on olemassa käyttökohteesta riippuen eri tehoisia ja kokoisia. Pienemmät elektrolysaattorit soveltuvat pienimutoiseen vedyn tuotantoon esimerkiksi vetypolttokennoilla varustetuissa ajoneuvoissa, kun taas suuremmilla

kennoilla voidaan valjastaa tuotantolaitokset, jotka tuottavat sähköä sähköverkkoihin. Elektrolysaattorit tuottavat yhden kilogramman vetykaasua 50–83 kWh:lla sähköenergiaa. (Tilanterä 2016.) Elektrolysaattorit voivat olla erilaisia teknisesti tai niissä käytettävien materiaalien osalta ja niiden toimintaperiaatteet voivat myös vaihdella. Pääosin eroavaisuudet tulevat elektrolyyttimateriaaleista ja niiden johtamista ionilajeista. Elektrolysaattorit toimivat anodin ja katodin avulla, jotka ovat eritelty toisistaan elektrolyytillä. Polttokennoissa käytetään useimmiten polymeerielektrolyyttielektrolysaattoreita (PEM), joissa elektrolyytti on kiinteää erikoismuovia. Vesi reagoi anodipuolella muodostaen positiivisesti varautuneita vetyioneja ja happea. Muodostuneet vetyionit liikkuvat PEM:in lävitse katodipuolelle samalla kun anodipuolelle jääneet elektronit kulkeutuvat sähköpiiriin. Katodipuolella vetyionit kulkeutuvat elektronien kanssa sähköpiiriin muodostaen vetykaasua. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)



KUVA 8. Elektrolyysi (PtXHub 2022)

Vaihtoehtoisesti on olemassa myös alkalinen elektrolysaattori ja kiinteäoksidielektrolysaattori. Alkalielektrolysaattorin toimintaperiaate perustuu hydroksidi-ionien siirtämisellä anodipuolelle, jolloin katodipuolella syntyy vetyä. Alkalisissa elektrolysaattoreissa käytetään natrium- tai kaliumhydroksiliuosta. Laboratoriossa on alettu tutkimaan kiinteiden alkalivaihtokennojen toimivuutta käytännössä. Kokeilut ovat olleet lupaavia laboratoriomittakaavassa. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

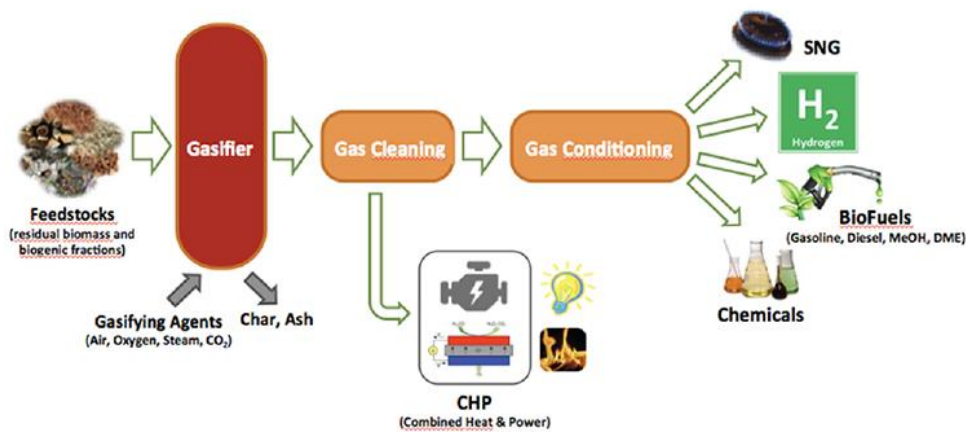
Kiinteäoksidielektrolysaattorit tarvitsevat korkeita lämpötiloja toimiakseen (700–800 °C). Laboratoriokokeissa käytetyissä keraameissa, jotka johtavat protoneja synnyttääkseen elektrolyysin on päästy käyttölämpötiloissa hieman alhaisempiin lukemiin lämpötilojen ollessa noin 500–600 °C. Kiinteäoksidielektrolysaattorit käyttävät hyödykseen korkeaa lämpötilaa, joka vähentää vedyn tuottamiseen tarvittavan sähköenergian määrää. Kiinteäoksidielektrolysaattoreissa elektrolyytinä käytetään kiinteää keraamista materiaalia. Keraami johtaa selektiivisesti negatiivisesti varautuneita happi-ioneja korkeissa lämpötiloissa synnyttäen vetyä. Kato-dipuolella höyry kulkeutuu sähköpiiriin elektronien kanssa muodostaen vetykaasua ja negatiivisesti varautuneita happi-ioneja. Keraamin lävitse kulkeutuvat happi-ionit reagoivat anodipuolella muodostaen happikaasua ja elektroneja. Elektronit kulkeutuvat anodipuolelta sähköpiiriin. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

Elektrolyysin hyviä puolia on sen ekologisuus ja puhtaus. Elektrolyysissä ei synny päästöjä, jos siinä käytetty sähkö on tuotettu päästöttömästi hyödyntäen uusiutuvia energianlähteitä. Elektrolyysi on johtavassa asemassa Yhdysvaltain energiaministeriön suorittamassa Earthshots-hankkeessa, jonka tavoitteena on pudottaa puhtaan vedyn kustannuksia jopa 80 %. Puhtaan vedyn hinnaksi tähdätään 1 \$ / kg seuraavan vuosikymmenen aikana. Vetyä voidaan tuottaa vihreästi elektrolyysin avulla päästöttömästi käyttäen joko tuuli-, aurinko-, vesi- tai geotermistä energiaa. Tuotantokustannukset ovat tällä hetkellä kuitenkin niin suuret, että ne eivät ole vielä taloudellisesti kilpailukykyinen vaihtoehto verrattuna esimerkiksi maakaasun reformoinnin kanssa. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

4.3 Biomassan kaasuunutus

Biomassan kaasuunutus on teollisuudessa pitkään käytössä ollut prosessi, jossa kuumuuden, vesihöyryn ja hapen avulla biomassasta erotellaan vetyä ja muita aineita (kuva 9). Biomassaksi luokitellaan eloperäiset eli hiiltä sisältävät orgaaniset yhdisteet, kuten esimerkiksi maatalouden viljelyskasvien jäännökset, metsätalouden jäännösmateriaalit, energiaksi tarkoitetut viljelmät tai vaikka ihmisten biojätteet sekä eläinten jäänteet ja jätökset. (U.S. Department of Energy n.d.)

Biomassan kaasuunnutuksessa hiilipitoisia orgaanisia tai fossiilisia aineita erotellaan korkeiden, yli 700 °C lämpötilojen avulla hiilimonoksidiksi, hiilidioksidiksi sekä vedyksi. Erottelussa hapen ja vesihöyryn määrää säädelään ohjatusti prosessin aikana, joten lisäämällä muodostuneeseen hiilimonoksidiin vesihöyryä tietyllä lämmöllä, muodostuu hiilidioksidia sekä vetyä kaasujen reagoitessa kemiallisesti. Vaihtoehtoisesti kaasuunnutus voidaan suorittaa pyrolyysin avulla, jolloin biomassaa kuumennetaan hapettomissa olosuhteissa ilman liekkiä. Syntynyt vetykaasu otetaan talteen tähän tarkoitettujen imeytys- ja absorbointi kalvojen avulla ja se voidaan varastoida tai käyttää suoraan tuotantolaitoksen polttokennoissa. (U.S. Department of Energy n.d.)



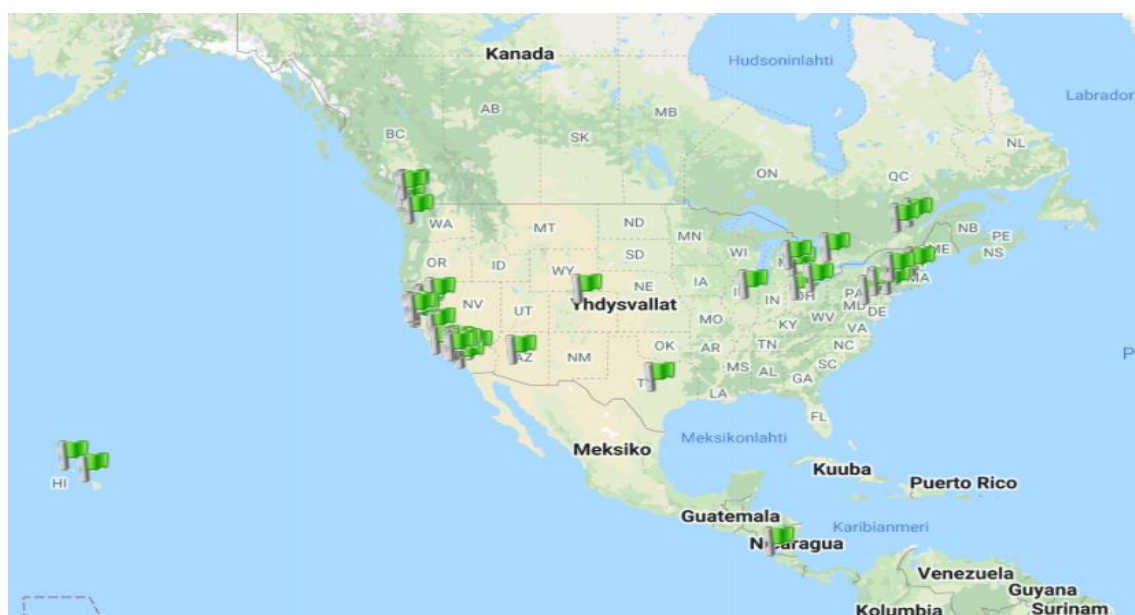
KUVA 9. Biomassan kaasuunnutus (Barisano 2020)

Biomassa itsessään sitoo hiilidioksidia ilmakehästä, joten biomassan kaasutuksella voidaan päästä kokonaispäästöjen kannalta hyvin alhaisiin lukemiin. Biomassa on uusiutuvaa energiaa ja esimerkiksi tehomatalouden seurauksena eläinten rehujen ylijäämää voidaan hyödyntää prosessissa tehokkaasti. Myös metsätalouden hoitaminen ja biojätteiden kierrättäminen voidaan käyttää tehokkaasti hyödyksi. Prosessista varastoitu vetykaasu on energiaa, jonka käyttö ajankohtaa voidaan säädellä vapaasti. (U.S. Department of Energy n.d.) Vetyteknologian ollessa murroksessa, myös biokaasuunnutusta pyritään kehittämään kasvavan vetykaasun kysynnän edessä. Esimerkiksi bio- ja mikrobiologisilla aktivaattoreilla sekä bakteereilla prosessia voitaisiin nopeuttaa ja vedyn tuotantoa tehostaa entisestään. Tällöin myös tuotannon kustannuksia voitaisiin karsia ja prosessiin vaadittavien raaka-aineiden määrää vähentää (FCHEA n.d.)

5 VEDYN JAKELUVERKOSTO

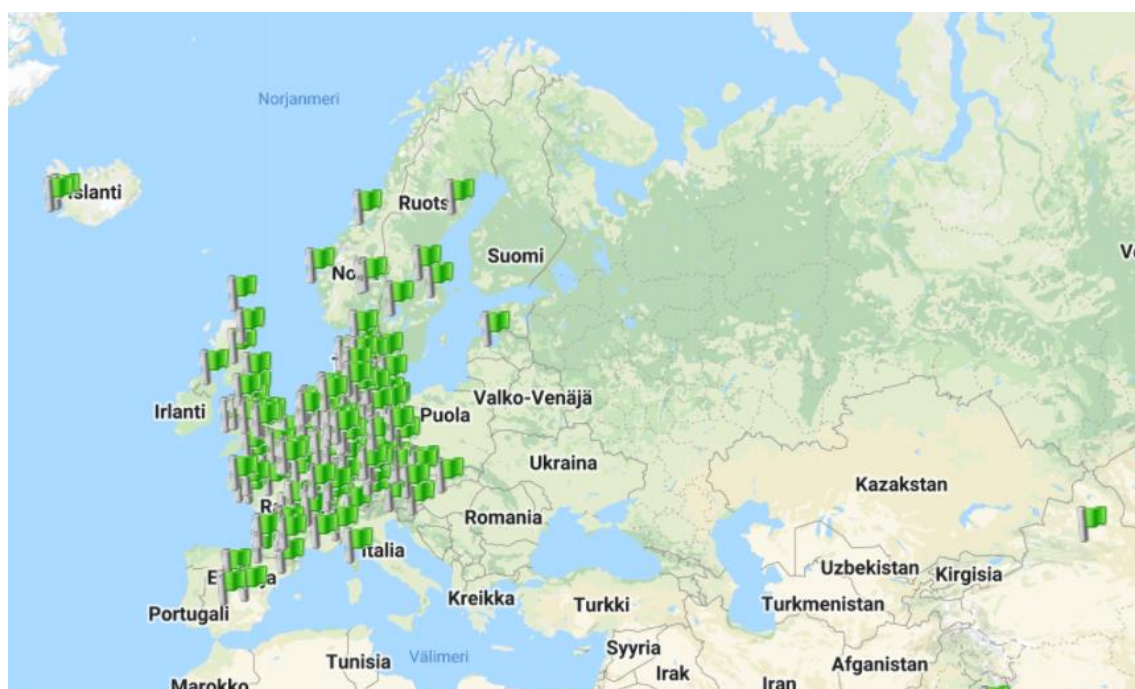
5.1 Infrastrukturi

Suurimpana haasteena vetypolttokennolla toimivien henkilöautojen lisääntymiselle on puutteellinen vetykaasun jakeluverkosto. Toistaiseksi vedyn tankkaus-pisteitä on tarjolla kuluttajille vain harvoissa maissa ja vetykaasun hinta on suhteellisen korkea. Maissa, joissa tankkausasemia on jo olemassa, ovat ne maanteieteellisesti vielä kuitenkin harvassa aiheuttaen rajoituksia autokannan yleistymiselle. Pohjois-Amerikassa vedyn tankkausasemat ovat maanteieteellisesti katsottuna maan Itä- ja Länsirannikoiden kaupunkikeskittymissä sekä autoteollisuudesta tunnetuilla suurten järvien alueilla (kuva 10) (H₂Stations 2022). Yhdysvalloissa on huhtikuussa 2022 yhteensä 107 julkista vedyn tankkausasemaa sekä joitain yksityisiä tankkauspisteitä. Vedyn jakeluverkoston painopiste sijaitsee Kalifornian osavaltiossa, jossa samaisena ajankohtana on valmiina yhteensä 52 vedyn tankkausasemaa ja suunnitteilla yli toistasataa asemaa infrastruktuurin parantamiseksi (California Fuel Cell Partnership 2022). Samaan aikaan Kanadassa on yhteensä seitsemän julkista vedyntankkausasemaa, joista neljä sijaitsee Vancouverissa maan Länsi-rannikolla. Tämän lisäksi maassa on joitain asemia myös yksityiskäytössä. (glpautogas 2022.)



