



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MATTI NISSILÄ

POLTTOKENNOAJONEUVOJEN TARVITSEMAN VEDYN JAKELU
JA TANKKAUS

Diplomityö

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 9. toukokuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

NISSILÄ, MATTI: Polttokennoajoneuvojen tarvitseman vedyn jakelu ja tankkaus

Diplomityö, 86 sivua, - liitesivua

Elokuu 2012

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Vetytalous, vedyn energiakäyttö, polttokenno, vedyn tankkaus

Kansainvälisten ennusteiden mukaisesti maailman energiankulutus jatkaa kasvuaan ja fossiiliset energialähteet ovat merkittävässä roolissa vielä pitkään, vaikka niiden käyttöön tiedetään liittyvän vakavia ympäristöhaittoja. Liikenne on lähes täysin riippuvainen öljystä jalostetuista polttoaineista ja liikenteen osuus ilmakehää lämmittävistä hiilidioksidipäästöistä on noin neljännes. Perinteisten liikennepolttoaineiden aiheuttamat ympäristöhaitat sekä öljyvarojen ehtymisestä aiheutuva hinnan nousu ja öljyn saatavuuden vaikeutuminen pitkällä aikavälillä ovat kannustimia vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden ja -energioiden kehittämiseksi ja käyttöönnotolle.

Tässä työssä tarkastellaan edellytyksiä vetyä käyttävien polttokennoajoneuvojen yleistymiselle. Vetyä pidetään yhtenä tulevaisuuden lupaavimmista energialähteistä ympäristön ja energian saannin varmistamisen kannalta. Vedyn kiistattomia etuja ovat monipuoliset tuotantomahdollisuudet, mahdollisuus energian varastointiin vedyn muodossa sekä mahdollisuus toteuttaa kestävä kehitys mukainen energiajärjestelmä. Vedyn energia- ja liikennekäytön yleistymiseen vaikuttavat niin tekniset ja taloudelliset seikat kuin ihmisten asenteet. Yleistymisen voi tapahtua ainoastaan useiden alojen toimijoiden järjestelmällisen yhteistyön tuloksena.

Tärkeä ehto vedyn laajamittaiselle käytölle liikenteen polttoaineena on mahdollisuus tuottaa vetyä ympäristön kannalta kestäväällä tavalla. Vedyn valmistusmahdollisuudet ovat hyvin joustavat, sillä vetyä voidaan valmistaa monista raaka-aineista kuten erilaisista hiilivedyistä ja vedestä. Vedyn valmistukseen käytetyn raaka-aineen lisäksi valmistukseen käytettävän energian alkuperä määrittelee suurelta osin vedyn ympäristöystävällisyyden ja päästöttömyyden. Tietyissä teollisuuden prosesseissa vetyä syntyy sivutuotteena, jota voidaan myös hyödyntää.

Vedyn energiakäytön suurimmat edut saavutetaan polttokennojen avulla. Polttokennoissa vedyn sisältämä kemiallinen energia saadaan hyvällä hyötysuhteella muutettua suoraan sähköksi, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi ajoneuvojen sähkömoottoreissa. Monet suurista kansainvälisistä autonvalmistajista ovat kehittäneet polttokennoajoneuvoja ja ovat myös sitoutuneet saattamaan ne markkinoille.

Polttokennoajoneuvojen yleistymisen kannalta merkittävä tekijä on myös vedyn jakeluverkoston luominen. Ilman riittävän laajaa tankkausasemien verkostoa ei vetykäyttöisen polttokennoajoneuvon hankkimien ole järkevää, mutta ilman ajoneuvoja ei myöskään tankkausasemien rakentaminen ole houkuttelevaa. Käsitys vetyä käyttävien ajoneuvojen turvallisuudesta vaikuttaa voimakkaasti ihmisten päätöksentekoon heidän pohtiessaan polttokennoajoneuvon hankintaa. Polttokennoajoneuvojen ja vedyn jakeluinfrastruktuurin turvallisuuden varmistaminen on teknisten ja taloudellisten seikkojen ohella tekijä, jolla on merkitystä polttokennoajoneuvojen yleistymiseen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

NISSILÄ, MATTI: Hydrogen Distribution and Refueling for Fuel Cell Vehicles

Master of Science Thesis, 86 pages, - appendix pages

August 2012

Major: Modern Electric Engineering Technology

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: Hydrogen economy, energy use of hydrogen, fuel cell, hydrogen fueling

Regarding to international forecasts world's energy consumption keeps on growing. Energy is produced with fossil energy sources although it is widely known that there is link between using fossil energy sources and serious environmental problems. Transport sector uses almost only oil-based fuels and it produces one fourth of world's climate warming carbon dioxide emissions. Environmental problems caused by traditional fuels, oil price and its availability are reasons for developing and introducing alternative fuels.

This Master of Science Thesis studies the requirements for using hydrogen fuel cell vehicles. Hydrogen is considered as one of the most promising energy sources in the environmental and energy safety point of view. Wide range of production opportunities, possibility to store energy in form of hydrogen and opportunity to create sustainable energy system are undeniable advantages of hydrogen. Utilization of hydrogen in energy and transport sectors is affected by technical and economical questions, and also people's attitudes play very important role. Increasing use of hydrogen as energy source is a consequence of collaboration in different fields.

An important prerequisite for large-scale use of hydrogen as transport fuel is possibility to produce it in sustainable way. Hydrogen production is very flexible because hydrogen can be produced from variety of raw materials for example from hydrocarbons or water. The origin of energy used in hydrogen production plays also very important role in eco-friendliness of produced hydrogen. In some industrial processes hydrogen is produced as by-product, which can also be exploited.

The greatest advantages of using hydrogen as an energy source can be achieved with fuel cells. In fuel cells chemical energy of hydrogen can be converted to electricity with good efficiency. Electricity can be used for example in electric motors of vehicles. Many big international car manufactures have developed fuel cell vehicles and are also committed to bring them to the market in the near future.

Hydrogen distribution network is necessary for widespread propagation of fuel cell vehicles. Without sufficiently wide network of hydrogen filling stations it is not wise to buy fuel cell vehicles, but in the other hand it is not attractive to make station network wide without fuel cell vehicles using it. The perception of safety of hydrogen vehicles is important factor when possible buyer is making buying decision. Together with technical and economic factors safety of fuel cell vehicles and hydrogen distribution infrastructure is an important issue in ensuring the entry of fuel cell vehicles into markets.

ALKUSANAT

Liikkuvien polttokennosovellusten tarvitseman vedyn tuotantoa ja jakelua käsittelevän diplomityöni olen tehnyt yrityksessä, jolla on lähes sadan vuoden kokemus vedyn valmistuksesta. Oy Woikoski Ab aloitti vedyn tuotannon Voikoskella jo vuonna 1913. Diplomityöni yhteydessä olen saanut olla mukana projekteissa, joiden avulla Oy Woikoski Ab pyrkii osaltaan varautumaan vedyn energiakäytön lisääntymiseen. Projektit liittyvät vedyn tuotannon ja kuljetuksen sekä polttokennoajoneuvojen tarvitseman vetytankkausaseman kehittämiseen. Mahdollisuus osallistua haastavaan ja mielenkiintoiseen vedyn tankkausasemaprojektiin on antanut minulle paljon arvokasta tietoa vetyyn ja sen käyttöön liittyvistä teknisistä ratkaisuista ja kokemusta kehityshankkeiden toteuttamisesta. Tästä mahdollisuudesta tahdon kiittää Oy Woikoski Ab:ta ja sen teknistä johtajaa Kalevi Korjalaa.

Vaihtoehtoisten sähköenergiateknologioiden valintaa pääaineekseni olen aina pitänyt järkevänä ja hyvänä ratkaisuna johtuen aihepiirin mielenkiintoisuudesta ja sen ajan kohtaisuudesta. Pääaineeni kurssit ovat olleet innostavia, ja opetus on ollut aina hyvin järjestettyä. Tästä kiitän kaikkia kurssien järjestelyihin, luennointiin ja harjoitusten ohjaamiseen osallistuneita. Erityisesti kiitän diplomityöni ohjaajana ja tarkastajana toiminnutta lehtori Risto Mikkosta saamastani kannustavasta palautteesta ja hyvästä ohjauksesta.

Vanhempiani kiitän tuesta ja kannustuksesta, jota olen saanut opintojeni kaikissa vaiheissa. Pilville kuin myös muille läheisilleni ja ystävilleni esitän kiitokset heidän työtäni kohtaan osoittamastaan mielenkiinnosta, siihen liittyvistä ajatuksista ja keskusteluista.

Voikoskella, 20.6.2012

Matti Nissilä

SISÄLLYS

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Johdanto | 1 |
| 2. | Nykyinen energiajärjestelmä ja sen ongelmat | 4 |
| | 2.1. Fossiilisten polttoaineiden käytön ongelmat..... | 5 |
| | 2.2. Liikenne energiankäyttäjänä | 7 |
| 3. | Vaihtoehtoiset liikennepolttoaineet..... | 10 |
| | 3.1. Käyttöominaisuudet ja soveltuvuus ajoneuvoille | 11 |
| | 3.2. Vaihtoehtoisten polttoaineiden vertailu | 12 |
| 4. | Vety liikenteen energialähteenä..... | 16 |
| | 4.1. Miksi vety | 16 |
| | 4.2. Vedyn käyttö polttokennoissa..... | 18 |
| | 4.3. Polttokennon toimintaperiaate | 19 |
| | 4.4. Polttokennoauto | 23 |
| | 4.5. Edellytykset vetykäyttöisten polttokennoajoneuvojen yleistymiselle | 26 |
| 5. | Vedyn tuotanto ja kuljetus | 29 |
| | 5.1. Tuotantoprosessit | 29 |
| | 5.1.1. Vedyn valmistus maakaasusta | 31 |
| | 5.1.2. Vedyn valmistus raskasöljystä tai kivihilestä | 32 |
| | 5.1.3. Vedyn valmistus biomassan kaasutuksella | 33 |
| | 5.1.4. Vedyn valmistus veden elektrolyysillä | 34 |
| | 5.1.5. Vedyn muut valmistustavat..... | 35 |
| | 5.2. Teollisuuden ylimäärä- ja sivutuotevety | 36 |
| | 5.3. Vedyn varastointi ja kuljetus..... | 37 |
| | 5.4. Vedyn tuotannon ja kuljetuksen kustannustietoja..... | 41 |
| 6. | Vetytankkauksen turvallisuus, säädökset ja standardit..... | 44 |
| | 6.1. Vedyn aineominaisuudet..... | 44 |
| | 6.2. Tietoa vetytankkausasemien vaaratilanteista | 47 |
| | 6.3. Vetytankkausasemaa koskevia säädöksiä | 48 |
| | 6.3.1. Kemikaalisäädöksiä | 48 |
| | 6.3.2. Räjähdyksivaarallisia ilmaseoksia koskevia säädöksiä..... | 50 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.3.3. | Painelaitteita ja koneita koskevia säädöksiä | 51 |
| 6.3.4. | Pelastustoimen säädöksiä | 51 |
| 6.3.5. | Rakentamissäädöksiä | 52 |
| 6.4. | Standardeja ja ohjeita | 52 |
| 7. | Vedyn tankkaus | 56 |
| 7.1. | Vetytankkauksen vaihtoehdot | 56 |
| 7.1.1. | Vety kaasuna | 57 |
| 7.1.2. | Vety nesteenä | 60 |
| 7.2. | Eurooppalaisten vetytankkausasemien perusratkaisut | 62 |
| 7.3. | Vetytankkausasemia maailmalla | 63 |
| 8. | Vedyn tankkaukseen liittyvät hankkeet Suomessa | 66 |
| 8.1. | Rovaniemen Arctic Driving Centerin vetytankkausasema | 66 |
| 8.1.1. | Tankkausaseman teknisiä ja toiminnallisia tietoja | 67 |
| 8.1.2. | Tankkausaseman turvajärjestelyjä | 71 |
| 8.1.3. | Käyttökokemustietoja talvelta 2012 | 72 |
| 8.2. | Demo2013-hanke Vuosaaren satamassa | 73 |
| 9. | Yhteenveto | 75 |

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

| | |
|----------------------|--|
| AFC | Alkaline fuel cell eli alkalipolttokenno |
| ATEX | Atmosphères explosibles eli räjähdyskelpoiset ilmaseokset |
| CCS | Carbon capture and storage eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi |
| CHP | Combined heat and power eli sähkön ja lämmön yhteistuotanto |
| CO ₂ -ekv | Hiilidioksidiekvivalentti eli kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitta. Tietyn kasvihuonekaasun ilmastovaikutus muunnetaan vastaamaan hiilidioksidin ilmastovaikutusta globaalia lämmityspotentiaalia kuvaavan GWP-kertoimen avulla. |
| DMFC | Direct methanol fuel cell eli suorametanolipolttokenno |
| GWP | Global Warming Potential eli kasvihuonekaasun lämmityslämmitys-vaikutus massayksikköä kohti verrattuna hiilidioksidin lämmitysvai- kutukseen |
| HHV | Higher heating value eli ylempi lämpöarvo (kalorimetrinen lämpöar- vo) on lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun 1 kg polttoainetta palaat täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C:en lämpötilaan. |
| IEA | International Energy Agency eli OECD:n energiajärjestö |
| LCA | Life cycle analysis eli elinkaarianalyysi tarkoittaa menetelmää, jonka avulla arvioidaan tuotteen, prosessin tai toiminnon aiheuttamat ympä- ristövaikutukset sen koko elinkaaren aikana. |
| LHV | Lower heating value eli alempi lämpöarvo (tehollinen lämpöarvo) on se lämpöenergian määrä, joka vapautuu, kun sekä polttoaineen vesi että palamisessa muodostunut vesi ovat vesihöyrynä. |
| MCFC | Molten carbonate fuel cell eli sulakarbonaattipolttokenno |
| OECD | Organization for Economic Cooperation and Development eli Talou- dellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö |
| PAFC | Phosphoric acid fuel cell eli fosforihappopolttokenno |
| PEM, PEMFC | Proton exchange membrane fuel cell eli polymeeripolttokenno |
| SOFC | Solid oxide fuel cell eli kiinteäoksidipolttokenno |

| | |
|-----|--|
| toe | Tonnes of oil equivalent eli ekvivalentti öljytonni on eri energialähteiden yhteismitalliseksi muuntamisessa käytetty mitta-luku. Yksi toe vastaa lämpöarvoltaan yhtä tonnia raakaöljyä. |
| TTW | Tank to wheel -tarkastelussa kasvihuonekaasu- ja energiatarkastelut koskevat polttoaineen käyttöä ajoneuvossa (polttoainesäiliöstä vetä-viin pyöriin, ts. loppukäyttö). |
| WTT | Well to tank -tarkastelussa kasvihuonekaasu- ja energiatarkastelut koskevat polttoaineen tuotantoa ja jakelua (lähteeltä ajoneuvon säili-öön). |
| WTW | Well to wheel -tarkastelussa kasvihuonekaasu- ja energiatarkastelut koskevat polttoaineen koko elinkaarta (lähteeltä vetäviin pyöriin). |

1. JOHDANTO

Suurimmat ongelmat nykyisessä energiajärjestelmässä liittyvät energian saatavuuteen ja riittävyyteen, energian hintaan sekä fossiilisten polttoaineiden aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin ja muihin haitallisiin päästöihin. Näihin haasteisiin vastaaminen vaatii tehokkaampien ja ympäristöarvot paremmin huomioon ottavien energiantuotanto- ja loppukäyttöteknologioiden kehittämistä ja käyttöönottoa. Tulevaisuuden energiaratkaisuja ja -järjestelmiä on kehitettävä kestävänsä kehityksen periaatteiden mukaisesti ja haitallisia päästöjä rajoittaen. Samalla on pyrittävä turvaamaan energian saannin tasapuolisuus ja varmuus esimerkiksi paikallisten uusiutuvien energialähteiden avulla, ottaen kuitenkin huomioon energiantuotantoon liittyvät teknologiset ja taloudelliset mahdollisuudet ja rajoitukset. [1; 2; 3]

Kasvihuonekaasupäästöjä pidetään merkittävimpinä ilmastonmuutokseen eli globaaliin ilmaston lämpenemiseen vaikuttavana tekijänä. Euroopan unionin tavoitteena on, ettei maapallon keskilämpötila nouse yli kahta celsiusastetta esiteollisesta ajasta. Tässä tavoitteessa pysymällä rajoitetaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia.

Vuonna 2007 laatimiensa ja hyväksymiensä pitkän aikavälin ilmasto- ja energiapolitiittisten tavoitteiden mukaan Euroopan unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään vuoden 1990 tasosta 20–30 % vuoteen 2020 mennessä ja 60–80 % vuoteen 2050 mennessä [4]. Näiden tavoitteiden toteuttamiseksi Euroopan unioni hyväksyi vuonna 2008 ilmasto- ja energiapaketin. Tavoitteena on myös lisätä uusiutuvien energialähteiden osuus keskimäärin 20 %:iin EU:n energian loppukulutuksesta. Lisäksi energiatehokkuutta lisätään keskimäärin 20 %:lla perusuran mukaiseen kehitykseen verrattuna vuoteen 2020 mennessä. Tämän lisäksi liikenteen biopolttoaineiden osuus nostetaan 10 %:iin. [5]

EU:n ilmasto- ja energiapaketti käsittää neljä direktiiviä: päästökauppadirektiivin (ETS) uudistamisen, jäsenmaiden välisen ponnistustenjakopäätöksen, direktiivin hiilen talteenotosta ja varastoinnista (CCS) sekä direktiivin uusiutuvista energiavaroista (RES). Ilmasto- ja energiapakettiin liittyvä lainsäädäntö tuli voimaan 2009. Ponnistustenjakopäätös ja direktiivi uusiutuvista energiavaroista sisältävät sitovat velvoitteet jäsenmailtain. Paketin lähtökohtana on, että jäsenmaille asetetut velvoitteet ja tavoitteet jaetaan tasapuolisesti. Suomen tulee vähentää päästökaupan ulkopuolella kasvihuonekaasupäästöjään 16 % vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoteen 2005. Suomen uusiutuvan energian käytön tavoite vuonna 2020 on 38 % (oli 28,5 % vuonna 2005). [6]

Päästökauppa tarkoittaa järjestelyä, jossa haitallisia päästöjä tuottavat laitokset ovat velvollisia omistamaan kutakin tuottamaansa päästömäärän yksikköä kohti tietyn mää-

rän päästöoikeuksia. Laitokset voivat ostaa ja myydä päästöoikeuksia keskenään. EU:n päästökauppajärjestelmä kattaa suurten teollisuus- ja energiantuotantolaitosten hiilidioksidipäästöt. EU:n alueella päästökaupan piiriin kuuluu noin 12 000 laitosta ja Suomessa päästökauppa koskee noin 600 energiantuotanto- ja teollisuuslaitosta. Yritysten välinen päästökauppajärjestelmä käynnistyi EU:ssa vuoden 2005 alussa. Päästökaupan piiriin kuuluvat laitokset eivät saa toimia ilman päästökauppaviranomaisen antamaa päästölupaa. Suomessa toiminnanharjoittaja hakee kasvihuonekaasujen päästöluvan Energia-markkinavirastolta. [7]

Liikenne on energiankäyttäjänä lähes täysin riippuvainen öljystä jalostetuista polttoaineista. Tieliikenteestä aiheutuvia päästöjä pyritään pienentämään ajoneuvojen tekniikkaa kehittämällä, vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä lisäämällä ja myös siirtymällä sähköautojen käyttöön. Vaihtoehtoisilla polttoaineilla tarkoitetaan esimerkiksi alkoholeja, biodieseliä, synteettisiä polttoaineita, maakaasua ja vetyä.