KUVA 10. Toiminnassa olevat vedyn tankkausasemat Pohjois- ja Väli-Amerikassa (H₂ Stationsmap 2022)

Euroopassa vetyinfrastruktuuri on keskittynyt pääsääntöisesti väestörikkaisiin Länsi- ja Keski-Euroopan maihin (kuva 11). Euroopassa vedyn tankkausasemia on noin 200, joista hieman alle puolet on Saksassa. Maaliskuussa 2022 yleisiä tankkausasemia on Saksassa 91-, Ranskassa 29- ja esimerkiksi Iso-Britanniassa sekä Pohjois-Irlannissa yhteensä 19 kappaletta. Espanjassa tankkausasemia on kuusi ja Italiassa kolme maan pohjoispuolella. (glpautogas 2022). Käytännöllisyyden kannalta Tanska oli vuonna 2016 ensimmäinen maa, jolla voitiin sanoa olevan koko maan kattava vedyn jakeluverkosto silloisella yhdeksällä asemallaan. Nykyisin Tanskassa on seitsemän vedyn tankkausasemaa, joihin varastoitu vety on tuotettu elektrolyysillä uusiutuvien energialähteiden avulla. (Kane 2016.) Muissa Pohjoismaista Islannissa on kolme tankkausasemaa sekä Norjassa ja Ruotsissa neljä asemaa. Suomessa oli Woikosken valmistama vedyn tankkausasema, joka myöhemmin purettiin. Vuodesta 2014 Suomessa on ollut valmius valmistaa vetyä täysin vihreästi elektrolyysin avulla, mutta tällä hetkellä maassa ei ole yhtään vedyn tankkausasemaa (Woikoski n.d). Baltian maista Latvian pääkaupungissa, Riikassa on ainut julkinen vedyn tankkauspiste. Venäjällä, jossa tukeudutaan energianlähteenä raakaöljyyn, ei ole ainutakkaan vedyn tankkausasemaa. (H₂ Stations 2022.)



KUVA 11. Toiminnassa olevat vedyn tankkausasemat Euroopassa (H₂ Stations-map 2022)

Aasiassa sekä koko maailmanlaajuisesti mitattuna Japani on vetyinfrastruktuurin edelläkävijä (kuva 12). Maaliskuussa 2020 Japanissa on yhteensä 166 julkista vedyn tankkausasemaa sekä useita yksityisiä asemia. Tarkoituksena on ollut jo pitkään olla johtava valtio vedyn kaupallistamisessa, joten Japanissa on panostettu suuresti vedyn kehitykseen tulevaisuuden energianlähteenä. Japanin korkeatasoinen vetyteknologian kehitys sai edistystä öljykriisin seurauksena 1970-luvulla, maan ollessa erittäin riippuvainen ulkomaisten tuontienergiasta (s.13). Saarivaltiossa on haluttu kehittää vaihtoehtoisia ratkaisuja ilmastoa säästävälle fossiilisille energianlähteille sekä vähentää maan riippumattomuutta tuontienergian saannista. Vihreä vety on nähty laaja-alaisena energiaratkaisuna osana tulevaisuutta, joten maa on valtiotasolla investoinut miljardeja jonnekin vetyinfrastruktuurin sekä vetyautoilun parantamiseen. (glpautogas 2022.)



KUVA 12. Toiminnassa olevat vedyn tankkausasemat Lähi-idässä, Aasiassa sekä Oseanissa (H₂ Stationsmap 2022)

Aasiassa seuraavaksi eniten vetyinfrastruktuuriin ovat panostaneet Etelä-Korea ja Kiina. Huhtikuussa 2022 Etelä-Koreassa oli yhteensä noin sata vedyn tankkausasemaa, mutta niistä vajaat neljäkymmentä olivat aktiivisesti toiminnassa.

(glpautogas 2022.) Kiinassa maanlaajuisesti toiminnassa olevia vedyn tankkausasemia on myös noin sata kappaletta, mutta eron maiden vetyinfrastruktuurien toimivuuteen aiheuttaa maantieteellisesti suuri pinta-alojen kokoero. Etelä-Korea yhdessä Itävallan sekä Tanskan kanssa olivat ensimmäiset maat, joilla voitiin sanoa olevan maan kattava vedynjakeluverkosto (Businesswire 2021). Muista Aasian valtioista esimerkiksi Intiassa on vain kaksi vedyn tankkausasemaa ja Taiwanissa sekä Malesiassa vain yhdet asemat. (H₂ Stations 2022.)

Oseanian alueella Australiassa on huhtikuussa 2022 yhteensä neljä vedyn tankkausasemaa, joista yksi asema Sydneyssä on toistaiseksi yksityiskäytössä (Roberts 2022). Esimerkiksi Uudessa-Seelannissa ei ole samaisena ajankohtana vielä yhtään toiminnassa olevaa tankkauspistettä. Öljyteollisuudesta tunnetussa Lähi-idässä on toiminnassa kaksi vedyn tankkauspistettä, joista toinen sijaitsee Yhdistyneissä arabiemiirikunnissa Dubain kaupungissa ja toinen Saudi-Arabiassa. (H₂ Stations 2022.)

Vedyn jakeluinfrastruktuurin ollessa vielä keskeneräinen, globaalia vetyverkostoa tullaan parantamaan ja kasvattamaan merkittävästi tulevan vuosikymmenen aikana. Infrastruktuurin kehitys tulee vielä lähitulevaisuudessa olemaan voimakkainta kehittyneissä valtioissa, joissa vetyasemia on jo ennestään eniten (kuva 13). (H₂ Stations 2022.)



KUVA 13. Lähivuosina suunnitteilla olevat vedyn tankkausasemat maailmalla (H₂ Stationsmap 2022)

Tästä hieman viiveellä myös köyhemmät valtiot alkavat luomaan toimivaa vedyn tankkausverkostoa, kun varakkaammat maat toimivat ensin suunnannäyttäjinä. Esimerkiksi Afrikassa- ja Etelä-Amerikassa ei ole yhtään julkista tankkauspistettä vuoteen 2022 mennessä. (H₂ Stations 2022.)

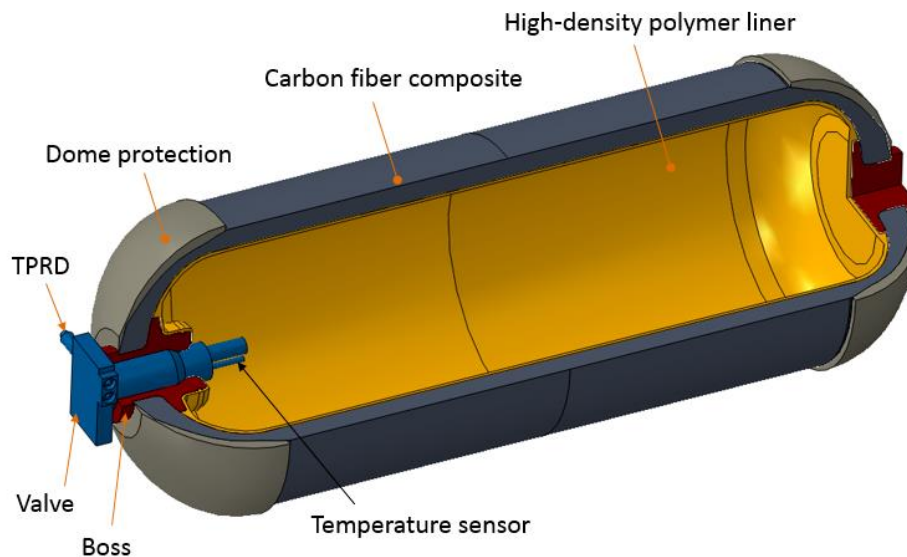
Valtiot tekevät suuria taloudellisia panostuksia ja investointeja, jotta valtioiden vedyn jakeluverkostot laajentuisivat ja tankkausasemien saatavuus kuluttajien kannalta mahdollistaisi vetyautoilun kehittymisen kaikkialla maailmassa. Vuoteen 2021 mennessä, vetyä on voinut tankata vasta 33 eri maassa. Samaisena ajankohtana tankkausasemia maailmanlaajuisesti oli yhteensä hieman alle kuusisataa (PetrolPlaza 2021.) Esimerkiksi Yhdysvalloissa on tavoitteena yli neljä tuhatta tankkausasemaa vuoteen 2030 mennessä (Statista 2019). Pelkästään jo Kalifornian osavaltioon kaavailtu vedyn tankkausverkosto ylittäisi tuhannen tankkausaseman rajan vuosikymmenen lopussa (glpautogas 2022). Vastaavana ajankohdana Japanissa tavoitteena on tuhat vetyasemaa parantaen vetyautoilun mahdollisuuksia merkittävästi (HydrogenCentral 2021). Myös Kiinan tavoitteena on noin tuhat vedyn tankkausasemaa vuosikymmen loppuun mennessä (PrNewswire 2022). Euroopassa Saksa pyrkii kolminkertaistamaan asemien määrää nykyisestä noin sadasta tankkausasemasta kolmeensataan asemaan tulevan kahdeksan vuoden ajanjaksolla (The Local 2022). Kokonaisuudessa Euroopassa on kaavailtu olevan noin 1500 vedyn tankkausasemaa kyseisen tarkastusjakson jälkeen (Plaza 2020).

5.2 Vetysäiliöt ja tankkaus

Vedyn fyysinen säilöminen on mahdollista joko kaasuna tai nesteinä. Kaasuna säilötyinä säiliöpaineet ovat yleisesti 350–700 baaria. Vetyä on mahdollista säilöä myös kemiallisesti, jolloin varastointi tapahtuu kiinteiden aineiden pinnalle adsorptiolla tai kiinteiden aineiden sisään absorptiolla. Autoteollisuudessa kuitenkin käytetään vedyn fyysistä varastointia sen ollessa kaasuna tai nesteytettynä. Autoteollisuudessa käytetään paineistettuja vetykaasusäiliötä, sillä pääsääntöisesti vetytankkaus asemilta on mahdollista tankata vain paineistettua vetyä kaasumaisessa olomuodossa. Muutamia tankkaus asemia tarjoavat kryogeenistä nestemäistä vetyä ja BMW onkin yksi poikkeus, jonka suunnittelema ajoneuvo toimii

kryogeenisellä vedyllä sekä bensiinillä. Kryogeenisten vetysäiliöiden haittapuolena viime vuosina on ollut kiehumisongelmat, jolloin nestemäinen vety pääsee säiliön ulkopuolelle haihtuen pois. Nämä ongelmat ilmenevät usein silloin, kun ajoneuvoa seisotetaan käyttämättömänä pitkiä aikoja. Kryogeenisen vedyn säilyttäminen tekee haastavaa myös se, että sitä täytyy säilöä -253 C° asteen lämpötilassa sen likviditeetin säilyttämiseksi. Nestemäisen olomuodon ylläpitäminen vaatii paljon energiaa sekä kehittyneen pakastinjärjestelmän toimiakseen. (IEAfuelcell n.d.)

Vetysäiliöt valmistetaan hiilikuitukomposiiteista tai hiilikuitu- ja metalliseoksista sekä komposiiteista (kuva 14). Säiliön sisimmäisin kerros on korkeamolekyylipainoista polymeeriä, jonka tehtävä on estää vetykaasun purkautuminen. Toinen kerros on hiilikuitu-epoksihartsi-komposiittikuorta, jonka tehtävä on pystyä pitämään säiliö kasassa jopa 700 baarin paineessa. Säiliön uloin kuori on tarkoitettu suojaamaan säiliötä iskuilta ja vaurioiden syntymisiltä. Säiliön sisällä on myös paineensäädin ja kaasun lämpötila-anturi, joka valvoo säiliön lämpötilaa tankkauksen aikana. Valmistajat yrittävät kehittää vetysäiliöitä yhä kevyemmiksi käyttäen apunaan hiilinanoputkia ja erilaisia seostettuja metalleja. Säiliöitä halutaan kehittää entisestään alhaisempien kustannusten vuoksi, sillä tilavuudeltaan 75 litran hiilinanoputki säiliö voisi lisätä ajoneuvon hintaa jopa 30 000 dollarilla. Jotta vetyautot pärjäisivät tulevaisuuden markkinoilla, täytyy niihin käytettävien komponenttien kehittyä, kokonaispainon tippua sekä vetysäiliöiden tilavuuden kasvaa entisestään. (Kantola n.d.)