Vetytalous on nostettu yhdeksi vaihtoehdoksi, kun pyritään rajoittamaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvia ongelmia. Erityisen mielenkiinnon kohteena ovat vetyä käyttävät polttokennoajoneuvot. Vetyä liikenteen energialähteenä käyttäen voidaan ihanteellisessa tapauksessa toteuttaa liikenteen energiajärjestelmä, jossa uusiutuviin, paikallisten energialähteiden (esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergia) ja raaka-aineiden avulla voidaan tehokkaasti ja ympäristöystävällisesti tyydyttää liikenteen energiatarpeet. [3; 8; 9]

Monet suuret autonvalmistajat tekevät vetykäyttöisiin polttokennoajoneuvoihin liittyvää kehitystyötä, ja näitä ajoneuvoja on kokeilu- ja testauskäytössä. Polttokennoajoneuvojen yleistymisen ehtona on, että ne ovat kuluttajan kannalta suorituskyvyn, käytösäteen, käyttömukavuuden ja hinnan näkökulmasta vertailukelpoisia nykyisten ajoneuvojen kanssa. Autonvalmistajat ovat esittäneet tavoitteenaan, että polttokennoajoneuvot tulisivat kaupalliseen tuotantoon vuonna 2015 ja yleistyisivät voimakkaammin vuosina 2020–30. Polttokennoajoneuvojen markkinoille tuleminen vaatii ehdottomasti myös vetyyn liittyvän infrastruktuurin kehittämistä. Tällä tarkoitetaan ajoneuvokäytössä tarvittavan vedyn tuotannon, siirron ja jakelun sekä tankkauksen järjestämistä. [10]

Infrastruktuurin rakentaminen sellaiseksi, että se täyttää kuluttajien odotukset, vaatii yhteistyötä eri tahojen kuten autonvalmistajien, vedyn tuottajien ja vedyn jakeluliiketoimintaa harjoittavien yritysten välillä. Infrastruktuurin kehittämisen alkuvaiheissa voidaan erilaisten tutkimus- ja demonstraatiohankkeiden yhteydessä tehdä yhteistyötä eri intressitahojen kesken, lisätä ihmisten kiinnostusta polttokennoajoneuvoja kohtaan ja myös saada kokemuksia esimerkiksi vedyn jakelusta ja ajoneuvojen tankkauksesta.

Suomessa liikkuviin polttokennosovelluksiin liittyvää tutkimusta on tehty vuonna 2007 käynnistyneessä Tekesin (Teknologian ja innovaatioiden tutkimuskeskus) rahoittamassa Polttokennot -tutkimusohjelmassa. Kohteena ovat olleet esimerkiksi työkoneet ja satamien kontinkäsittelykoneet kuten lukit ja mobiilipukkinosturit. Ohjelman tavoitteena on tutkia, hyödyntää ja kaupallistaa polttokennoalan teknologiaa Suomessa. Tut-

kimusohjelmaan liittyvä demonstraatiohanke Demo2013 käynnistyi vuonna 2011. Siinä kootaan ohjelman ja eurooppalaisten yhteistyöhankkeiden tulokset yhteiselle kokeilualustalle Helsingin Vuosaaren satama-alueelle, missä kehitetyt sovellukset nähdään yhtaikaisessa käytössä vuonna 2013.

Suomalainen kaasuntuottajayritys Oy Woikoski Ab osallistuu Demo2013 -hankkeeseen suunnittelemalla ja rakentamalla Vuosaaren satamaan vetytankkausaseman liikkuvien polttokennosovellusten käyttöön. Woikoski myös toimittaa alueella tarvittavan vedyn. Jo ennen Vuosaaren valmistuvan tankkausaseman käynnistymistä on kokemusta vetytankkauksesta hankittu talvella 2012 Rovaniemellä Arctic Driving Centeriin käytössä olleen vetytankkausaseman avulla.

Diplomityössä tarkastellaan yleisiä edellytyksiä ja ehtoja, joiden vallitessa polttokennokäyttöiset ajoneuvot voivat yleistyä markkinoilla. Pääpaino on vedyn saatavuuteen ja jakeluun liittyvän infrastruktuuriin ja vedyn tankkaukseen liittyvien vaatimusten ja mahdollisuuksien selvittämisessä. Työssä ei tarkastella polttokennojen ja polttokennoajoneuvojen tekniikkaa ja niihin liittyviä ratkaisuja. Työssä etsitään vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

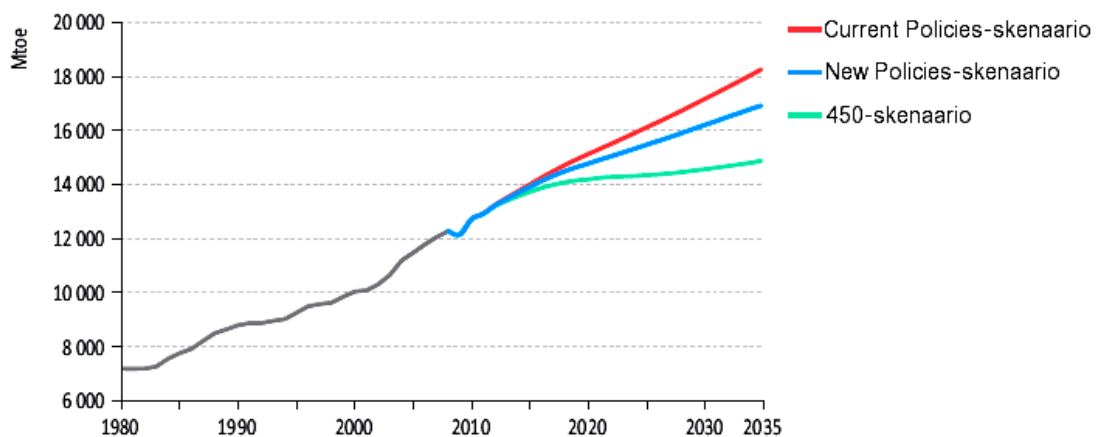
- Missä vaiheessa vetykäyttöisten polttokennoajoneuvojen markkinoille tulo on ja mitkä ovat markkinoille tuloa edistäviä ja hidastavia tekijöitä?
- Miten Suomessa voidaan järjestää demonstraatiohankkeiden tarpeita varten vedyn toimittaminen ja liikkuvien polttokennosovellusten tankkaus?

Diplomityön luvuissa 2 ja 3 on katsaus nykyisen energijärjestelmän ja erityisesti liikennesektorin öljyriippuvuudesta aiheutuviin ongelmiin sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjoamiin mahdollisuuksiin. Luvussa 4 tarkastellaan vedyn käyttöä energianlähteenä, sen tarjoamia etuja sekä vetyä käyttäviä polttokennoajoneuvoja yhtenä vaihtoehtona vähentää liikenteestä aiheutuvia hiilidioksidi- ja myös muita päästöjä. Luvussa esitetään lisäksi vedyn käyttöön liittyviä haasteita ja ongelmia, joiden ratkaiseminen on ehto polttokennoajoneuvojen yleistymiselle. Luvussa 5 käsitellään vedyn tuotantotapoja ja sen jakeluun tarvittavaa infrastruktuuria. Luvuissa 6 ja 7 tarkastellaan vetytankkausasemaa ja sen käyttöä koskevia säädöksiä ja ohjeita sekä vetytankkauksen toteuttamista. Luvussa 8 esitellään esimerkkitapauksina Rovaniemen Arctic Driving Centerin käytössä ollut vetytankkausasema sekä Vuosaaren satamaan suunnitteilla oleva tankkausasema. Näiden kahden esimerkin avulla tarkastellaan vedyn tankkausasemalle ja sen toiminnalle asetettavia vaatimuksia, suunnittelun lähtökohtia sekä suunnittelun eri vaiheissa huomioitavia tankkausaseman turvallisuuteen ja käytettävyyteen liittyviä kysymyksiä. Yhteenvedo on luvussa 9.

2. NYKYINEN ENERGIAJÄRJESTELMÄ JA SEN ONGELMAT

The International Energy Agency (IEA) on vuoden 2011 energiakatsauksessaan [1] arvioinut maailman kokonaisenergian kulutuksen olleen 12 150 miljoonaa öljykvivalenttitonnia (Mtoe) eli 508,7 EJ vuonna 2009. Energiakatsauksessa on arvioitu energiankulutuksen kasvua (kuva 1) vuoteen 2035 mennessä kolmen eri skenaarion avulla:

- Current Policies -skenaario kuvaa tilannetta, jossa jatketaan nykyisellä vuoden 2011 energiapolitiikalla.
- New Policies -skenaario ottaa huomioon uudet sitoumukset ja tehdyt päätökset (vaikka niitä ei olisikaan vielä toimeenpantu), joiden avulla pyritään parantamaan energian saannin varmuutta sekä hillitsemään ilmaston muutosta ja vähentämään ilman laadun ongelmia. Lisäksi otetaan huomioon suunnitelmat energiasjärjestelmän kehittämisestä.
- 450 -skenaario kuvaa tilannetta, jossa ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuus saadaan rajoitettua tasolle 450 ppm CO₂-ekv. Tällöin ilmaston lämpeneminen rajoittuu kahteen celsiusasteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan. [1, s. 55]



Kuva 1. Arvio maailman energiankulutuksen kasvusta eri skenaarioissa [1 s.70].

Katsauksessaan IEA pitää New Policies -skenaariota eräänlaisena perustapauksena. Sen mukaisesti maailman primäärienergian tarve kasvaa vuoden 2009 tasosta olevasta 12 150 miljoonasta öljykvivalenttitonniasta (508,7 EJ) 16 950 miljoonaan öljykvivalenttitonniin (709,7 EJ). Kokonaiskasvu tällä aikavälillä on 40 % vastaten 1,3 %:n vuotuista kasvua. Current Policies -skenaariossa primäärienergian tarve vuonna 2035 on 18 300 Mtoe (766,2 EJ). Tämä taso on 51 % korkeampi kuin vuonna 2009 ja se vastaa 1,6 %:n vuotuista kasvua. 450 -skenaariossakin primäärienergian tarve kasvaa tarkastelu-

jaksolla ja saavuttaa vuonna 2035 tason 14 850 Mtoe (621,7 EJ). Kokonaiskasvu on 23 %, mikä vastaa 0,8 %:n vuotuista kasvua. [1, s. 70]

Merkittävimpiä syitä energiankulutuksen jatkuvaan kasvuun ovat maailman talouden kasvu erikoisesti kehittyvillä markkinoilla ja maapallon väkiluvun lisääntyminen. IEA on vuoden 2011 katsauksessaan ennustanut maailman talouskasvun olevan aikavälillä 2009–2035 keskimäärin 3,6 % vuodessa. OECD:n (Organisation for Economic Cooperation and Development) ulkopuolisten maiden osuudeksi kasvusta on arvioitu yli 70 %. Voimakkainta talouskasvu on kehittyvissä Aasian maissa kuten Kiinassa ja Intiassa. IEA:n ennusteen mukaan Kiinan osuus talouskasvusta on 31 % ja Intian osuus 15 % [1, s. 49]. Tarkastelujaksolla 2009–2035 maailman väkiluvun ennustetaan kasvavan 6,8 miljardista 8,6 miljardiin vuotuisen kasvun ollessa keskimäärin 0,9 %. [1, s. 59]

2.1. Fossiilisten polttoaineiden käytön ongelmat

Fossiilisiin primäärienergiamuotoihin perustuvan energiantuotannon tiedetään aiheuttavan ympäristöongelmia kuten happamoitumista, ilmanlaadun heikkenemistä ja kasvihuonekaasupäästöistä johtuvaa ilmaston lämpenemistä. Ilmaston lämpeneminen on laajalti tunnustettu suurimmaksi maailmanlaajuiseksi ympäristöuhaksi ja energiantuotannon hiilidioksidipäästöt (CO₂) yhdeksi merkittävimmistä kasvihuonekaasujen lähteistä. Lisäksi fossiiliset energiavarat ovat jakautuneet maapallolle hyvin epätasaisesti, mikä aiheuttaa energian saannin turvaamisessa sekä poliittisia että hintaan liittyviä jännitteitä ja epävarmuutta.