KUVA 14. Vetysäiliö (H.S Roh ja R.K Ahluwala, Argonne National Laboratory n.d)

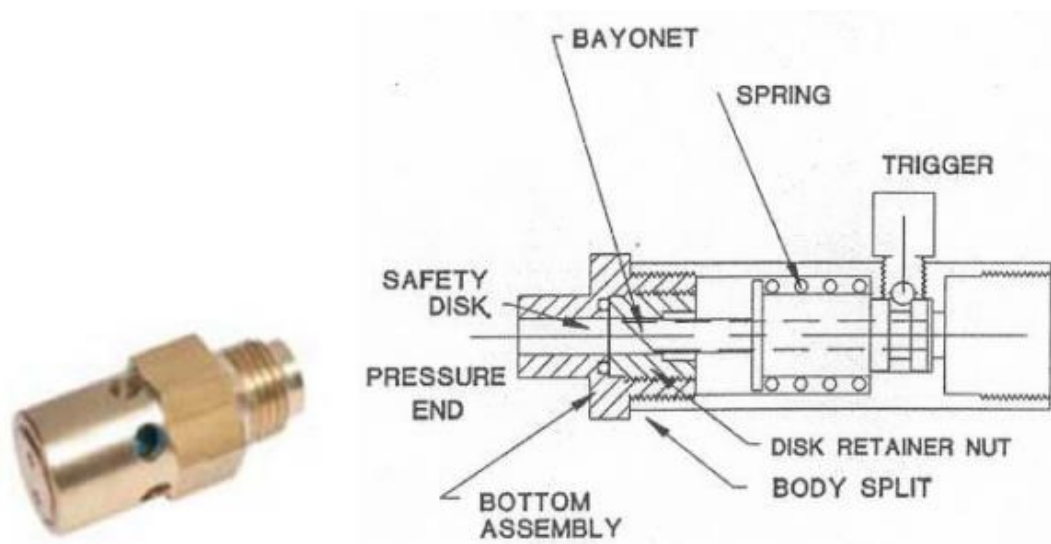
Ennen vedyn tankkaamista on varmistettava, että oman ajoneuvon käyttöpaine vastaa vetytankkausaseman tarjoamaa painetta. Mikäli ajoneuvon säiliöpaine on suurempi, kuin tankkausasemassa niin vetyä ei pystytä syöttämään ajoneuvon tankkiin. Vetyautojen tankkaus on toimenpiteenä lähes samanlainen kuin verrattuna polttomoottori käyttöisiin ajoneuvoihin sekä vedyn syöttöliitännät sijaitsevat polttomoottoriajoneuvoihin verrattuna usein autojen takana (kuva 15). Vetyannostelija työnnetään venttiiliin ja annostelijasta painetaan liipaisinta, jolloin annostelija lukittuu venttiiliin kiinni. Annostelijaa varovasti vetämällä voi varmistaa sen olevan lukittuna, jolloin vety kulkeutuu turvallisesti tankkiin. Kytettäessä annostelija vetyliitännän järjestelmä tarkastaa mahdolliset vuodot, ennen kuin tankkausta voidaan aloittaa (Cornaert 2015). Vetyajoneuvon tankkaus kestää noin kolmesta viiteen minuuttia, kun puolestaan sähköajoneuvon lataus on 30 minuuttia aina 12 tuntiin asti riippuen lataustehosta. (Nicholson 2020.)



KUVA 15. Vedyn tankkaus (Joe Clifford 2018)

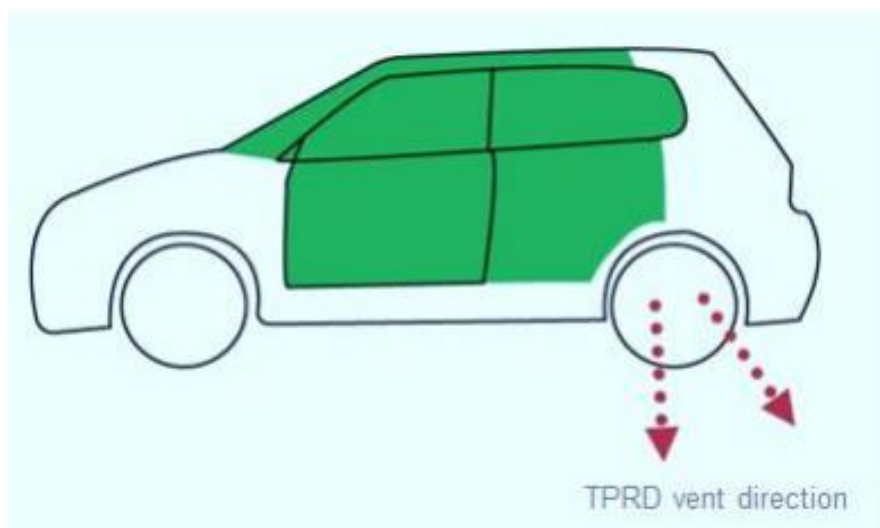
Syöttäessä vetyä korkealla paineella annostelijan- ja venttiilin ympärykset jäähtyvät ja saattavat muodostaa huurretta, johon ei saa koskea paleltumisvaaran vuoksi. Kun säiliö on täysi, annostelijan lukitus vapautetaan ja annostelija laitetaan takaisin paikoilleen. (Clifford 2018.)

Tärkein turvalaite vedyn varastointijärjestelmässä on paineensäätöventtiili (kuva 16). Venttiilin tarkoitus on ennalta ehkäistä liian suuren paineen tai lämpötilan aiheuttamia vaaroja. Mikäli venttiili havaitsee liian suuren paineen tai lämpötilan järjestelmässä, se päästää osan tai kaiken vedyn kontrolloidusti ulos säiliöstä. Järjestelmässä sijaitsevat lämpötila-anturit kommunikoivat keskenään toistensa kanssa infrapunavälillä ohjatakseen vedyn virtausnopeuden oikeaksi, jottei lämpötila kohoisi liian suureksi. Järjestelmä säätelee täyttönopeutta, jolloin vältetään ylikuumenemiselta täytön aikana. Kansainvälisesti sovellettavat standardit SAE J2601, SAE J2799 ja ISO 17268 asettavat vetypolttoaineen annostelijoille turvallisuusrajat ja suorituskykyvaatimukset (Cornaert 2015). Liian suuri lämpötila voi vahingoittaa säiliön seinämiä aiheuttaen myöhemmin mahdollisen säiliön repeämisen. Paineensäätöventtiilit ovat vaihdettava uusiin, mikäli järjestelmässä tapahtuu vedyn osittainen tai kokonaan tyhjennys vaaratilanteen ennalta ehkäisemiseksi. (Trestiakova-MCnally n.d.)



KUVA 16. Paineensäätöventtiili (Trestiakova-MCnally n.d)

Yleisimmät käytössä olevat paineensäätöventtiilit perustuvat sulavaan metallitulppaan, lasikupuun tai pistimeen. Toimintaperiaatteena nämä laukeavat niiden ylittäessä tietyn lämpötilan, jolloin venttiili päästää vedyn hallitusti ulos (kuva 17). Vialliset paineensäätöventtiilit voivat lauaeta ennenaikaisesti tai niiden purkausnopeudet voivat vikatilanteessa olla puutteelliset. Näihin vaikuttavat usein venttiilien puhtaus, sillä ajansaatossa niihin saattaa kerääntyä ruostetta, likaa tai jäätä. (Trestiakova-MCnally n.d.)



KUVA 17. Vedyn poistoreitti (Trestiakova-MCnally n.d)

Vetykaasun, kuten myös muiden polttoaineiden sekä energioiden hinnat tankkausasemilla vaihtelevat maailmanlaajuisesti ja myös vedyn tuotantotavalla on

merkitys kuluttajahintoihin. Sininen vety, joka tuotetaan höyryreformoinnin sivutuotteena fossiilisten polttoaineiden avulla, on kuluttajille toistaiseksi edullisempaa verrattuna uusiutuvilla energianlähteillä tuotettuun vihreään vetykaasuun. Vetykaasun hinta maailmalla vaihtelee paljon, mutta hinnat ovat tulleet alaspäin vedyn tuotantomahdollisuuksien kehittyessä. Vihreän vedyn kilogramma hinta maailmalla vaihtelee pääsääntöisesti 2,5–6 dollarin välillä. Puolestaan Euroopassa esimerkiksi Saksassa vetykaasun kilohinta on ollut noin 9,5 euroa ja Etelä-Koreassa noin 6 euroa, mutta hintojen odotetaan tulevan alas merkittävästi (Hyundai n.d). (KPMG n.d.)

6 VETYPOLTTOKENNOT

Vedyllä toimivat polttokennosähköajoneuvot (FCEV) ovat pakokaasupäästöttömiä ajoneuvoja, jotka vapauttavat ympäristöön vain lämmintä ilmaa ja vesihöyryä. Polttokennosähköajoneuvot ja niiden tankkaukseen vaadittava vetyinfrastrukturi on vielä alkuvaiheessa. Yhdysvalloissa energiaministeriö johtaa tutkimusta, jonka päämääränä on tehdä vetykäyttöisistä ajoneuvoista ympäristöystävällinen, edullinen ja turvallinen vaihtoehto ajoneuvomarkkinoille. Vuoden 1992 energiapolitiikan lain mukaisesti vetyä pidetään vaihtoehtoisena polttoaineena ja tämän vuoksi se on oikeutettu vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävien ajoneuvojen verohyvityksiin. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

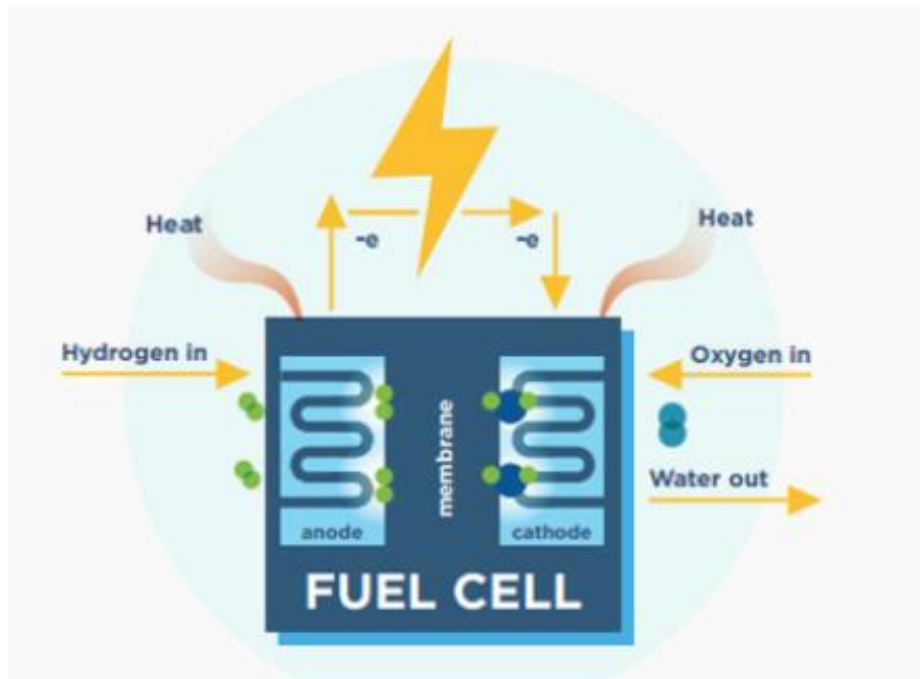
Polttokenno on laite, jonka tarkoituksena on tuottaa sähköä sähkökemiallista reaktiota käyttäen. Polttokennossa happi ja vety yhdistetään sähkön, lämmön ja veden tuottamiseksi. Polttokennoja käytetään nykyään monissa eri käyttökohdeissa kuten sähkön tuottamisessa yrityksiin ja koteihin sekä kriittisten tilojen, kuten ruokakauppojen, datakeskusten ja sairaaloiden pitämiseen käynnissä. Polttokennoja käytetään myös kasvavissa määrin erilaisten ajoneuvojen, kuten henkilöautojen ja kuorma-autojen voimanlähteenä. Polttokennot ovat puhtaita, tehokkaita ja hiljaisia, joita ei tarvitse ajoittain ladata vaan ne jatkavat sähköntuotantoa niin kauan kun polttoainetta syötetään järjestelmään. (FCHEA n.d.)

Polttokennot luokitellaan niiden käyttämien elektrolyyttityyppien mukaan. Luokittelu määrittyy kennossa tapahtuvien sähkökemiallisten reaktioiden, lämpötila-alueen, tarvittavien katalyyttien ja polttoaineiden mukaan. Polttokennot voidaan luokitella kahteen suureen alaluokkaan, matalalämpöisiin (alle 210 °C:ssa) ja korkealämpöisiin polttokennoihin (yli 600 °C:ssa) (Cassir & Lair 2013, S. 941). Polttokennotyyppinä on seitsemän erilaista, joista vain kahdessa käytetään vetyä polttoaineena. Polttokennotyyppinä ovat protonivaihto-, suora metanoli-, alkalinen-, fosforihappo-, sulakarbonaatti-, kiinteäoksidi- ja käännettävät polttokennot. Vetyä polttoaineena käytäviä polttokennoja ovat kiinteäoksidipolttokenno ja protonivaihtopolttokenno, joka on toiselta nimeltään polymeerielektrolyyttikalvopolttokenno. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)

6.1 Polttokennojen toimintaperiaate

Polttokenno koostuu samankaltaisista komponenteista kuin ajoneuvon sähkölaiteakku. Polttokennojärjestelmän jokaisessa kennossa on elektrodipari, anodi ja katodi, jossa anodi luovuttaa elektroneja katodin absorboidessa elektroneja. Molemmat elektrodit erotellaan toisistaan elektrolyytin avulla. Elektrolyytti voi olla kiinteää ainetta tai nestettä, mutta toimiakseen sen täytyy johtaa ioneja elektrodien välillä, jotta syntyy kemiallinen reaktio. (Schumm n.d.)