Ilmastonmuutoksen kannalta tärkeimpiä kasvihuonekaasuja ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani, otsoni ja dityppioksidi. Myös monet ihmisen valmistamista synteettisistä kemikaaleista (esimerkiksi halogenoidut hiilivedyt) ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Vesihöyry on tärkein luonnollisen kasvihuoneilmiön aiheuttaja ja hiilidioksidi selvästi merkittävin ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasuista. Eri kasvihuonekaasupäästöt saatetaan yhteismitallisiksi eli muunnetaan ekvivalenttiseksi hiilidioksidiksi laskennallisen kertoimen (GWP100) avulla. Taulukossa 1 on esitetty joidenkin kasvihuonekaasujen elinaika ilmakehässä, sekä niiden suhteellinen vaarallisuus hiilidioksidin verrattuna. Eri kaasuja vertailtaessa yksikkönä käytetään lämmityspotentiaalia (global warming potential, GWP), joka mittaa kaasun aiheuttamaa lämmitysvaikutusta massayksikköä kohti hiilidioksidin verrattuna 20 tai 100 vuoden aikana. Taulukossa 1 on siis arvio joidenkin kasvihuonekaasujen lämmityspotentiaalista 20 ja 100 vuoden aikana päästöistä. [11]

Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen elinikä ja ilmastolämmityspotentiaali [11].

| Kaasu | Elinaika | GWP20 | GWP100 |
|--|----------|------------|------------|
| Hiilidioksidi | 50–200 | 1 | 1 |
| Metaani | 12 | 72 | 25 |
| Dityppioksidi | 114 | 310 | 298 |
| HFC:t eli osittain fluora- tut hiilivedyt | 1,4–270 | 437–12 000 | 124–14 800 |

GWP (global warming potential) eli kaasun aiheuttama lämmitysvaikutus CO₂ verrattuna 20 ja 100 vuodessa

Maailman energiankulutuksesta lähes 90 % perustuu uusiutumattomiin energialähteisiin, joista valtaosa on fossiilisia polttoaineita (kivihiili, öljy, kaasu). Myös tulevana vuosikymmeninä fossiililla polttoaineilla katetaan suuri osaa maailman energiankulutuksesta. IEA:n energiakatsauksen mukaiset ennusteet eri primäärienergiamuotojen kulutuksesta vuosina 2020 ja 2035 on esitetty taulukossa 2. Fossiilisten polttoaineiden osuus eri skenaarioissa (skenaariot kuvattu edellä) on 77–80 % vuonna 2020 ja 62–80 % vuonna 2035 [1, s. 71].

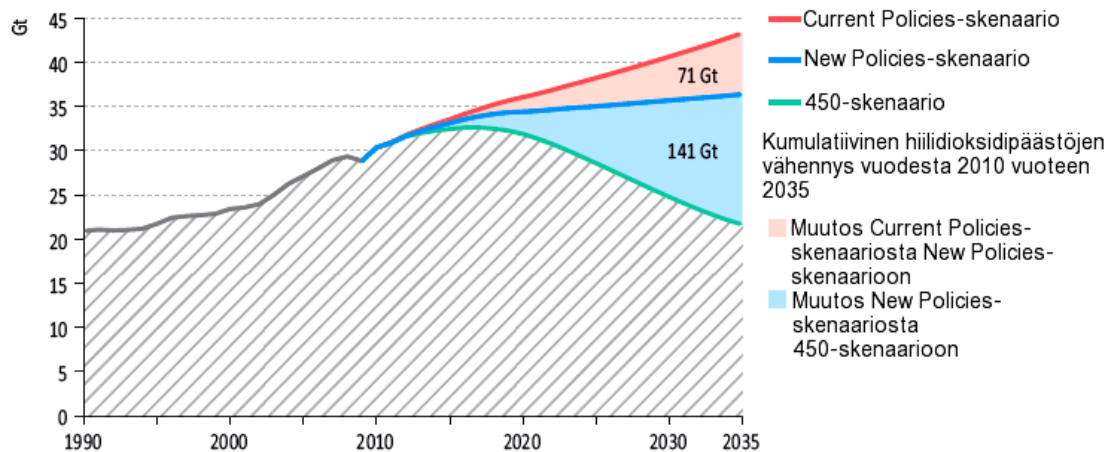
Taulukko 2. IEA:n ennuste kolmen eri skenaarion mukaisesta primäärienergian kulutuksesta (Mtoe) vuosina 2020 ja 2035 [1, s. 71].

| | New Policies- skenaario | | | | Current Policies- skenaario | | 450- skenaario | |
|--------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | 1980 | 2009 | 2020 | 2035 | 2020 | 2035 | 2020 | 2035 |
| Kivihiili | 1 792 | 3 294 | 4 083 | 4 101 | 4 416 | 5 419 | 3 716 | 2 316 |
| Öljy | 3 097 | 3 987 | 4 384 | 4 645 | 4 482 | 4 992 | 4 182 | 3 671 |
| Maakaasu | 1 234 | 2 539 | 3 214 | 3 928 | 3 247 | 4 206 | 3 030 | 3 208 |
| Ydinvoima | 186 | 703 | 929 | 1 212 | 908 | 1 054 | 973 | 1 664 |
| Vesivoima | 148 | 280 | 377 | 475 | 366 | 442 | 391 | 520 |
| Biomassa ja jäte | 749 | 1 230 | 1 495 | 1 911 | 1 449 | 1 707 | 1 554 | 2 329 |
| Muut vaihtoeh- toiset | 12 | 99 | 287 | 690 | 256 | 481 | 339 | 1 161 |
| Yhteensä (Mtoe) | 7 219 | 12 132 | 14 769 | 16 961 | 15 124 | 18 302 | 14 185 | 14 870 |

Vuonna 2010 energiankäyttöön liittyvät maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt olivat 30,4 Gt, mikä oli 5 % enemmän kuin edellisenä vuonna [1, s. 72]. Vuoden 2009 osalta

hiilidioksidipäästöistä noin 43 % aiheutui kivihilestä, 37 % öljystä ja 20 % maakaasusta. OECD-maiden osuus kaikista hiilidioksidipäästöistä oli noin 42 % ja Kiinan osuus noin 24 %. [12, s. 44]

IEA:n ennusteiden mukaan vuonna 2035 maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt ovat New Policies -skenaariossa 36,4 Gt ja Current Policies -skenaariossa 43,3 Gt. 450-skenaariossa hiilidioksidipäästöjen arvioidaan pienenevän 21,6 Gt:iin. Kuvassa 2 on esitetty, miten eri skenaarioiden toteutuminen vaikuttaa maailmanlaajuisiin hiilidioksidipäästöihin. [1, s.73]



Kuva 2. Arvio maailman hiilidioksidipäästöistä kolmessa eri skenaariossa [1].

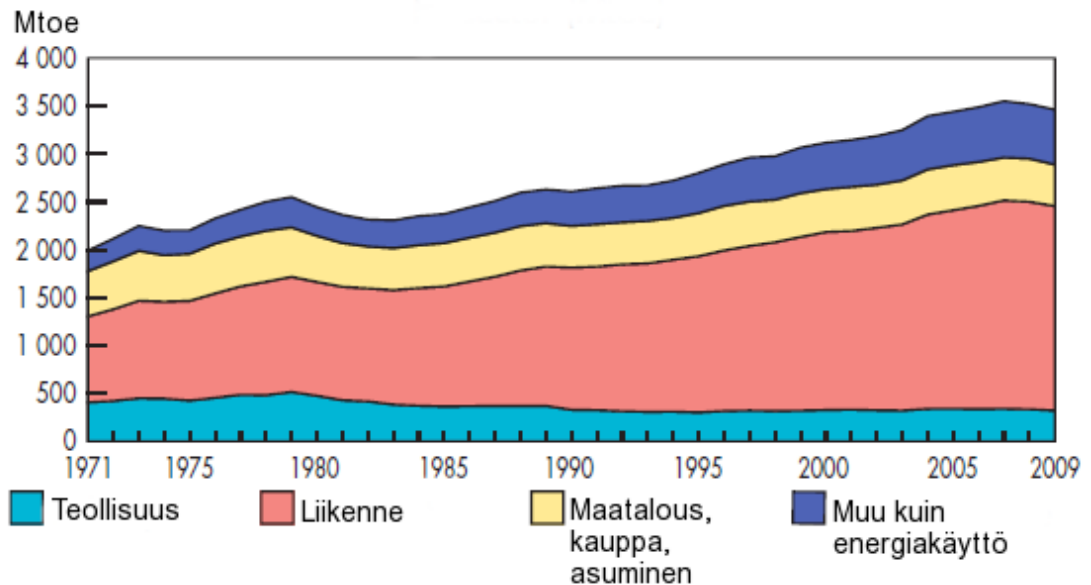
Ennustettu energiankulutuksen kasvu, voimakas riippuvuus fossiilisista polttoaineista sekä näihin liittyvät ympäristölliset, taloudelliset ja geopoliittiset tekijät aiheuttavat nyt ja tulevaisuudessa huolta ja kysymyksiä sekä energian saannin varmuudesta ja hinnasta että energiankäytön vaikutuksista ilmastoon ja ympäristöön. Fossiilisten polttoaineiden käyttöön liittyvät haitat ja ongelmat tunnustetaan ja tiedostetaan yleisesti sekä poliittisessa päätöksenteossa että energian käyttäjien (teollisuus, liikenne, kuluttajat) keskuudessa. Nykyinen energijärjestelmä on suurten haasteiden edessä ja tarve korvaavien energialähteiden kehittämiseksi ja käyttöönotolle on ilmeinen.

2.2. Liikenne energiankäyttäjänä

Vuonna 2009 öljyn osuus maailman primäärienergian käytöstä oli enemmän kuin kolmannes ja kaikissa IEA:n esittämässä tulevaisuuden skenaarioissakin sen osuudeksi on arvioitu vain hieman alle kolmannes vuonna 2020 (ks. taulukko 2). Kuvassa 3 on esitetty öljyn käyttökohteiden jakautuminen vuodesta 1971 vuoteen 2009. Huomattava osa eli lähes 62 % öljytuotteista käytetään liikenteen energiatarpeen tyydyttämiseen [12, s. 33].

Liikennesektori on erityisen riippuvainen öljystä, sillä öljypohjaisilla polttoaineilla katetaan yli 95 % liikenteen energiatarpeesta [13, s. 43]. Vuodelta 2009 olevassa IEA:n raportissa Transport, energy and CO₂ todetaan liikenteen osuuden olevan 19 % maailman energiankulutuksesta ja 23 % energiankäyttöön liittyvistä hiilidioksidipäästöistä. [21, s. 29]. Edellä esitetyt öljyn riittävyyteen, hintakehitykseen ja ympäristöpäästöihin

liittyvät kysymykset ovat merkittäviä kannustimia vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden ja -energioiden kehittämiseksi ja käyttöönotolle.



Kuva 3. Öljyn käyttökohteiden jakaantuminen aikavälillä 1971–2009 [12].

Hyvin toimiva liikenne on yksi teollistuneen yhteiskunnan välttämättömyyksiä. Liikennejärjestelmät (tie-, rautatie, vesi- ja lentoliikenne) vastaavat maailmanlaajuisesti niin teollisuuden tarvitsemien raaka-aineiden ja tuotteiden kuljetuksista kuin ihmisten liikkumistarpeen tyydyttämisestä. Ilman toimivaa liikennettä ja liikkumisen mahdollisuutta ei nykyisen kaltainen yhteiskunta eri toimintoineen olisi mahdollinen.

Tieliikenteen osalta yleinen ilmiö ympäri maailmaa on, että elintason noustessa halutaan liikkua ja myös liikutaan yhä enemmän. Tämä lisää väistämättä käytössä olevien ajoneuvojen määrää. Vuonna 1939 maailman autokanta oli 47 miljoonaa, vuonna 2006 se oli 800 miljoonaa ja kanta kasvaa edelleen. EU:ssa autoja on 247 miljoonaa, Yhdysvalloissa 237 miljoonaa, Japanissa 75 miljoonaa, Kiinassa 26 miljoonaa ja Venäjällä 29 miljoonaa. Näiden alueiden osuus maailman autokannasta on siis noin 75 %. [13 s. 1; 15, s. 15] Ennusteiden mukaan vuonna 2035 maailmassa on autoja noin 1,7 miljardia [1 s. 41] ja vuonna 2050 jopa 2,5 miljardia [15, s. 2].

Autojen määrän ja tieliikenteen voimakas lisääntyminen aiheuttavat monia ongelmia. Hiilidioksidipäästöjen lisäksi pakokaasupäästöt (CO, HC, NOx, hiukkaset) aiheuttavat ilman laadun huonontumista erityisesti suurissa kaupungeissa. Lisäksi ruuhkat, maan käyttöön liittyvät tekijät, onnettomuudet ja melu ovat ongelmia tiiviisti asutuilla alueilla. Teollisuusmaissa ollaan pääsemässä tilanteeseen, jossa hyvälaatuiset polttoaineet, kehittynyt moottoritekniikka ja edistyneet pakokaasujen puhdistuslaitteet hoitavat osan päästöjen aiheuttamista ongelmista. [16, s. 10]

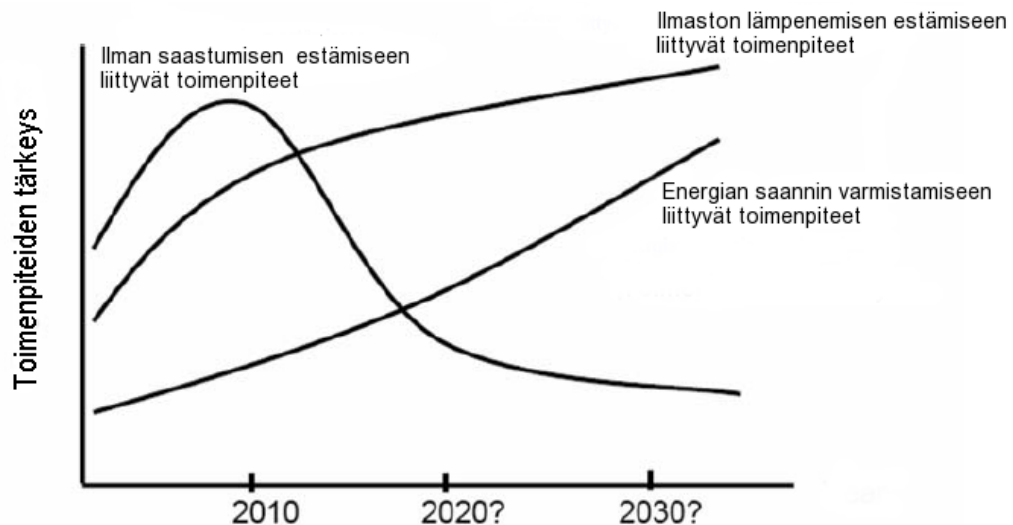
Vuonna 2009 koko liikennesektori aiheutti hiilidioksidipäästöistä 23 % [17, s.10]. Kaikkiaan liikenteen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ovat 1970-luvulta lähtien enemmän kuin kaksinkertaistuneet [18, s. 616]. Vuonna 2010 liikenteen aiheuttamat

kasvihuonekaasupäästöt Suomessa olivat 12,9 miljoonaa tonnia CO₂-ekv eli noin viidennes kaikista ja neljännes energiasektorin kasvihuonekaasupäästöistä. Suurin osa liikennesektorin päästöistä tulee tieliikenteestä. [19, s. 15]

Liikenteen hiilidioksidipäästöjen leikkaaminen on vaikeaa, koska vähennyksiä voidaan saada aikaan vain energiankulutusta vähentämällä tai polttoaineiden hiiliosuutta pienentämällä. Mitkään autoihin asennettavat puhdistimet eivät tuo helpotusta tähän asiaan. Autonvalmistajille lisähaasteita aiheutuu siitä, että tekniikat, jotka vähentävät haitallisia päästöjä, yleensä lisäävät polttoaineen kulutusta. [16, s. 10]

Liikennesektorin voimakas riippuvuus öljystä aiheuttaa ongelmia myös energian riittävyyden näkökulmasta. Öljytuotteista tulee ennen pitkää pulaa, ja lyhyemmällä aikavälillä tämä tietää öljytuotteiden hinnan kohoamista. Samaan aikaan kun kulutus on kasvussa erityisesti Aasian maissa, ollaan pisteessä, missä öljyntuotanto saavuttaa huipunsa.

Kuvassa 4 on hahmotettu liikenteen energia- ja ympäristöongelmiin liittyvien toimenpiteiden tarpeellisuutta lähimpinä vuosikymmeninä [22, ks. 16]. Sen mukaisesti ilman saastumisen estämiseen liittyvien toimenpiteiden merkitys pienenee, koska tällä sektorilla on jo nyt saavutettu melko hyvä taso. Sen sijaan ilmaston lämpenemisen estämiseen ja energian saannin varmistamiseen tähtäävien toimenpiteiden merkitys ja tärkeys vain kasvavat.

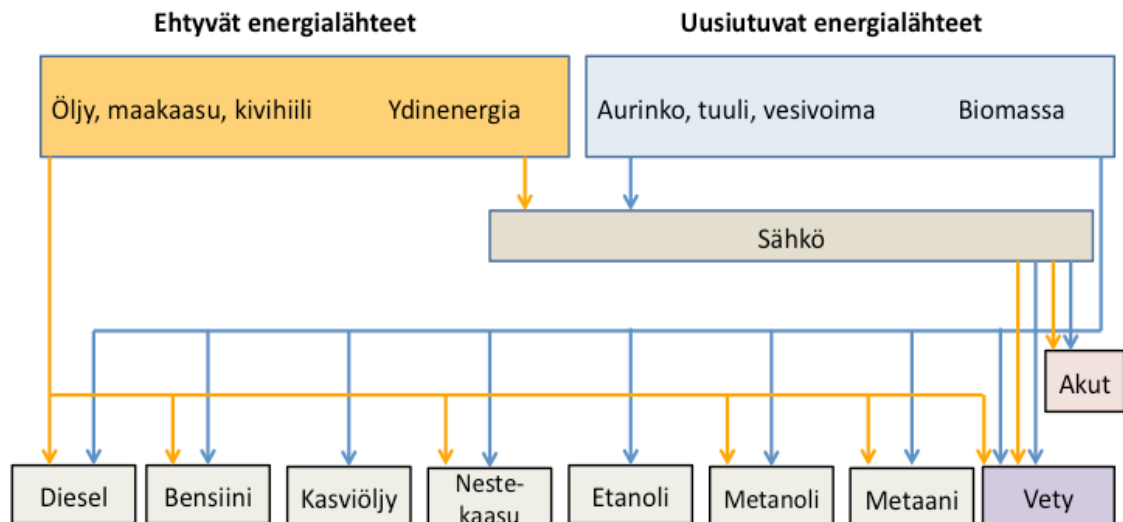


Kuva 4. Liikennesektorin haasteisiin liittyvien toimenpiteiden merkityksen kehittyminen [22, ks. 16].

Koska nykyiset fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat liikennejärjestelmät eivät ole kestävä kehityksen periaatteiden mukaisia, tarvitaan toimia päästöjen vähentämiseksi ja liikennesektorin kehittämiseksi ympäristölle ystävällisempään suuntaan. Liikenteen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä yritetään hillitä mm. liikennevälineiden energiatehokkuuden parantamisen, päästörajoitusten sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden ja liikennevälineiden avulla. Parhaimmillaan vaihtoehtoiset polttoaineet voivat tuoda lievitystä niin päästöistä kuin öljyriippuvuudesta aiheutuviin liikennesektorin haasteisiin.