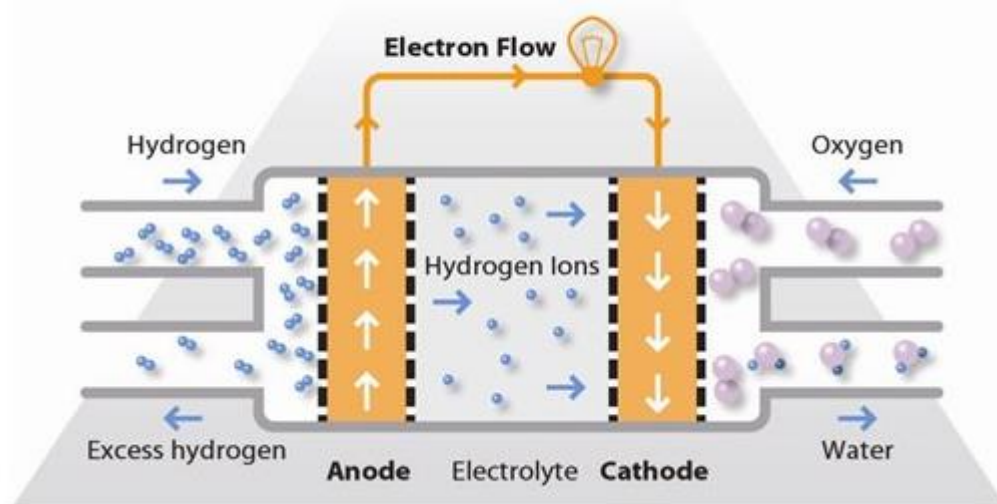
Polttokennossa vetyä ohjataan polttokennon anodin läpi ja happea katodin läpi (kuva 18). Katalyytti jakaa anodikohdassa vetymolekyylit elektroneiksi ja protoniksi. Protonit kulkevat elektrolyytin lävitse ja elektronit pakotetaan piirin lävitse, jolloin syntyy sähkövirtaa ja lämpöä. Katodipuolella protonit, elektronit ja happi yhdistyvät tuottaen pelkkiä vesimolekyylejä. Polttokennoissa ei ole liikkuvia osia, joka tekee järjestelmästä erittäin luotettavan ja hiljaisen. (Energy Efficiency & Renewable Energy n.d.)



KUVA 18. Polttokennon toimintaperiaate (FCHEA n.d)

6.2 Protoninvaihtopolttokenno

Protoninvaihtopolttokenno on tällä hetkellä yleisin polttokennotyyppi, jota hyödynnetään henkilöautoissa. Lyhennettynä protoninvaihtopolttokenno tunnetaan nimellä PEMFC, joka tulee sanoista proton exchange membrane fuel cell. Toiselta nimeltään polttokennoa kutsutaan polymeerielektrolyttikalvopolttokennoksi, mutta siitä käytetään silti samaa PEMFC lyhennettä. PEMFC-kennot jaotellaan matalalämpöisiin ja korkealämpöisiin polttokennoihin. Matalalämpöisenä se käyttää elektrolyyttinä vettä ja korkealämpöisenä mineraalihappoa. Käyttölämpötilat matalalämpöisessä on 80–100 °C ja korkealämpöisessä 100–200 °C. PEMFC tuottaa sähköä elektrolyysin avulla, jossa elektroneina toimii yleensä jalometallit. Polttoaineena käytetään vetyä, joka annostellaan anodille, jossa elektronit eritellään protoneista platinapohjaisen katalyytin pinnalla (kuvio 3). Protonit kulkevat kalvon lävitse kennon katodipuolelle ja elektronit siirtyvät ulkoiseen piiriin tuottaen sähkövirtaa. Katodipuolella jalometallielektrodi yhdistää protonit ja elektronit hapen kanssa, josta syntyy sivutuotteena pelkkää vettä. (Fuelcelltoday 2017.)



KUVIO 3. Protoninvaihtopolttokennon toimintaperiaate (Fuelcelltoday 2017)

PEMFC:llä on monia hyvä puolia. Niillä on suuri tehottiheys, joka meinaa tehoa, painoa tai tilavuutta pinta-alan yksikköä kohden. Tämän vuoksi PEMFC:n on kompaktin kokoinen ja kevyt. Käyttölämpötilat ovat matalat, joka puolestaan tuo etuna nopean lämpiämisen ja käynnistymisen. Matalan käyttölämpötilan vuoksi myös nopeat kuormituksen muutokset onnistuvat vaivattomasti. Hyvänä puolena

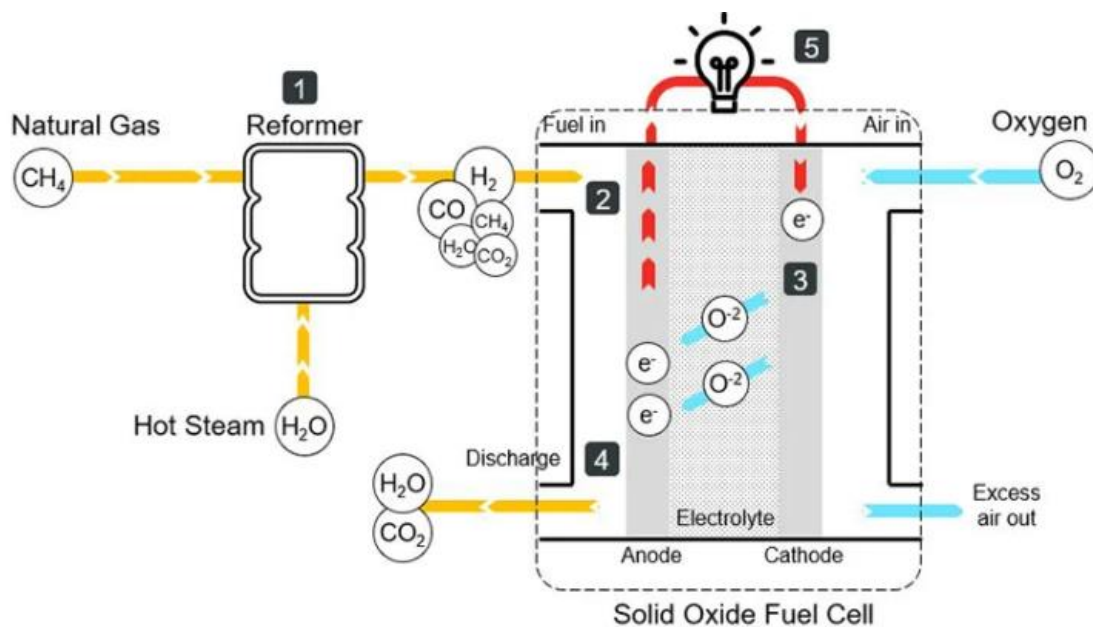
järjestelmässä ovat päästöt, koska sivutuotteena syntyy pelkkää vettä. PEMFC:ssä ei ole haittapuolena korroosiota, koska järjestelmässä on ainoana nesteinä joko vesi tai mineraalihappo. PEMFC:n haittapuolena on platinakatalyytin tarve. Alhaisissa käyttölämpötiloissa sähkökemialliset reaktiot ovat hitaita ja vain muutamat harvinaiset ja arvokkaat metallit, kuten platina, tarjoavat riittävän aktiivisuuden sähkökatalyytille. Teoreettinen hyötysuhde PEMFC:llä on 83 %, mutta todellinen 40–60 %. Jos polttoaineena käytetään erittäin puhdasta vetyä, voidaan päästä 60 % hyötysuhteeseen. (ScienceDirect 2022.)

6.3 Kiinteäoksidipolttokenno

Kiinteistä oksidipolttokennoista käytetään lyhennettä SOFC, joka tulee sanoista solid oxide fuel cell. SOFC polttokennot toimivat erittäin korkeissa lämpötiloissa, joka voi korkeimmillaan ylittää 1000 °C asti. Hyötysuhde muuttua polttoaine sähköksi SOFC polttokennolla on 60 % luokkaa. Hukkalämmön talteen ottavissa sovelluksissa hyötysuhde voi ylittää jopa 85 %. Kiinteät oksidipolttokennot käyttävät kiinteää keraamista yhdistettä elektrolyyttinä, kuten yttriumoksidilla stabiloitua zirkoniumoksidia, nesteen tai kalvon sijaan. Korkea lämpötila tarkoittaa, että polttoainetta voidaan reformoida polttokennossa, mikä poistaa ulkoisen reformoinnin tarpeen ja mahdollistaa käytön erilaisten hiilivetypolttoaineiden kanssa. SOFC Polttokenno kestää myös rikkiä paremmin kuin muut polttokennotyypit, joten SOFC polttokennoa voidaan käyttää myös hiilikaasun kanssa. Korkean lämpötilan etuna on reaktiokinetiikan paraneminen, joka vähentää metallikatalyytin tarvetta. Korkeiden lämpötilojen haittapuolena on pitkä käynnistymisaika, sillä käyttölämpötilan saavuttamiseen kuluu suurempi aika kuin matalalämpöisillä polttokennoilla. Myös valmistuksessa on kiinnitettävä huomiota materiaalien lämmönkestävyyteen ja lämpöhäviön ehkäisemiseen. (Fuelcelltoday n.d.)

SOFC polttokenno käyttää sähköntuottamiseen hiilivetypolttoaineita, kuten metaania, propaania ja maakaasua (kuvio 4). Polttoaine käy lävitse höyryreformointiprosessin, jonka seurauksena kemiallinen reaktio tuottaa vetyä, hiilimonoksidia, hiilidioksidia ja höyryä. Polttoaine tulee polttokennoon anodi puolelta ja happi katodipuolelta. Ilmassa oleva happi yhdistyy elektronien kanssa muodostaen oksidi-

ioneja. Oksidi-ionit kulkevat katodilta anodille elektrolyytin lävitse, jossa ne reagoivat vedyn ja hiilimonoksidin kanssa tuottaen vesihöyryä ja hiilidioksidia. Kemiallinen reaktio vapauttaa elektroneja, jotka kulkevat katodille ulkoisen sähköpiirin kautta tuottaen sähköä. (Yuksel 2020.)



KUVIO 4. Kiinteäoksidipolttokenno (Yuksel 2020)

7 VETYPOLTTOKENNOAJONEUVOT

Vetypolttokenno-henkilöautojen mekaaninen toiminta sekä perusrakenne ovat hyvin samankaltaiset sähköautoihin verrattuna, mutta akustolle- ja ajomoottorille tuotettava sähköenergia tuotetaan autoihin rakennettujen polttokennojen avulla. Ajoneuvot ovat varustettu vetysäiliöillä, joihin tankataan paineistettua vetykaasua. Tämä vetykaasu johdetaan polttokennoihin, joissa kemiallisen prosessin avulla luodaan sähkövirta johtaen se suoraan auton ajomoottorille tai tarvittaessa ladaten auton akustoa. Virtapiiriä kiertävien elektronien yhdistyessä elektrolyyttikalvojen lävitse kulkevien protonien sekä hapen kanssa, lopputuotoksena syntyy vettä ja lämpöä. Termodynaaminen energia voidaan hyödyntää ajoneuvon lämmitystoimintoihin ilman ylimääräisiä päästöjä. Vetypolttokennoilla toimivien henkilöautojen hyötysuhde on noin 60 % (Hyundai 2018). (Fw:thinking 2015.)

Autovalmistajat ovat useiden vuosien ajan yrittäneet saada vetypolttokennotekniikkaa kehitettyä, mutta puutteellisen tankkausinfrastruktuurin sekä myös osittain hitaan kehityksen seurauksena se ei ole onnistunut saavuttamaan markkina-asemaa kuluttajien keskuudessa. Tällä hetkellä markkinoilla ovat suurina toimijoina vain Toyota ja Hyundai, jotka keskittyvät vedyllä toimiviin polttokennoajoneuvoihin muita valmistajia enemmän. Muitakin ajoneuvovalmistajia on mukana autojen suunnittelussa sekä prototyypin valmisteluissa, mutta ne eivät ole vielä investoineet kehitykseen yhtä merkittävästi kuin Toyota ja Hyundai. (Wilkinson 2022.)

7.1 Toyota Mirai

Toyota aloitti vetypolttokennoajoneuvojen kehittämisen vuonna 1992 ja julkaisi ensimmäisen vetypolttokennoajoneuvon vuonna 2014. Infrastruktuurin ollessa puutteellinen ajoneuvoja ei juurikaan saatu myytyä, joten insinöörit keskittyivät ajoneuvon uudistamiseen ja kehittämiseen. Vuonna 2021 Toyota esitteli toisen sukupolven Mirain (kuva 19). Ajoneuvo tuottaa 182 hevosvoimaa ja kiihtyy 0–100 km/h yhdeksässä sekunnissa. Ajoneuvon ulkonäköön on panostettu aiempaa

enemmän ja siitä on tehty nykyaikainen, joka on saanut ihmiset kiinnostumaan ajoneuvosta. (Toyota 2021.)