3. VAIHTOEHTOISET LIKENNEPOLTTOAI-NEET

Liikenteen vaihtoehtoisilla polttoaineilla tarkoitetaan muita kuin öljypohjaisia polttoaineita. Ne voidaan jaotella esimerkiksi 1) nestemäisiin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin kuten synteettiset polttonesteet ja biopolttoaineet 2) kaasumaisiin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin kuten maakaasu, nestekaasu ja vety sekä 3) sähköön. Jaottelun perusteena voi olla myös se, onko vaihtoehtoiset polttoaineet tuotettu uusiutumattomia vai uusiutuvia energialähteitä käyttäen. Kuvassa 5 on esitetty vaihtoehtoisten polttoaineiden jaottelu tämän mukaisesti. [20, s. 189]



Kuva 5. Vaihtoehtoisten polttoaineiden jaottelu [20].

Vaihtoehtoiset polttoaineet voidaan jaotella lisäksi sen perusteella, miten hyvin ne toteuttavat kestävä kehityksen periaatteita. Toiset polttoaineista ovat tässä suhteessa parempia kuin toiset. Esimerkiksi maakaasu on ympäristön ja riittävyyden kannalta öljytuotteita parempi vaihtoehto, vaikka myös maakaasu on uusiutumaton energianlähde. Biopolttoaineiden osalta arvostelua on herättänyt se mahdollisuus, että energiakäyttöön viljeltävät kasvit valtaavat tilaa elintarvikekäyttöön tarkoitettuilta kasveilta. Polttoaineita, jotka eivät edes periaatteessa pysty vastaamaan kestävä kehityksen asettamiin haasteisiin, voidaan pitää eräänlaisina siirtymäkauden polttoaineina. Näitä käytetään ennen siirtymistä polttoaineisiin, joiden avulla kestävä kehityksen periaatteita voidaan toteuttaa.

Toistaiseksi tieliikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden osuus on maailmanlaajuisesti arvioiden sangen pieni. Merkittävimmät vaihtoehtoiset polttoaineet ovat etanoli, nestekaasu, maakaasu ja biodiesel. Kivihielestä ja maakaasusta valmis-

tetaan synteettisiä polttoaineita muutamassa tuotantolaitoksessa maailmassa, mutta määrät ovat toistaiseksi melko pieniä. Vaihtoehtoisten polttoaineiden yhteenlaskettu osuus maailman tasolla on noin 3,5 %, ja biopolttoaineiden osuus noin 1,5 %. Vain harvassa tapauksessa vaihtoehtoiset polttoaineet pystyvät aidosti kilpailemaan tavanomaisten hiilivetypolttoaineiden kanssa. Vaihtoehdot on saatu markkinoille erilaisten verohelpotusten, muiden tukien tai pakotteiden avulla. [16, s. 15; 23]

3.1. Käyttöominaisuudet ja soveltuvuus ajoneuvoille

Polttomoottori voi ainakin teoriassa toimia monilla eri polttoaineilla ja polttoaineiden seoksilla. Useimpia biopolttoaineita - alkoholeja, biodieseliä ja biokaasua - voidaan käyttää joko polttoainekomponenttina tai polttoaineena sellaisenaan. Alkoholit ja kaasumaiset polttoaineet soveltuvat kipinäsytytteisten moottorien (ottomoottorien) polttoaineeksi kun taas kasvi- ja eläinperäiset öljyjohdannaiset puristusytytteisten (dieselmoottorien) polttoaineeksi. Synteettisesti voidaan valmistaa niin bensiini- kuin dieselkomponentteja, joskin painotus on dieselpolttoaineissa. [16, s. 53]

Todellisuudessa polttoainevaihtoehdot ovat huomattavasti rajallisemmat. Ajan myötä ajoneuvomoottorit, niin bensiini- kuin dieselmoottorit, pakokaasujen puhdistuslaitteet ja polttoaineet ovat hioutuneet hyvin toimiviksi kokonaisuuksiksi. Perinteisten hiilivetypolttoaineiden (benssiini, diesel) valta-asemaan vaikuttaa niiden helppo varastoitavuus, auton pitkä toimintamatka yhdellä tankkauksella sekä polttoaineen tankkauksen nopeus ja helppous. [20, s. 188]. Kun otetaan käyttöön uusia polttoaineita tai polttoainekomponentteja, ei ole hyväksyttävissä, että jouduttaisiin tekemään kompromisseja luotettavuuden, suorituskyvyn, energiatehokkuuden tai pakokaasupäästöjen osalta. Myös uusien polttoaineiden kustannukset saattavat olla merkittävä niiden käyttöä rajoittava tekijä. [16, s. 53]

Nestemäisiä vaihtoehtoisia polttoaineita ovat esimerkiksi alkoholit ja alkoholijohdannaiset, biodiesel ja synteettiset polttoaineet. Seoskomponentteina käytettävät nestemäiset vaihtoehtoiset polttoaineet eivät välttämättä edellytä muutoksia jakelujärjestelmissä tai ajoneuvoissa. Synteettiset polttoaineet voisivat korvata nykypolttoaineet jopa kokonaan ilman muutostarpeita ajoneuvossa. Toisaalta esimerkiksi lähes puhtaan alkoholin käyttö edellyttää muutoksia sekä jakelujärjestelmään että ajoneuvoihin mm. korrosiovaaran takia. [16, s. 56]

Kaasumaisia vaihtoehtoisia polttoaineita ovat esimerkiksi maakaasu, biokaasu, nestekaasu ja vety. Kaasumaiset polttoaineet edellyttävät aina muutoksia sekä ajoneuvoihin että polttoaineiden tankkausjärjestelmiin. Kaasumaisten polttoaineiden kohdalla riittävän suuren polttoainevaraston mahdollistaminen ajoneuvoon tuottaa usein ongelmia. Suurin osa maa- ja nestekaasuautoista on toteutettu kaksoispolttoainejärjestelmillä siten, että autoja voidaan käyttää myös bensiinillä. Moottoriteknisesti bensiinimoottorin muuttaminen esimerkiksi maa- tai nestekaasulle on suhteellisen helppoa. Vety voi toimia niin polttomoottorien kuin polttokennojen polttoaineena. [16, s. 68] Vaihtoehtoisten poltto-

aineiden käyttöönotosta aiheutuvien modifikaatioiden tarve autoissa kasvaa seuraavassa järjestyksessä: synteettiset polttoaineet – matalaseosteiset biopolttoaineet (esim. 5 - 10 % etanolia tai 5 – 20 % biodieseliä) – korkeaseosteiset biopolttoaineet (em. suuremmat pitoisuudet etanolia tai biodieseliä) – nestekaasu – maakaasu – dimetyylieetteri eli DME – vety. [16, s 86]

Vaihtoehto perinteiselle bensiiniä tai dieseliä käyttävälle autolle ovat myös hybridi- ja sähköautot. Niissä autoa eteenpäin vievä voima kehitetään osittain tai kokonaan sähkömoottorilla. Sähkön käyttö ajoneuvojen voimanlähteenä vähentäisi liikenteen haitallisia päästöjä ja kaupunkiliikenteen melua. Niiden aiheuttamat kokonaispäästöt riippuvat kuitenkin sähkön tuotantotavasta. Sähköautojen ongelmia ovat olleet lyhyt toimintamattaka yhdellä akun latauksella ja akkujen hidas latautuminen ja niiden kestävyys.

3.2. Vaihtoehtoisten polttoaineiden vertailu

Vertailtaessa eri polttoainevaihtoehtoja ja arvioitaessa niiden sopivuutta ja toimivuutta on kiinnitettävä huomiota moneen eri asiaan. Näitä ovat esimerkiksi raaka-aineen saataavuus, konversioprosessi, pakokaasupäästöt, elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt ja yleisesti kestävä kehityksen periaatteiden toteutuminen. Näiden lisäksi on tarkasteltava polttoaineen yhteensopivuutta jakelujärjestelmän ja ajoneuvojen kanssa, polttoaineen käytännöllisyyttä, kokonaiskustannuksia, turvallisuutta, polttoaineen vaikutusta ajoneuvojen suorituskykyyn jne. [24, s.15]

Yksi tärkeimmistä perusteista vaihtoehtoisten polttoaineiden käytön edistämiseksi on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. Kasvihuonekaasu- ja energiatarkastelut tulisi tehdä koko polttoaineketjun yli, ts. laskelmissa tulisi ottaa huomioon niin polttoaineen tuottamisesta, jalostamisesta, jakelusta kuin loppukäytöstä aiheutuvat päästöt. Tällöin puhutaan yleisesti elinkaaren päästöistä (life cycle, life cycle analysis LCA) tai well-to-wheel -tarkastelusta (WTW). Tulokset ilmoitetaan esim. muodossa kg CO₂-ekv/kg polttoainetta. Usein tulokset myös suhteutetaan tavanomaisiin fossiilisiin polttoaineisiin, bensiiniin ja dieseliin. Well-to-wheel -tulokset voidaan ilmoittaa myös ajosuoritteeseen suhteutettuna, jolloin tulokset ovat esimerkiksi muodossa g CO₂-ekv/km tai MJ/km. [16, s. 39]

Käytössä ovat myös termit well-to-tank (lähteeltä auton säiliöön, ts. polttoaineen tuotanto ja jakelu) ja tank-to-wheel (polttoainesäiliöstä vetäviin pyöriin, ts. loppukäyttö). Kasvihuonekaasutaseen kannalta määrääviä tekijöitä ovat raaka-aine (fossiilinen tai uusiutuva), mitä panoksia raaka-aineen tuottamiseen tarvitaan, miten tehokas jalostus- tai konversioprosessi on ja mikä on polttoaineen hiili/vety -suhde. Jokainen konversiovaihe kuluttaa energiaa. [16, s. 39]

Vuonna 2007 julkaistussa vaihtoehtoisia liikennepolttoaineita käsittelevän well-to-wheel analyysin [25] yhteenvedossa todetaan muun muassa, että siirtymällä uusiutuviin tai vähähiilisiin polttoaineisiin voidaan saavuttaa merkittävät kasvihuonekaasupäästöjen leikkaukset, mutta uusien polttoaineiden tuotanto ja käyttöönotto vaativat energiaa. Oi-

keiden vaihtoehtojen valitseminen onkin tärkeää kasvihuonekaasujen vähentämisen kokonaisuuden kannalta. Esimerkiksi laajamittainen synteettisten polttoaineiden ja vedyn valmistus hiilestä tai maakaasusta edellyttää hiilidioksidin talteenottoa. Polttoaineiden tuotannon vaatiman energian aiheuttamien kustannusten lisäksi myös uusien polttoaineiden raaka-aineet, tuotantolaitokset ja mahdolliset infrastruktuurin luomiseen kustannukset voivat olla taloudellisesti merkittäviä.