KUVA 19. Toyota Mirai (Maddireddy n.d)

Toyotan ensimmäisen sukupolven Mirai oli etuvetoinen ja nelipaikkainen, mutta uuden alustasuunnittelun avulla toisen sukupolven Miraista saatiin viisipaikkainen takaveto. Uusi malli on edeltäjäänsä 85 mm pidempi, 70 mm leveämpi ja 65 mm matalampi. Ulkoinen muotoilu saa ajoneuvon näyttämään massiivisemmalta ja urheilullisemmalta nykypäivän ajoneuvotrendiä mukaillen. Uuden alustamuotoilun avulla ohjaamosta on saatu tilavampi ja ajo-ominaisuuksiltaan vakaampi. Mirain 128 kW:n polttokennosto on siirretty ajoneuvon etupäähän ja 134 kW:n sähkömoottori on sijoitettu puolestaan ajoneuvon taka-akselin yläpuolelle (kuva 20) (Burt 2020). Takana sijaitsevan akuston kokonaiskapasiteetti on 1,24 kWh ja painoa akkupaketilla on 44,6 kg (Sheehy Toyota of Laurel 2021). Ajoneuvoon on lisätty kolmas vetysäiliö, jonka vuoksi autolla pystytään ajamaan jopa 650 kilometriä yhdellä tankkauksella. Vetysäiliöistä yksi on ajoneuvon suuntaisesti pitkitäin ja kaksi muuta säiliötä takaosassa poikittain, joihin tankataan yhteensä 5,6 kg paineistettua vetykaasua. Tankkaus täyteen kestää 3–5 minuuttia ja ajoneuvo on vetyautolle tyypillisesti paikallispäästötön. Esimerkkinä Ranskan Pariisissa taksikäytössä on useita satoja Toyota Mirai vetyautoja (Kalenoja 2022). Toyota Mirain lähtöhinta on noin 50 000 euroa (Edmunds n.d). (Toyota 2021.)



KUVA 20. Toyota Mirain voimansiirron alustasuunnittelu (Barnard 2021)

7.2 Hyundai Nexö

Hyundai Nexö (kuva 21) on toisen sukupolven polttokennoauto Hyundaiilta. Nexö korvasi edeltäjänsä Hyundai ix35 mallin, joka oli ensimmäinen sarjavalmistettu polttokennoajoneuvo maailmassa. Nexössä on käytetty markkinoiden kehittyneintä tekniikkaa, joka pitää sisällään muun muassa autonomisen ajamisen, älykkäät kuljettajaa avustavat järjestelmät, sekä tehokkaimmat voimalinjat. Nexön akseliväliä pidennettiin edeltäjänsä nähden 150 mm, jonka vuoksi sisätiloista saatiin avarammat. Pysäköintitilanteissa ajoneuvon ulkopuolelta kuljettajan on mahdollista liikuttaa autoa avaimesta käsin eteen- ja taaksepäin (Hyundaiusa 2022). (Hyundai n.d.)



KUVA 21. Hyundai Nexö (Hyundai n.d)

Autossa on kolme vetysäiliötä, joista jokainen säiliö on kapasiteetiltaan 52,2 litraa muodostaen säiliöiden yhteistilavuudeksi 156,6 litraa. Ajoneuvon kantamaksi yhdellä tankkauksella on ilmoitettu 666 kilometriä, mikä on suurempi kuin kenelläkään muulla kilpailijalla. Polttokennojärjestelmä on edeltäjäänsä kevyempi ja sen sähköinen voimalinja tuottaa 163 hevosvoimaa sekä 395 newtonmetrin väännön. Autossa on kapasiteetiltaan 1,56 kWh:n akku. Hyundai Nexo kiihtyy 0–100 km/h 9,2 sekunnissa ja sen huippunopeus on 179 km/h. Hyundai Nexo sai viisi tähteä Euro NCAP –turvallisuustestissä. Nexosta tuli ensimmäinen polttokennoauto, joka on saanut testistä korkeimman arvosanan eli viisi tähteä. Hyundai Nexon lähtöhinta on noin 60 000 euroa (Edmunds n.d.). (Hyundai n.d.)

7.3 Mercedes-Benz GLC F-Cell

Daimlerin tutkijat ovat työskennelleet polttokennojen parissa jo yli 30 vuotta. Ensimmäisen prototyypin Mercedes-Benz esitteli vuonna 1994, joka oli nimeltään NECAR 1. Mercedes-Benz on myös tuonut markkinoille B-sarjan polttokennoajoneuvon. Mercedes-Benzin laskelmien mukaan heidän valmistamillaan polttokennoajoneuvoilla on ajettu jo yli 12 miljoonaa kilometriä. (Kane 2018.)

Mercedes-Benz toi markkinoille 2019 uuden GLC F-Cell polttokenno-hybridiajoneuvon (kuva 22). GLC F-Cell mallia oli aluksi saatavilla vain Saksan suurimissa kaupungeissa, joissa oli tarpeeksi vetytankkausasemia ajoneuvon käyttötarpeisiin nähden. Ensimmäiset GLC F-Cell mallit myytiin vain leasing-sopimuksilla asiakkaille Mercedes-Benzin oman vuokrauspalvelun kautta. Vetysäiliöitä on kaksi ja niiden yhteistilavuus on 4,4 kg. Ajoneuvon vedyn kulutus on 1 kg / 100 km. Ajoneuvossa on polttokennon lisäksi myös sähköakku, jonka toimintamatka on 51 kilometriä. Yhteensä ajoneuvon toimintamatka täyteen tankattuna ja ladattuna on 478 kilometriä. Ajoneuvon polttokennon ja sähkömoottorin yhteisteho on 211 hevosvoimaa ja vääntömomentsi 365 newtonmetriä. Huippunopeudeksi on ilmoitettu 160 km/h. Mercedes-Benzin kehittämä polttokenno-hybridijärjestelmä on erityinen, koska ajotila voidaan valita sähkön, vedyn tai niiden yhdistelmän väliltä. Ajettaessa hybridiajotilassa ajoneuvo saa virtansa molemmista energialähteistä. Autossa on polymeerielektrolyytti-polttokenno ja 13,8 kWh:n litiumio-

niajoakku (Ahtiainen 2018). Polttokennon avulla päästään auton energiankulutuksen kannalta optimaaliseen hyötysuhteeseen ja auton tehontarpeen lisääntyessä hyödynnetään auton ajoakustosta saatavaa lisäenergiaa. Ajettaessa maantiellä, ajoneuvo käyttää energiana pääsääntöisesti vetyä ja kaupunkiajossa auto ottaa energian suoraan ajoakulta. Vetysäiliöiden tankkaus täyteen kestää vain kolme minuuttia. Ajoneuvossa on myös jarrutus- ja rullausenergian talteenotto järjestelmä, joka varastoi energiaa korkeajänniteakulle. (Kane 2018.)



KUVA 22. Mercedes-Benz GLC F-Cell (Disdale 2019)

7.4 BMW iX5 Hydrogen

BMW esitteli iX5 Hydrogen vetypolttokennoautonsa IAA Mobility -tapahtumassa Münchenissä 2021 (kuva 23). Ajoneuvossa käytetään vetypolttokennon rinnalla BMW:n kehittelmää eDrive -teknologiaa, jossa ajoneuvo yhdistää vedyllä toimivan polttokennon sekä ladattavan sähköakuston yhteiskapasiteettia auton liikkuamiseen. Vetypolttokenno tuottaa 125 kilowattia vapauttaen ympäristöön polttokennolle tyypilliseen tapaan vesihöyryä ja lämpöä. Vetypolttokenno on suunniteltu yhteistyössä Toyotan kanssa (Tisshaw 2021). Autojen suurtehoakkujen avulla niihin varastoitua energiaa voidaan käyttää tehon maksimointiin. Yhteistehona ajoneuvo tuottaa hetkellisesti jopa 275 kilowattia tukien brändin mainostamaa suorituskykyä. Ajoneuvon omamassa on 2500 kg ja sen toimintasäde täy-

teen tankattuna 500 kilometriä (Parikh 2022). Polttokennon tarvitsema vety säilötään kahteen 700 baarin paineella toimivaan vetysäiliöön, jotka ovat valmistettu hiilikuituvahvistetusta muovista. Säiliöihin mahtuu yhteensä lähes kuusi kiloa vetyä ja niiden tankkaaminen kestää vain muutaman minuutin. (BMW UK 2022.)



KUVA 23. BMW iX5 (BMW UK, 2022)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

8.1 Historian vaikutus vetyautoilun kehitykseen

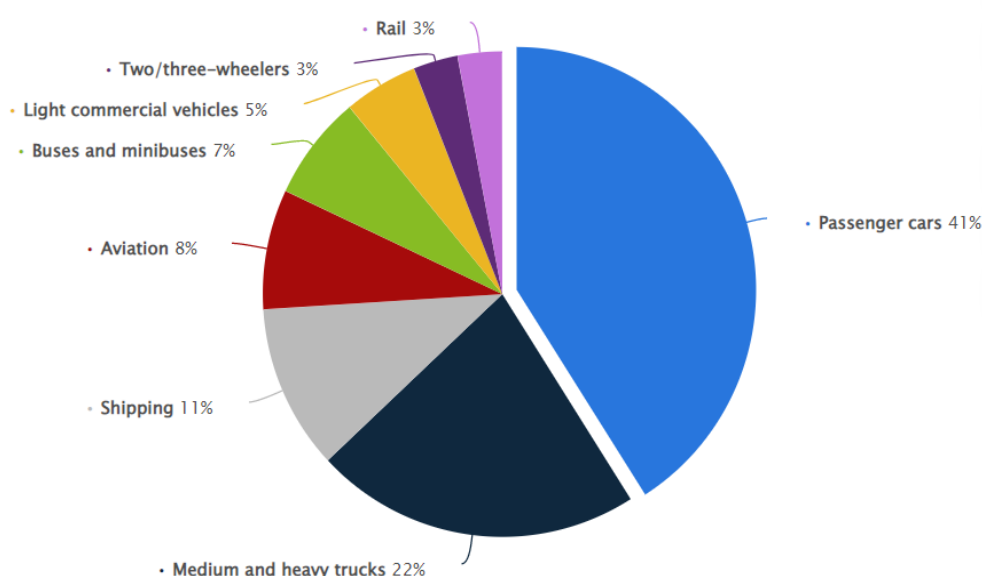
Vety alkuaineena ja energiaratkaisuna on kiinnostanut tutkijoita aina sen varhaisesta löytymisestä lähtien 1700-luvun loppupuolella. Kun ymmärrettiin, että vety on sitoutuneena maailman meriin, siinä tiedettiin olevan potentiaalia niin sanottuna ”ehtymättömänä luonnonvarana”. 1800-luku oli aikaa, jolloin elektrolyysi ja sen myötä polttokennojen kehitys ottivat harppauksia mahdollistaen vetykaasun tuotannon ja hyödyntämisen energianlähteenä. Kustannukset olivat kuitenkin vielä suuria, joten käytännön sovellutukset olivat pitkään vähäisiä. Polttokennoja käytettiin avaruusteknologiassa, jolloin prosessissa syntynyttä vettä voitiin hyötykäyttää tehokkaasti esimerkiksi juomavetenä. Polttokennolla varustettu auto saatiin kehitettyä 1960-luvulla, mutta kustannussyistä niiden massatuotanto ei ollut vielä kukaan kannattavaa.

Historian saatossa vetypolttokennoajoneuvojen kehitys on ollut voimakkainta silloin, kun on haluttu olla energiariippumattomia raakaöljystä. Japanin ollessa vetyteknologian edistysmaa siellä on arvostettu omavaraisuutta energiaan sotajan kauppasaarroista lähtien. Siksi Japani onkin erittäin edistyksellinen vedyn suhteen ja maassa on yksi maailman kattavimmista vetyinfrastruktuureista mahdollistaen maanlaajuisen liikkumisen vedyllä. Myös muut historian varrella olleet öljykriisit ja kauppasaarrot ovat antaneet maailmanlaajuisesti vauhtia kehittää vaihtoehtoisten polttoaineiden sovellutuksia, jolloin vetyajoneuvojen kehittäminen on ottanut edistysaskelia.

Yritykset tavoittelevat mahdollisimman suuria taloudellisia voittoja, jolloin myös maailmanlaajuisesti vallitseva poliittinen tahto ja päätöksenteko ovat merkinneet paljon historiasta tähän päivään saakka eri energiaratkaisujen parissa. Tämän hetken vallitseva trendi on irrottautua fossiilisista polttoaineista voimakkaiden ilmastorajoitusten ja kustannusten nousujen myötä. Tämän vuoksi vetyautot tekevät tuloaan sähköautojen rinnalle vuosikymmenen lopulla.

8.2 Vedyn käyttö tulevaisuuden henkilöautoliikenteessä

Liikenne ja liikkuminen aiheuttavat hieman alle viidenneksen maailman kaikista kasvihuonepäästöistä ja se on tällä hetkellä eniten kasvava päästöjen aiheuttaja maailmassa (Statista 2022). Vuonna 2018 liikenteen päästöistä henkilöautoilun osuus on ollut peräti 41 % (kuvio 5), jolloin se on ollut noin 7 % kaikista kasvihuonepäästöistä maailmanlaajuisesti (Statista 2020). Maailman väkiluku lähestyy kahdeksaa miljardia väestökasvun ollessa eksponentiaalista varsinkin vähiten kehittyneissä maissa. Kansainvälisten väestöennusteiden vaihdella 9–13 miljardin ihmisen välillä vuonna 2100, tilanne olisi ilmaston kannalta kestämätön käyttämällä nykyisiä fossiilisia polttoaineita ajoneuvojen energianlähteinä. Vaikka tällä hetkellä yksilöiden kulutus ja hiilijalanjälki ovatkin moninkertaisesti suurempaa rikkaissa- ja kehittyneissä maissa, fossiilisilla energianlähteillä toimivat ajoneuvot tekevät siirtymää köyhempiin maihin viiveellä. Aasiassa ja Afrikassa voimakas väestöpopulaation kasvaminen tarkoittaa myös liikennemäärien kasvamista tarkastellessa ajettuja kokonaiskilometrejä maailmanlaajuisesti. Näin ollen ilmastonmuutoksen estämisen kannalta on ehdottoman tärkeää, että ajoneuvojen kokonaispäästöjä voitaisiin vähentää merkittävästi uusien teknologioiden avulla.