Yhteenvedossa todetaan myös, että kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen aiheuttaa kustannuksia, mutta korkeat kustannukset eivät aina takaa tehokasta kasvihuonekaasupäästöjen pienenemistä. Arvio on, että lyhyellä aikavälillä minkään yksittäisen polttoainevaihtoehdon avulla ei saavuteta merkittävää kasvihuonekaasupäästöjen vähenemistä. Hyvin todennäköisesti markkinoilla on ja siellä myös tarvitaan useita polttoainevaihtoehtoja. [25]

Taulukossa 3 on vertailtu merkittävimpiä vaihtoehtoisia polttoaineita [26, s. 245]. Vertailun perusteena on käytetty polttoaineen raaka-aineen saatavuutta, saatavuuden varmuutta, polttoaineen käsiteltävyyttä ja tilavuuteen perustuvaa energiatiheyttä. Taulukosta nähdään että perinteiset polttoaineet bensiini ja diesel sekä biodiesel (FAME), XTL ja etanoli ovat käsiteltävyydeltään ja energiatiheydeltään polttoaineista parhaita (taulukossa merkintä ++). Niiden ongelmana on kuitenkin raaka-aineen saatavuus ja saannin varmuus (taulukossa merkintä --). Raaka-aineiden saatavuuden ja varmuuden kannalta parhaita ovat vety ja sähkö, koska niitä voidaan tuottaa monista eri lähtöaineista. Tämä tekee niistä varteenotettavia vaihtoehtoisia energialähteitä, vaikka käsiteltävyys ja kaasumaisen vedyn energiatiheys tilavuusyksikköä kohti eivät ole parhaita.

Polttoaineet, joiden avulla on parhaat edellytykset vähentää maapallon kasvihuonekaasupäästöjä, ovat vety, sähkö ja biopolttoaineet. Jokaisen vaihtoehdon käyttöönottoon ja laajamittaiseen käyttöön siirtymiseen liittyy kuitenkin omat ongelmansa. Vetyä ja sähköä voidaan tuottaa monen energialähteen avulla, jolloin kokonaispäästöjen määrä riippuu energialähteen valinnasta. Käytössä vedystä ja sähköstä ei aiheudu kasvihuonekaasupäästöjä. Myös biopolttoaineita voidaan tuottaa monella eri tavalla. Biopolttoaineiden hinta ja ominaisuudet riippuvat suuresti käytetystä teknologiasta. Nykyiset niin kutsutut ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet ovat halvimpia biopolttoaineita, mutta ne voivat olla ympäristön kannalta jopa huonompia kuin perinteiset polttoaineet.

Biomassa ei ole ehtymätön luonnonvara ja biopolttoaineiden tuotantoon liittyy monia tekijöitä, jotka kyseenalaistavat niiden laajamittaisen tuotannon ja kestävä kehityksen mukaisuuden. Biopolttoaineiden tuotannon ongelmiksi voivat muodostua kilpailu vesivarjoista, käytetyt torjunta-aineet ja lannoitteet, maankäyttö ja vaikutukset maaperään sekä kilpailu maa-alasta ruuan tuotannon kustannuksella, mikä voi nostaa ruuan hintaa.

Taulukko 3. *Vaihtoehtoisten polttoaineiden vertailu eri tekijöiden perusteella [26].*

| Polttoaine | Raaka-aineen saatavuus | Tuotantovarmuus ja -potentiaali | Käsiteltävyys | Energiatiheys tilaavuutta kohti |
|--------------|------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Bensiini | -- | -- | ++ | ++ |
| Diesel | -- | -- | ++ | ++ |
| Nestekaasu | -- | -- | 0 | + |
| Maakaasu | 0 | 0 | - | 0 |
| Biodiesel | -- | - | ++ | ++ |
| XTL | 0 | 0 | ++ | ++ |
| Metanoli | 0 | 0 | + | + |
| DME | 0 | 0 | 0 | + |
| Etanoli | - | 0 | ++ | + |
| Vety (kaasu) | ++ | ++ | - | -- (35 MPa) - (70 MPa) |
| Vety (neste) | ++ | ++ | -- | 0 |
| Sähkö | ++ | ++ | + | -- |

Motiva [23] on tarkastellut Suomen näkökulmasta perinteisten liikennepolttoaineiden (bensiini ja diesel) ja joidenkin vaihtoehtoisten polttoaineiden tai energialähteiden ominaisuuksia, ympäristövaikutuksia ja tulevaisuuden näkymiä seuraavasti:

Alkoholit: Liikennepolttoaineena käytetään etanolia, metanolia ja tulevaisuudessa mahdollisesti myös dimetyylieetteriä (DME), joka on nesteytyvä kaasu. Alkoholien hiilidioksidipäästöt vaihtelevat raaka-aineesta riippuen. Etanoli on eniten käytetty vaihtoehtoinen polttoaine maailmassa. Etanolia valmistetaan yleensä sokeriruosta, maisista, sokerijuurikkaasta ja viljoista. Alkoholilla voidaan tehdä myös ruoka- ja maatalousjätteistä ja tulevaisuudessa selluloosastakin. Vuoden 2011 alusta bensiinin valtalajiksi Suomessa tuli 10 % etanolia sisältävä 95 E10 -bensiini.

Biodiesel: Vastaa ominaisuuksiltaan dieselöljyä ja se sekoitetaan tavanomaisen dieselin joukkoon tai käytetään sellaisenaan. Biodieseliä jalostetaan erilaisista uusiutuvista hiilipitoisista raaka-aineista eri tekniikoilla. Suomalainen toisen sukupolven biodiesel, NExBTL (Neste biomass to liquids - biomassasta nesteeksi) valmistetaan palmu- ja eläinperäisistä öljyistä. Kolmannen sukupolven biodieseliä saadaan kaasuttamalla biomassaa ja tuottamalla muodostuneesta synteetikaasusta (hiilimonoksidin ja vedyn seos) hiilivetyketjuja ns. Fischer–Tropsch -synteessin avulla. Biodieselin käyttö vähentää hiilidioksidin- ja hiukkaspäästöjä.

Maakaasu ja biokaasu: Käyttö parantaisi ilmanlaatua ja biokaasu vähentäisi lisäksi hiilidioksidipäästöjä. Hinnaltaan maa- ja biokaasu ovat bensiiniä edullisempia polttoaineita, mutta ongelmana on niiden jakelu. Maakaasua voi Suomessa tankata 16 asemalta. Kaasun jakelu vaatii käytännössä putkiverkoston ja tankkausjärjestelmän.

Nestekaasu: Nestekaasua käyttävän auton hiilidioksidi-, hiilivety- ja typenoksidipäästöt ovat pienemmät kuin bensiiniautolla. Dieselautoon verrattuna hiilidioksidipäästöt ovat hieman isommat, mutta nestekaasusta tulee selvästi vähemmän hiukkas- ja typenoksidipäästöjä. Suomessa nestekaasun käyttö polttoaineena on harvinaista. Bensiiniauton saa muunnettua nestekaasulle, mutta Suomessa ei ole liikennestekaasun jakeluverkostoa.

Sähkö: Sähköautot itsessään eivät aiheuta hiilidioksidipäästöjä, mutta niiden kokonaispäästöjen määrä riippuu sähkön tuotantotavasta. Sähköautot tuottavat vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin bensiini- ja dieselautot silloin, kun sähkö on tuotettu vesi-, tuuli-, aurinko- tai ydinvoimalla tai sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa. Sähkön käyttö ajoneuvojen voimanlähteenä vähentäisi liikenteen haitallisia päästöjä ja kaupunkiliikenteen melua. Sähköautojen ongelmia ovat olleet lyhyt toimintamatka yhdellä akun latauksella, akkujen hidas latautuminen ja niiden kestävyys.

Vety: Vetyä voidaan käyttää vedylle muutetuissa polttomoottoreissa ja polttokennoissa. Polttomoottorissa palaessaan vety tuottaa lähinnä vettä ja jonkin verran voiteluaineista lähtöisin olevia typenoksideja, mutta ei hiilipitoisia päästöjä, kuten hiilidioksidia, häkää tai hiilivetyä. Polttokennoissa vety on täysin päästötön, sillä polttokenno muuntaa vedyn suoraan sähköksi ja lämmöksi. Vedyn käytön kokonaishiilidioksidipäästöt riippuvat vedyn tuotantotavasta ja käytetystä energiasta. Vetyä pidetään hyvänä energialähteenä, mutta sen valmistukseen ja käyttöön liittyy kuitenkin vielä useita rajoitteita. Polttokennojen etuja ovat muun muassa hyvä hyötysuhde, luotettavuus, pieni koko ja äänettämyys.

Vaihtoehtoisia polttoaineita on yksityiskohtaisesti tarkasteltu ja vertailtu esimerkiksi VTT:n selvityksessä Status and outlook for biofuels, other alternative fuels and new vehicles [27] sekä Liikenne- ja viestintäministeriön toimeksiannosta tehdyssä Liikenteen polttoainevaihtoehtoja käsittelevässä kehitystilanneraportissa [16]. Tässä työssä tarkastellaan jatkossa ainoastaan vetyä ja sen käyttömahdollisuuksia liikenteen vaihtoehtoisena energiamuotona polttokennoajoneuvoissa.

4. VETY LIIKENTEEN ENERGIALÄHTEENÄ

Vety on sopiva polttoaine moniin energijärjestelmiin. International Association of Hydrogen Energy (IAHE) toteaa, että vetyä voidaan käyttää kaikissa niissä sovelluksissa missä fossiilisia polttoaineitakin ja se soveltuu käytettäväksi polttoaineena lämmön- tuotannossa sekä polttomoottorien ja turbiinien energialähteenä. Vetyä käyttävinä sovel- luskohteina mainitaan liikennevälineet niin tieliikenteessä, raideliikenteessä kuin ilmai- lussa. [28]

Perinteisistä polttoaineista poiketen myös vedyn elektrokemiallinen hapetus on ver- rattain helppoa. Tämä mahdollistaa vedyn käytön myös polttokennoissa. Vedyn käyttö- mahdollisuuksia niin erilaisissa moottoreissa ja turbiineissa kuin myös polttokennoissa on tarkasteltu esimerkiksi Encyclopedia of Energyssä [29].