KUVIO 5. Maailman liikennepäästöjen kokonaisjakauma eroteltuna (Statista 2020.)

8.3 Vedyn soveltuvuus henkilöautojen polttoaineeksi

Vety soveltuu hyvin henkilöautojen polttoaineeksi sen ollessa erittäin kevyt- ja energiatiheä alkuaine, eikä sen kuljettaminen vaadi erityisen paljoa tilaa paineistettuna. Elektrolyysin avulla tuotettu vety on myös ilmaston kannalta puhdas polttoaine, koska polttokennotekniikan avulla se reagoi hapen kanssa muodostaen pelkästään lämpöä sekä vettä. Vety ei ole myöskään toimintaherkkä kylmille lämpötiloille, kuten useat muut polttoaineet. Monet ovat kyseenalaistaneet vedyn turvallisuuden onnettomuustilanteissa sen räjähdysherkkyytensä vuoksi. Vedyn tankkaaminen ja käyttäminen polttoaineena on turvallista, kun sitä käsitellään oikein. Autojen pohjarakenteissa sijaitsevat säiliöt ovat kestäviä ja sijoiteltu turvallisuuden kannalta järkevästi. Säiliöt ovat myös varustettu varoventtiilein, jotta esimerkiksi tulipalotilanteessa säiliöiden paineiden kasvaessa vetykaasu voidaan ohjata hallitusti taivaalle. Tilanne, jossa auto päätyisi katolleen ja säiliöstä vapautuva vetykaasu syttyisi tuleen, olisi haastava. Näin ollen kaasun hätäohjauksen reitti tulisi suunnitella järkevästi myös tällaisten tilanteiden varalta.

8.4 Vedyn ominaisuudet verrattuna muihin energialähteisiin

Ajotilanteessa vetypolttokenno-henkilöautot ovat hyötysuhteeltaan polttomootoriautoihin verrattuna varsin hyviä sen ollessa noin 60 %. Bensiini käyttöisten autojen yltäessä tyypillisesti 20–35 % hyötysuhteeseen, voivat diesel käyttöiset ajoneuvot päästä hieman tätä parempiin lukemiin 30–40 % välille. Puolestaan täyssähköauton hyötysuhde on jopa noin 90 % tehden siitä ajotilanteessa ylivoimaisesti energiatehokkaimman vaihtoehdon. Vedyn valmistaminen on vielä hankalaa, eikä sitä esiinny keveytensä vuoksi vapaasti luonnossa kaasumaisessa olo muodossa. Sen ollessa sitoutuneena eri yhdisteisiin, sitä täytyy valmistaa kalliiden valmistusprosessien avulla aiheuttaen tuotannossa energiahäviöitä. Real Engineer:in mukaan elektrolyysi aiheuttaa häviöitä noin 30 %, kaasun paineistaminen noin 13 % sekä polttokennot noin 40 % niiden toimiessa puhtaalla vety-

kaasulla. Yhteen lasketut energiahäviöt vetyhenkilöautoilussa ovat noin kaksinkertaiset sähköautoiluun verrattuna. Näin ollen hyötysuhteen ja energiatehokkuuden osalta vedyllä ei voi kilpailla sähköautoa vastaan.

Vetyhenkilöautojen suurin kilpailijaryhmä on suuria akkukapasiteetteja käyttävät sähköautot, jotka ovat yleistyneet räjähdysmäisesti 2020-luvulta alkaen. Sähköautojen kysyntä on ylittänyt merkittävästi tehtaiden tuotantokapasiteetit, joten uusien autojen toimitukset kuluttajille saattavat kestää kuluttajien näkökulmasta kohtuuttoman kauan. Sähkömoottorilla toimivien autojen akustoissa käytetään usein litiumia tai nikkelimetallihybridä riippuen voimalinjan suunnittelusta. Litiumin antaessa parhaan energiasisällön suhteessa sen massaan, sitä käytetään pääsääntöisesti täyssähkö- ja polttokennoautojen akustoissa. Tyypillisesti ladattavien sähköautojen akustojen energiakapasiteetit vaihtelevat automallista riippuen 45–100 kWh:n välillä, niiden painaessa 200–700 kg. Lataushybridien akustot ovat noin 10 kilowattituntia ja niin sanottujen kevythybridien akustoiksi riittää kapasiteetiltään 1–2 kWh:n akustot. Vertauksena vetypolttokennolla toimivan Toyota Mirain akuston energiakapasiteetti on 1,24 kWh ja massaa akkupaketilla on hieman yli 40 kiloa. Puolijohdepuolan lisäksi myös litiumakustojen kysyntä on kiihtyvissä määrin tuotantoa voimakkaampaa, joten polttokennoilla varustettujen ajoneuvojen akustojen litiumin tarve on huomattavasti täyssähköautoja pienempi. Tällöin vetypolttokennolla varustettujen ajoneuvojen tuotanto ei ole myöskään niin riippuvainen litiumista verrattuna täyssähköautoihin tai ladattaviin hybrideihin.

Vetypolttokenno-henkilöautojen omamassa on sähköautoihin verrattuna pienempi. Jo pelkästään täyssähköautojen akustojen painaessa useita satoja kiloja, huomattavasti pienemmillä akustoilla varustetut polttokennoautot vetysäiliöineen jäävät automalleista riippuen jopa 10–20 % kevyemmiksi. Ylimääräisen massan liikuttaminen tarvitsee aina energiaa, jolloin vedyllä toimivat polttokennoautot ovat tässä mielessä sähköautoja energiaystävällisempiä. Vety on melkein kolme kertaa energiatiheämpää ainetta kuin bensiini tai diesel. Yhdestä kilosta vetyä saadaan tehokkaalla PEMFC polttokennolla yli 20 kWh sähköenergiaa, joten viidestä kilosta puristettua vetykaasua saadaan noin 100 kWh energiaa. Tämä on suurempi määrä energiaa, kuin useiden ajoneuvovalmistajien sähköautojen maksimaaliset akkukapasiteetit. Akkuteknikka on jo nyt hyvin pitkälle kehittyntä ja

kasvattaessa akuston kapasiteettia, myös akuston massaa joudutaan lisäämään huomattavasti. Tietyn painonlisäyksen jälkeen akustojen massan lisäys johtaa väistämättä myös pienempään kokonaishyötysuhteeseen kapasiteetin kanssa. Vety- tai sähköajoneuvojen sähkömoottoriratkaisuiden ollessa usein kestopagneetti- tai induktiomootteita, näiden tehon tarve sekä energiankulutus ovat usein hyvin samankaltaiset. Näin ollen sähköautojen ajomatkan lisäys verrattuna vetytankeilla varustettuun polttokennoautoon on fysiikanlakien perusteella huomattavasti hankalampaa sekä myös kustannuksiltaan paljon kalliimpaa.

Vetypolttokennoilla varustettujen henkilöautojen toiminta ei ole yhtä merkittävästi lämpötilariippuvainen verrattuna ladattaviin sähköautoihin. Alhainen pakkaneen ei vaikuta juurikaan vetyyn ja sen käytännön ominaisuuksiin kaasuna, mutta se heikentää hieman polttokennojen tehokkuutta tuottaen vedystä sähköenergiaa. Tämän lisäksi myös veden- ja kosteuden jäätyminen polttokennoihin voi heikentää polttokennojärjestelmän komponentteja ajan kuluessa. Kylmien talviolosuhteiden heikentäessä täyssähköautojen toimintamatkaa jopa puolella, polttokennojen tehokkuus tuottaa sähköä voi alentua noin viidenneksen. Vetypolttokennoilla toimivat henkilöautot hyödyntävät polttokennojen toiminnasta aiheutuvan lämmöntuotannon suoraan auton sisätilojen lämmitykseen, kun täyssähköautojen on otettava lämmitysenergia suoraan akustolta heikentäen samalla auton toimintamatkaa.

Yksi suurimmista eroista vedyllä tankattavan polttokennohenkilöauton ja ladattavan sähköauton välillä on auton toimintamatkan lisäämisessä. Vetysäiliöiden tankkausprosessi on lähestulkoon verrattavissa nykyisten polttomoottorien tankkaamiseen sen viedessä aikaa muutaman minuutin. Täyssähköautojen lataukset ovat suoraan verrannollisia lataustehoon, mutta käyttäen puolituntia 50 kW:n pika- tai teholatausasemaa, auton akustot latautuvat akustojen kapasiteetistä riippuen 25–50 % lisäten toimintamatkaa tyypillisesti 100–200 km. Lisäksi akustojen sähkövirran vastaanottokyky heikkenee merkittävästi ladatessa akustoa kylmissä olosuhteissa, kun taas vetykaasun tankkaamisessa lämpötilalla ei ole vastaavaa merkitystä. Ladattavien sähköautojen voimakas volyymin kasvu on myös heikentänyt julkisten latausasemien määrää suhteessa sähköautojen määrään tämän aiheuttaessa ruuhkia- ja jonottamista latausasemille. Tämä tulee hei-

kentämään sähköautoilun käytännöllisyyttä ja toisaalta lisäämään kuluttajien kysyntää nopeasti tankattaville vetypolttokenno-henkilöautoille niiden tankkausinfrastruktuurin parantuessa. On myös huomioitava, että sähköajoneuvojen ajokustot kuluvat, eivätkä suurella todennäköisyydellä kestä ajoneuvojen koko elinkaarta. Akustot maksavat kymmeniätuhansia euroja, joten niiden vaihtaminen tulee kalliiksi autojen omistajille. Maapallon ja sitä uhkaavan ilmastonmuutoksen kannalta on huomioitava myös autojen valmistuksesta aiheutuvat kokonaispäästöt. Sähköautojen suurien akustojen valmistus ja kierrättäminen aiheuttavat suuremman kokonaispäästökertymän verrattuna huomattavasti pienemmällä akkukapasiteetilla toimiviin vetypolttokenno-henkilöautoihin.

Molempien energiamuotojen, sähkön sekä vedyn siirtäminen ja varastointi aiheuttavat haasteita. Sähköä voidaan varastoida akustoihin ja pattereihin, mutta siirtäminen kaapeleiden välityksellä aiheuttaa aina energiahäviöitä ja vaatii hyvät siirtoyhteydet. Myös akuissa ja pattereissa tapahtuu jatkuvaa sisäistä sähkövirranpurkautumista, eivätkä ne näin ollen ole energiataloudellisesti ajateltuina tehokkaita keinoja varastoida suuria määriä energiaa pitkiä aikoja. Litiumakustojen energiatiheys on huomattavasti vetyä pienempi, joten suuria energiamääriä säilittäessä akustot ovat myös erittäin painavia sekä vaativat paljon kuljetustilaa. Ollessa sähkön ylitarjontaa voidaan sähköä rajatussa aikataulussa varastoida myös kondensaattoreihin, mutta aiheuttaa se usein hetkellistä sähkönhintojen laskua. Optimaalisessa tilanteessa sähköä tuotettaisiinkin juuri sen verran, että tuotettu sähkö voitaisiin valjastaa suoraan käyttöön.

Vedyn varastoiminen on hankalaa johtuen sen kemiallisista ominaisuuksista ja se onkin yksi suurimmista kysymysmerkeistä koko vetytalouden kehityksessä. Suurien määrien varastoimiselle etsitään jatkuvasti järkeviä tapoja, jotta se olisi turvallista sekä energiataloudellista. Esimerkiksi maaperän kallioissa olevat suo-laesiintymät tai -ontelot tarjoavat mahdollisuuksia tähän erilaisten putkilinjastojen kanssa. Vedyn varastoiminen vaatii erittäin tiheät ja läpäisemättömät säiliöt, jotka kestävät voimakkaan paineen sekä ulkoiset iskut estäen vedyn haihtumisen. Materiaalit ovat valittava tarkasti, koska vetyatomit voivat tunkeutua jopa kiinteään metalliin. Säiliöt ovatkin kustannuksiltaan kalliita, johtuen niihin käytettävistä metalli, hiilikuitu- ja muovikomposiitti materiaaleista. Alhaisen tiheydensä vuoksi vedyn paineistaminen, saati nesteyttäminen aiheuttavat aina suhteellisen suuria

energiahäviöitä. Kaasun edullisempaa siirtämistä varten on paikoin olemassa jo valmiita putkilinjastoja, mutta vetyä voidaan siirrellä myös kustannuksiltaan kalliimmin kuorma-autoilla tai laivoilla. Vedyn varastoinnissa riittävä tuuletus ja paloturvallisuuteen liittyvät asiat ovat huomioitava erityisellä tarkkuudella sen ollessa tulipalotilanteessa räjähdysherkkä polttoaine.

Hankintakustannuksiltaan vetypolttokennolla toimivat ajoneuvot ovat alhaisten tuotantomäärien vuoksi vielä varsin kalliita. Verrattuna täyssähköautoihin hinnat ovat keskimääräisesti tarkasteltuna keskitasoa tai hieman jopa kalliimpia. Hintoihin on kuitenkin odotettavissa laskua, kunnes kehittyvän tankkausverkoston myötä myös ajoneuvojen tuotantomäärät kasvavat ja tuotantoprosesseja voidaan tehostaa. Vetypolttokennolla toimivan ajoneuvon käyttökustannukset vaihtelevat suuresti riippuen maakohtaisista energiahinnoista. Vetykaasu ei esiinny vapaana kaasuna ilmakehässä, joten sen valmistamiseen kuluu energiaa. Esimerkiksi Saksassa yksi kilo vetykaasua maksaa noin 9,5 € ja Ruotsissa vastaava on 3,5–7,5 € / kg. Toyota Mirain tankkaus täyteen eli 5,6 kg vetykaasua kustantaisi noin 20–53 €, jolla auton toimintamatka olisi jopa 650 km. Näin ollen kustannus sataa kilometriä kohden olisi 3–8 € väliltä. Fossiilisten polttoaineiden hintojen noustessa sekä puolestaan vetykaasun hinnan laskiessa, vetyautoilun polttoainekustannukset tulevat olemaan entistä kilpailukykyisemmät kuluttajan näkökulmasta. Sähköautoiluun verrattuna hinnat ovat kuitenkin vielä toistaiseksi korkeat, sähköautoilun energian maksaessa kahdesta neljään euroon sadalta kilometriltä.

8.5 Vedyn tuotannon kehittäminen

Maapallolla vety on ehtymätön luonnonvara, joka on sitoutuneena veteen, jäähän, happoihin ja orgaanisiin yhdisteisiin. Näin ollen vety alkuaineena tarjoaa käytännössä rajattomat mahdollisuudet sen käyttöön myös tieliikenteessä. Kuten aiemmin mainittua, keveytensä vuoksi vetyä ei esiinny ollenkaan vapaana kaasuna, joten energiaksi hyödynnettävää vetyä täytyy valmistaa eri menetelmin. Tällä hetkellä yleisimmät tavat tuottaa vetyä ovat höyryreformointi sekä sähkökemiallinen elektrolyysi, joiden käyttöasteet vedyn tuotannossa eroavat vielä merkittävästi toisistaan. Energy Efficiency:n ja Renewable Energy:n (n.d) mukaan

8.6 Vetyautoilun suurimmat haasteet ja ongelmat

Euroopassa, Pohjois-Amerikassa sekä Aasiassa vetyautoilun suhteen on olemassa kattavat suunnitelmat vedyn jakeluverkostojen laajentamiseksi ja infrastruktuurin parantuessa vety tarjoaa hyvät mahdollisuudet puhtaaseen liikennöintiin myös globaalisti. Vetyteknologian yleistymistä tieliikenteessä täytyy kuitenkin vielä maailmanlaajuisesti odottaa, koska vetytekniikan kehitys on hyvällä tasolla vasta Japanissa ja Yhdysvaltojen Kaliforniassa. Uuden vety infrastruktuurin luominen sekä kattava laajentaminen ottavat aikaa ja tämänhetkiset panostukset uusiutuvan sähköenergian luomiseen antavat edellytykset myös vetytalouden kehitykselle. Uusiutuvan sähkön tuotantokapasiteetin ylittäessä sen kulutuksen, voidaan sähköntuotantoa ohjata vedyn valmistukseen. Kehittäessä elektrolyysiprosessien tehokkuutta, voidaan vedyn valmistusta tehostaa entisestään. Tämä puolestaan laittaa liikkeelle energiayhtiöiden panostamisen valtioiden vety infrastruktuuriin, jolloin myös vetykaasun tankkausverkostoa kasvatetaan merkittävästi. Riittävän kattava tankkausverkosto lisää myös kuluttajien kiinnostusta vetyhenkilöautoiluun, jolloin auton toimintamatkan lisääminen onnistuu vaivattomasti. Tällä hetkellä vielä monet ajoneuvovalmistajat odottavat vetyhenkilöautoilun tuloa ajankohtaisemmaksi, eivätkä täten uskalla panostaa vetyautojen tuotantoon suuresti.

Kunnes vedyn tuotanto tehostuu ja sen toistaiseksi hankalalle varastoinnille löydetään tehokkaita- ja turvallisia ratkaisuja, vetyhenkilöautoilu tulee olemaan osa maailmanlaajuisista henkilöautoliikennettä. Vaikka sähköautot ovatkin ajotilanteissa huomattavasti vedyllä toimivia polttokennoautoja energiatehokkaampia, riittävän tehokkaalla uusiutuvan sähkön tuotannolla myös vetykaasun riittävyys voidaan varmistaa. Uusiutuvalla energialla tuotettu vety on ilmaston kannalta puhdas ja ehtymätön luonnonvara, jolloin sähkön tuotantokapasiteetin ollessa riittävän suuri, myöskään tuotannossa aiheutuvilla energiahäviöillä ei ole isoa merkitystä. Ajoneuvojen hankinta- ja käyttökustannukset ovat toistaiseksi vielä suuret, mutta autojen valmistuskustannusten- sekä puhtaan vedyn tuotantokustannusten laskiessa, kysyntä vetyhenkilöautoilua kohtaan kasvaa. Ajoneuvojen turvallisuutta epäilevien luottamus kohentuu vasta ajoneuvojen ilmestyessä tieliikenteeseen, jolloin alkaa muodostua yleiskuva autojen käyttäytymisestä onnetto-

muustilanteissa. Jos autot onnistuvat vakuuttamaan ihmiset turvallisuudessa, vetyautoilulla on mahdollisuus saavuttaa merkittävä asema henkilöautoliikenteessä.

Työn ollessa pitkälti tulevaisuutta tarkasteleva tutkielma vetyautoilun mahdollisuuksiin liittyen, työtä varten hankittava aineisto kasaantui lähes täysin internetistä. Työssä käsiteltävään vetyyn ja polttokennojen toimintaan liittyvää konkreettista on esimerkiksi Suomessa vielä hankala demonstroida, koska yksinkertaisesti Suomessa ei ole saatavilla vetypolttokennoilla toimivia henkilöautoja, eikä täällä ole ainuttakaan julkista vedyn tankkausasemaa. Vetyyn liittyvää teollisuuden osaamista Suomesta kyllä löytyy, mutta tämä olisi vaatinut maansisäistä matkustamista, eikä vierailun edustaja olisi todennäköisesti ollut ajoneuvotekniikan asiantuntija. Vierailu esimerkiksi vetypolttokennoilla varustettujen henkilöautojen murrokseen uskovien merkkiedustuksien, kuten Toyotan- tai Hyundain maahantuontiin, olisi voinut antaa jotain lisäarvoa ja näkemystä työn sisältöön. On kuitenkin huomioitava, että vetypolttokennoilla toimivia ajoneuvoja on jo käytössä useissa maissa ulkomailla ja aiheesta löytyy valtava määrä kaikkien saatavissa olevaa tietoa Englannin kielisiä lähteitä käyttäen. Näin ollen Suomalaisten maahantuontien teknisten insinöörien käytännön kokemukset ovat varmasti vielä puutteelliset ja tiedon saatavuus on rajoittunut heilläkin pitkälti teoriassa opiskeltuun tietoon.

Työ antaa hyvän yleiskuvan vetypolttokenno henkilöautoiluun liittyen ja se on kohdennettu kaikille vety- tai ajoneuvotekniikasta kiinnostuneille. Teksti on pitkälti ymmärrettävää myös ilman aiheeseen liittyvien erityisterminologioiden tunteudesta, koska tekstissä ei ole käytetty juurikaan erityissanastoa ja hankalimmat sanat on pyritty selventämään. Työstä olisi mahdollista tehdä useita eri jatkotutkimuksia vetypolttokenno-henkilöautojen yleistymisen ollessa vasta käynnissä. Syventyminen voisi kohdistua esimerkiksi suurimpiin vetyhenkilöautoilun ongelmakohtiin, kuten energiantuotannon, vedyntuotannon tai infrastruktuurinkehitykseen. Yksi mielenkiintoinen ja tärkeä tutkimusaihe koko vetytaloudelle olisi myös vedyn varastointi, johon yritetään etsiä järkeviä ratkaisuja.

8.7 Lähteiden luotettavuuden arviointi

Opinnäytetyö on tulevaisuuden voimanlähteeseen perehtyvä tutkielma, jonka tiedonhankinta pohjautuu lähes täysin lähdetietoon. Tietoa on kerätty pääsääntöisesti kansainvälisistä- sekä kotimaisista internetlähteistä ja lähteinä on pyritty käyttämään primäärlähteitä. Lähdeaineisto on kattava ja lähteiden luotettavuus sekä tiedon oikeellisuus on pyritty varmistamaan vertailemalla useissa eri lähteissä olevien tietojen yhdenmukaisuutta keskenään. Lisäksi kirjoittajien tai tekijöiden taustat sekä ammatillinen kompetenssi eli asiantuntevuus- ja pätevyys aiheetta kohtaan on mahdollisuuksien mukaan tarkistettu. Työssä käytettäviksi lähteiksi ovat ensisijaisesti valikoituneet lähteet, joilla on käytössä tehokkaat ja objektiiviset faktantarkistus menetelmät ja tekstien laatijoiden taustat tuodaan näkyvästi ilmi. Työssä on käytetty myös eri valtioiden alaisen tutkimuslaitosten lähdeaineistoa, jotka ovat dokumentoineet asiat yksityiskohtaisesti ja tarkasti parantaen lähdeaineiston luotettavuutta. Ajoneuvovalmistajien lähdemateriaaleihin on suhtauduttu mahdollisimman objektiivisesti ymmärtäen sen, että heidän tarkoituksenaan on asioiden markkinointi kuluttajille. Aiheen ollessa voimakkaan kehityksen alaisuudessa, on aineistoksi pyritty valitsemaan mahdollisimman ajankohdasta ja tuoretta tietoa.

LÄHTEET

Ahtiainen, L. 2018. Mercedes-Benz GLC F-Cell. Julkaistu 14.10.2018. Luettu 20.5.2022. <https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/maistainen-mercedes-benz-glc-f-cell-miksi-ladattavassa-vetyhybridissa-on-paljon-jarkea/>

Allan, M. 2021. How much do hydrogen cars cost to run? Julkaistu 15.6.2021. Luettu 14.3.2022. <https://www.nationalworld.com/lifestyle/cars/everything-you-need-to-know-about-hydrogen-cars-3272802>

Augustyn, Adam. n.d. Deuterium. Luettu 31.1.2022. <https://www.britannica.com/science/deuterium>

BMW UK. 2022. Step inside the new BMW iX5 hydrogen. Luettu 7.3.2022. <https://discover.bmw.co.uk/article/step-inside-the-new-bmw-ix5-hydrogen>

Britannica. n.d. Development of fuel cells. Luettu 17.1.2022. <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell/Development-of-fuel-cells#ref51262>

Britannica. n.d. Electrolysis. Luettu 28.3.2022. <https://www.britannica.com/science/electrolysis>

Britannica. n.d. Electron affinity. Luettu 28.2.2022. <https://www.britannica.com/science/electron-affinity>

Burt, M. 2020. New Mirai hydrogen fuel cell electric vehicle – under the skin. Julkaistu 30.11.2020. Luettu 24.3.2022. <https://mag.toyota.co.uk/new-mirai-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicle/>

Businesswire. 2021. Global Market for Hydrogen Fueling Stations, 2021. Luettu 1.4.2022. <https://www.businesswire.com/news/home/20210308005510/en/Global-Market-for-Hydrogen-Fueling-Stations-2021---Distribution-of-Stations-Will-Be-More-Even-by-2035-but-APAC-Will-Continue-to-Lead-the-Market-Followed-by-Europe---ResearchAndMarkets.com>

CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP. 2022. FCEV Sales, FCEB, & Hydrogen Station Data. Luettu 21.3.2022. https://cafcp.org/by_the_numbers

Cassir, M. & Lair, V. 2013. Handbook of Membrane Reactors. Cambridge: Woodhead Publishing.

Chem Purdue. n.d. Hydrogen Bonding. Luettu 12.3.2022. <https://www.chem.purdue.edu/gchelp/liquids/hbond.html>

Chemistry Channel. 2018. Hydrogen molecule. Julkaistu 25.9.2018. Katsottu 24.1.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=UY8z4csyHxk>

Chemistry Libretexts™. 2020. Ionization Energies of Diatomic Molecule. Luettu 21.2.2022. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Atomic_Theory/Ionization_Energies_of_Diatomic_Molecule](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Atomic_Theory/Ionization_Energies_of_Diatomic_Molecule)

Chemistry Libretexts™. n.d. Electron Affinity. Luettu 28.2.2022. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Introductory_Chemistry_\(CK-12\)/06%3A_The_Periodic_Table/6.18%3A_Electron_Affinity](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Introductory_Chemistry_(CK-12)/06%3A_The_Periodic_Table/6.18%3A_Electron_Affinity)

Clifford, J. 2018. How to refuel a hydrogen car. Julkaistu 22.2.2018. Luettu 31.1.2022. <https://mag.toyota.co.uk/how-to-refuel-a-hydrogen-car/>

Cornaert, J. 2015. Hydrogen? Is that safe? Julkaistu 5.9.2015. Luettu 31.1.2022. <https://blog.toyota.eu/safety/hydrogen-is-that-safe/>

Eberhard, Röhms-Malcotti. 2021. EU hydrogen strategy. Julkaistu 15.4.2021. Luettu 22.3.2022. <https://www.axpo.com/lu/en/about-us/magazine.detail.html/magazine/renewable-energy/eu-hydrogen-strategy.html>

Edmunds. n.d. 2022 Hyundai Nexo. Luettu 29.4.2022. <https://www.edmunds.com/hyundai/nexo/2022/>

Edmunds. n.d. 2022 Toyota Mirai. Luettu 29.4.2022. <https://www.edmunds.com/toyota/mirai/>

Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d. Fuel Cell Electric Vehicles. Luettu 31.1.2022. https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html

Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d. Hydrogen Production: Electrolysis. Luettu 28.3.2022. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>

Energy Efficiency & Renewable Energy. n.d. Types of Fuel Cells. Luettu 7.2.2022. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>

FCHEA. n.d. Fuel Cell Basics. Luettu 31.1.2022. <https://www.fchea.org/fuelcells>

FCHEA. n.d. Hydrogen Production from Biomass and Organic Waste. Luettu 11.4.2022. <https://www.fchea.org/in-transition/2019/7/8/hydrogen-production-from-biomass-and-organic-waste>

Frankmarkus. 2016. 1966 GM Electrovan Fuel Cell Prototype turns 50. Julkaistu 1.12.2016. Luettu 17.1.2022. <https://www.motortrend.com/news/1966-gm-electrovan-fuel-cell-prototype-turns-50/>

Fuel Cells. n.d. Fuel Cell Story. Luettu 17.1.2022. <http://www.hydrogenbatteries.org/FuelCells.htm>

Fuelcellstore 2017. History of Fuel Cells. Julkaistu 23.1.2017 Luettu 17.1.2022. <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/history-of-fuel-cells>

FuelCellToday. n.d. Origins. Luettu 17.1.2022. <http://www.fuelcelltoday.com/history>

Fuelcelltoday. n.d. PEMFC. Luettu 21.2.2022. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>

Fuelcelltoday. n.d. SOFC. Luettu 7.2.2022. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/sofc>

FuelCellToday. n.d. The Space Programme. Luettu 17.1.2022. <http://www.fuelcelltoday.com/history>

fuelcellworks. n.d. The Nineties. Luettu 24.1.2022. <https://fuelcellworks.com/knowledge/history/>

Fw:Thinking. 2015. How Fuel Cell Vehicles Work – CES 2015. Julkaistu 7.1.2015. Katsottu 9.4.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=tajigZ2e6tQ>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in canada in March 2022. Luettu 21.3.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-canada.html#>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in france in March 2022. Luettu 21.3.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-france.html>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in germany in March 2022. Luettu 21.3.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-germany.html>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in japan in March 2022. Luettu 31.3.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-germany.html>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in south-korea in April 2022. Luettu 1.4.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-south-korea.html>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in UK United Kingdom in March 2022. Luettu 21.3.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-united-kingdom.html>

glpautogas.info. 2022. Hydrogen Stations in USA in April 2022. Luettu 1.4.2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations-united-states.html>

Green Car Congress. 2008. Honda Planning on Leasing 200 FCX Clarity Fuel Cell Vehicles in First Three Years. Julkaistu 21.5.2008. Luettu 24.1.2022. <https://www.greencarcongress.com/2008/05/honda-planning.html>

H2Stations. 2022. Hydrogen refuelling stations worldwide. Luettu 21.3.2022. <https://www.h2stations.org>

Helmenstine, Anne Marie. 2019. Ionization Energy Definition and Trend. Julkaistu 3.7.2019. Luettu 21.2.2022. <https://www.thoughtco.com/ionization-energy-and-trend-604538>

Helmenstine, Anne Marie. 2020. What Is Electronegativity and How Does It Work? Luettu 28.2.2022. <https://www.thoughtco.com/definition-of-electronegativity-604347>

HydrogenCentral. 2021. Japan Targets 1,000 Hydrogen Stations By End Of Decade. Luettu 4.4.2022. <https://hydrogen-central.com/japan-1000-hydrogen-stations/>

- Hyundai. 2018. All-New Hyundai NEXO – Driving performance. Julkaistu 9.7.2018. Luettu 13.3.2022. <https://www.hyundai.news/eu/models/electric/nexo/press-kit/all-new-hyundai-nexo-driving-performance.html>
- Hyundai. n.d. Hyundai Nexo. Luettu 21.3.2022. <https://www.hyundai.fi/malisto/nexo/>
- Hyundai. n.d. Vetyauto on osa tulevaisuuden liikkumista. Luettu 22.3.2022. <https://www.hyundai.fi/vety/>
- Hyundaiusa. 2022. Premium Remote Smart Parking Assist. Luettu 21.3.2022. <https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/nexo>
- IEA 2.3.2021. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020. Luettu 10.1.2022 <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>
- IEA fuelcell. n.d. Hydrogen storage. Luettu 24.1.2022. <https://www.ieafuelcell.com/index.php?id=33>
- Innovation newswork. 2020. Will 2020 be the decade of hydrogen and the fuel cell? Julkaistu 2.3.2020. Luettu 24.1.2022. <https://www.innovationnewsnetwork.com/will-2020-be-the-decade-of-hydrogen-and-the-fuel-cell/3740/>
- Johnson, M. 2022. Steam Reforming Catalysts. Luettu 4.4.2022. <https://matt-hey.com/en/products-and-services/chemical-processes/chemical-catalysts/steam-reforming-catalysts>
- Joi Scientific. 2016. Five intriguing facts about mighty hydrogen. Julkaistu 14.6.2016. Luettu 17.1.2022. <https://www.joiscientific.com/five-intriguing-facts-mighty-hydrogen/>
- Kane, M. 2016. With 9 Hydrogen Fuel Stations Denmark Is 1st Country with Basic National Network. Julkaistu 14.3.2016. Luettu 28.3.2022. <https://insideevs.com/news/328879/with-9-hydrogen-fuel-stations-denmark-is-1st-country-with-basic-national-network/>
- Kane, M. 2018. Mercedes-Benz Delivers First GLC F-Cell Plug-In Hybrid. Julkaistu 13.11.2018. Luettu 11.4.2022. <https://insideevs.com/news/341188/mercedes-benz-delivers-first-glc-f-cell-plug-in-hybrid/>
- Kantola, K. n.d. Hydrogen fuel tanks. Luettu 24.1.2022. <https://www.hydrogen-carsnow.com/index.php/hydrogen-fuel-tanks/>
- KPMG. n.d. The hydrogen trajectory. Luettu 14.4.2022. <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/11/the-hydrogen-trajectory.html>
- Molloy, P. 2019. Run on Less with Hydrogen Fuel Cells. Julkaistu 2.10.2019. Luettu 18.2.2022. <https://rmi.org/run-on-less-with-hydrogen-fuel-cells/>
- Nagwa. 2022. Definition of Hydrogen Molecules Bond Energy. Luettu 24.1.2022. <https://www.nagwa.com/en/videos/623187032684/>

National Geographic. n.d. Fuel Cells. Luettu 1.10.2022. <https://www.national-geographic.com/environment/article/fuel-cells>

Nicholson, T. 2020. Everything you need to know about hydrogen cars. Julkaistu 6.10.2020. Luettu 31.1.2022. <https://www.racv.com.au/roya-lauto/transport/cars/hydrogen-cars-explained.html>

Nuclear Power. 2022. Hydrogen – Electron Affinity – Electronegativity – Ionization Energy of Hydrogen. Julkaistu 26.11.2021. Luettu 28.2.2022. <https://www.nuclear-power.com/hydrogen-affinity-electronegativity-ionization/>

Office of the historian. n.d. Oil Embargo, 1973-1974. Luettu 24.1.2022. <https://history.state.gov/milestones/1969-1976/oil-embargo>

Ouellette, R & Rawn, D. 2015. Electronegativity. Luettu 28.2.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electronegativity/>

Parikh, S. 2022. BMW iX5 – Everything we know as of February 2022. Julkaistu 2.9.2022. Luettu 7.3.2022. <https://topelectricsuv.com/news/bmw/bmw-ix5-updates/>

Petrol Plaza. 2021. 584 hydrogen fueling stations launched in 33 countries. Luettu 4.4.2022. <https://www.petrolplaza.com/news/26506>

Plaza, P. 2020. Plans unveiled to deploy 1,500 hydrogen stations in Europe by 2030. Luettu 4.4.2022. <https://www.petrolplaza.com/news/26059>

Pr Newswire. 2022. China Hydrogen Manufacturing and Hydrogen Refueling Station Markets Research Report 2021: It is Expected that 1,000 Stations will be Built by 2030. Luettu 4.4.2022. <https://www.prnewswire.com/news-releases/china-hydrogen-manufacturing-and-hydrogen-refueling-station-markets-research-report-2021-it-is-expected-that-1-000-stations-will-be-built-by-2030--301474700.html>

Professor Dave Explains. 2015. The Periodic Table: Atomic Radius, Ionization Energy, and Electronegativity. Julkaistu 3.9.2015. Katsottu 21.2.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=hePb00CqvP0>

Real Engineering. n.d. The Truth about Hydrogen. Katsottu 1.5.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=f7MzFfuNOTY>

Roberts, G. 2022. Hyundai Australia plans new Sydney hydrogen refuel station. Luettu 4.4.2022. <https://www.just-auto.com/news/hyundai-australia-plans-new-sydney-hydrogen-refuel-station/>

Schumm, B. n.d. Principles of operation. Luettu 7.2.2022. <https://www.britanica.com/technology/fuel-cell>

Sciencedirect 2022. Hydrogen Bonds. Luettu 12.3.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/hydrogen-bonds>

Sciencedirect. 2022. Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Luettu 21.2.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proton-exchange-membrane-fuel-cell>

Seeker. 2015. Where Does Hydrogen Come From? Katsottu 7.3.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=Jro6uEaWfTg>

SFC energy. 2022. Steam reforming. Luettu 4.4.2022. <https://www.sfc.com/en/glossar/steam-reforming/>

Sheehy Toyota of Laurel. 2021. 2021 Toyota Mirai Fuel-Cell Performance Features and Specs. Julkaistu 9.6.2021. Luettu 14.3.2022. <https://www.sheehytoyotalaurel.com/blog/what-powers-the-2021-toyota-mirai/>

Statista. 2018. Distribution of greenhouse gas emissions worldwide in 2018, by sector. Julkaistu 25.1.2022. Luettu 22.4.2022. <https://www.statista.com/statistics/241756/proportion-of-energy-in-global-greenhouse-gas-emissions/>

Statista. 2019. Number of hydrogen fuel stations by type in the United States in 2019, with a forecast until 2030. Luettu 4.4.2022. <https://www.statista.com/statistics/1179571/us-number-of-hydrogen-fuel-stations/>

Statista 2020. Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2020, by subsector. Luettu 25.4.2022. Julkaistu 14.12.2021. <https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/>

Statista. 2022. Transportation emissions worldwide - statistics & facts. Julkaistu 22.2.2022. Luettu 22.4.2022. <https://www.statista.com/topics/7476/transportation-emissions-worldwide/#dossierKeyfigures>

Stile Education. 2020. Trends in the Periodic Table — Reactivity! Julkaistu 10.11.2020. Katsottu 21.2.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=Q4rW0fvkt2g>

The Local. 2022. Germany to triple number of hydrogen fuel stations. Luettu 4.4.2022. <https://www.thelocal.de/20220329/germany-to-triple-number-of-hydrogen-fuel-stations/>

Thermopedia. 2011. Hydrogen. Luettu 7.3.2022. <https://www.thermopedia.com/content/864/>

ThoughtCo. n.d. What Causes Hydrogen Bonding? Luettu 7.2.2022. <https://www.thoughtco.com/what-causes-hydrogen-bonding-603991>

Tilanterä, A. 2016. Sähköenergian varastointi vetynä ja metaanina. Julkaistu 24.1.2016. Luettu 18.4.2022. <https://maanystavat.fi/blogit/sahkoenergian-varastointi-vetyna-ja-metaanina>

Tisshaw, M. 2021. BMW iX5 Hydrogen paves way for family of FCEV models. Julkaistu 7.9.2021. Luettu 7.3.2022. <https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/bmw-ix5-hydrogen-paves-way-family-fcev-models>

Toyota Auto Finland Oy. 2022. VETYAUTOILU Toyota - Beyond Zero. Luettu 15.3.2022. <https://www.toyota.fi/toyota/beyond-zero/vetyautoilu.json>

Toyota Europe Newsroom. 2021. The New Toyota Mirai. Julkaistu 3.3.2021. Luettu 14.3.2022. <https://newsroom.toyota.eu/the-new-toyota-mirai/>

Trestiakova-MCnally, S. n.d. LECTURE – Safety of hydrogen storage. Luettu 31.1.2022. http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Safety_of_hydrogen_storage_notes.pdf

U.S. Department of Energy. n.d. Hydrogen Production: Biomass Gasification. Luettu 6.4.2022. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>

Wand, G. 2017. Oil crisis' effect on hydrogen & fuel cell history. Julkaistu 4.3.2017. Luettu 24.1.2022. <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/history/oil-crisis-effect-on-hydrogen-fuel-cell-history/>

Wilkinson, S. 2021. Hydrogen fuel cells: do hydrogen cars have a future? Julkaistu 2.12.2021. Luettu 10.1.2022 <https://www.autoexpress.co.uk/electric-cars/93180/hydrogen-fuel-cells-do-hydrogen-cars-have-future>

Wilkinson, S. 2022. Hydrogen fuel cells: do hydrogen cars have future? Julkaistu 31.2.2022. Luettu 14.3.2022. <https://www.autoexpress.co.uk/electric-cars/93180/hydrogen-fuel-cells-do-hydrogen-cars-have-future>

William, Lee Jolly. 2022. Hydrogen – Chemical element. Luettu 17.1.2022. <https://www.britannica.com/science/hydrogen>

William, Lee Jolly. n.d. Reactivity of hydrogen. Luettu 7.3.2022. <https://www.britannica.com/science/hydrogen/Reactivity-of-hydrogen>

Woikoski. 2022. Woikoski vihreän vedyn edelläkävijänä. Luettu 28.3.2022. <https://www.woikoski.fi/woikoski/vedyn-edellakavija.html>

Yuksel, A. 2020. How does a solid oxide fuel cell work? Julkaistu 1.5.2020. Luettu 7.2.2022. <https://www.cummins.com/news/2020/05/01/energy-iq-what-solid-oxide-fuel-cell-and-how-fuel-cells-work>