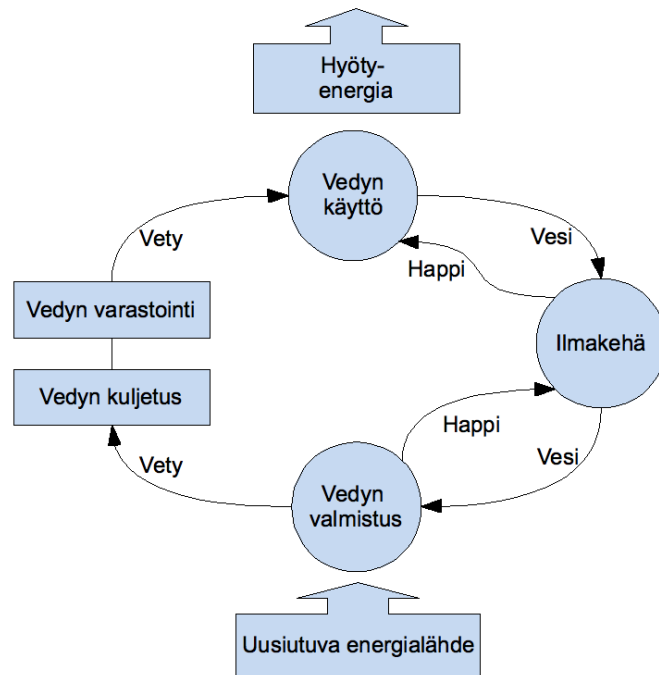
Vetytalous ja vedyn käyttö erikoisesti liikkuvissa polttokennosovelluksissa on nos- tettu yhdeksi vaihtoehdoksi, kun pyritään rajoittamaan fossiilisten polttoaineiden käy- töstä aiheutuvia ongelmia. Polttokennoilla varustettuja henkilöautoja pidetään ensisijai- sina vedyn energiakäytön sovelluskohteina ja yhtenä lupaavimmista mahdollisuuksista pienentää tai ratkaista tieliikenteen päästöistä aiheutuvia ongelmia. [15; 30]

4.1. Miksi vety

Vety on kiinnostava tulevaisuuden energiavaihtoehto, sillä parhaimmillaan se voi tarjota ratkaisun moniin nykyisen energijärjestelmän ongelmiin eli haitallisiin kasvihuonekaa- su- ja hiukkaspäästöihin, energian saatavuuteen ja riittävyyteen liittyvään epävarmuu- teen ja tästä aiheutuviin hintapaineisiin sekä riippuvuuteen fossiilisista polttoaineista. Fossiilisista primäärienergiälähteistä (öljy, kivihiili ja maakaasu) poiketen vetyä ei kui- tenkaan voida pitää energian lähteenä, sillä se ei esiinny luonnossa puhtaana aineena, vaan on aina sitoutuneena kemiallisissa yhdisteissä kuten erilaisissa hiilivedyissä ja ve- dessä. Vedyn käytön edellytyksenä onkin aina vedyn valmistus, mikä vaatii energiaa. Vetyä voidaan valmistaa erilaisilla termokemiallisilla menetelmillä esimerkiksi maakaa- susta, hiilestä ja biomassasta sekä vedestä elektrolyysin ja fotolyysin avulla. [8; 13] Ve- dyn eri valmistustapoja on käsitelty luvussa 5.

Koska vetyä voidaan valmistaa monesta eri lähtöaineesta, tarjoaa vetyyn perustuva energijärjestelmä mahdollisuuden energiaomavaraisuuden kasvuun, jolloin riippuvuus tuontien energiasta vähenee. Kun vedyn valmistuksessa käytetään paikallisia raaka-aine- ja energiavaihtoehtoja, voidaan energian tuontia vähentää ja saavuttaa suurempi energia- omavaraisuus. Tällä tavalla tuotetun vedyn käyttö esimerkiksi polttokennoajoneuvoissa pienentää riippuvuutta öljypohjaisista liikennepolttoaineista.

Ideaalitapauksessa vedyn avulla on mahdollista saavuttaa energijärjestelmä, joka ei aiheuta lainkaan hiilidioksidipäästöjä (kuva 6). Tällöin vety valmistetaan vedestä elektrolyysin avulla käyttäen uusiutuvilla energialähteillä (esim. tuuli ja aurinko) tuotettua sähköä. Vedyn sisältämä kemiallinen energia voidaan polttokennon avulla muuttaa sähköenergiaksi, jolloin syntyy ainoastaan vettä ja lämpöä.



Kuva 6. Ideaalinen vetyyn perustuva energijärjestelmä [14].

Kaikki vedyn tuotantovaihtoehdot ja tuotannossa käytettävät energiamuodot eivät kuitenkaan ole hiilidioksidipäästöiltään pieniä. Käytetystä raaka-aineesta, tuotantoprosessista ja tuotantoon käytetyn energian alkuperästä riippuu tuotetun vedyn hiilidioksidineutraalius. Vaikka kuvan 6 energijärjestelmän vaiheet ovat nykyisillä teknisillä ratkaisuilla toteutettavissa, ne eivät ainakaan vielä ole taloudellisesti kilpailukykyisiä fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien ratkaisujen kanssa. [14, s.12]

Vedyn käyttöön perustuvassa energijärjestelmässä vety toimii energian kantajana (siirtäjänä) aivan kuten sähkö. Energiankantajina vety ja sähkö täydentävät toisiaan. Vety laajentaa energian varastointimahdollisuuksia ja luo siten joustavuutta kokonaisenergijärjestelmään. Käyttämällä esimerkiksi tuulivoimalla tuotettua sähköä vettä hajottavan elektrolyysin energialähteenä saadaan sähköenergiaa varastoitua vetyyn. Varastoitu energia voidaan tarpeen tullen ottaa käyttöön polttokennojen avulla. Vetyä voidaan siis käyttää energiavarastona epätasaisen tuotannon omaaville sähkön tuotantomuodoille (tuulivoima ja aurinkosähkö).

Vetyä pidetään lupaavana keskipitkän ja pitkän aikavälin vaihtoehtona liikenteen käyttämille bensiinille ja dieselöljylle [15; 18; 30]. Vetyä voidaan valmistaa käyttäen sekä fossiilisia että uusiutuvia energialähteitä, ja vety soveltuu käytettäväksi sekä polttomoottori- että polttokennoajoneuvoissa. Kummassakaan tapauksessa ajoneuvosta ei

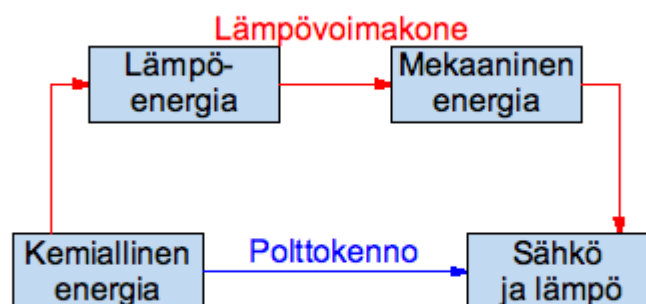
aiheudu hiilidioksidipäästöjä. Polttomoottorissa palaessaan vety tuottaa lähinnä vettä ja jonkin verran voiteluaineista lähtöisin olevia typenoksideja, mutta ei hiilipitoisia päästöjä, kuten hiilidioksidia, häkää tai hiilivetyjä. Vetyä käyttävät polttokennoajoneuvot ovat täysin päästöttömiä. Polttokenno muuntaa vedyn suoraan sähköksi ja lämmöksi. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että vetykäyttöiset ajoneuvot olisivat aina perinteisiä autoja ympäristöystävällisempiä. Kokonaisuuden kannalta on tärkeää, millä tavalla vety on tuotettu eli miten suuret päästöt vedyn valmistukseen ja sen siirtoon liittyvät.

Vetyyn perustuvalla energiajärjestelmällä on selkeät etunsa, mutta myös rajoituksensa. Merkittävimpänä etuna on mahdollisuus luoda paikallinen energiansaannin turvaava järjestelmä, joka ottaa ympäristönäkökohdat huomioon ja on kestävä kehityksen periaatteiden mukainen. Vedyn käyttöön perustuvan energiajärjestelmän ja siihen kuuluvan infrastruktuurin, tekniikan, laitteistojen jne. kehittäminen ja saattaminen taloudellisesti kannattavalle tasolle vaativat kuitenkin vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä, demonstraatiohankkeita, suuria investointeja sekä myös poliittista ja yhteiskunnallista tahtoa. Vain näiden kaikkien yhteisvaikutuksella voidaan luoda edellytykset vedyn käyttöön perustuvalla energiajärjestelmällä ja sen yleistymiselle.

4.2. Vedyn käyttö polttokennoissa

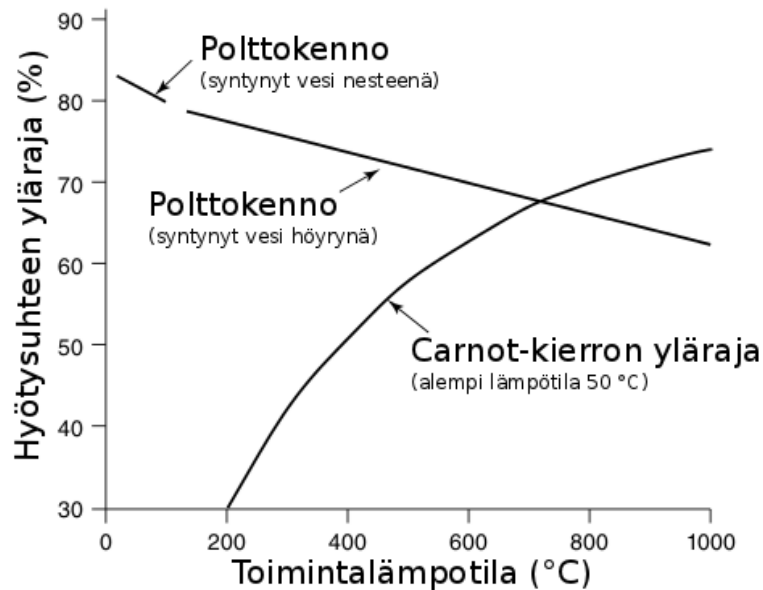
Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka vedyn ja hapen avulla muodostavat sähköä, lämpöä ja vettä. Polttokenno kuuluu galvaanisiin kennoihin, jotka muuttavat kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi. Galvaaniset kennot voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Ensimmäiseen kennoluokkaan kuuluvat paristot, joita ei voida ladata. Toisen luokan kennot ovat akkuja, joiden lataaminen on mahdollista. Kolmannen luokan kennot muuttavat kemiallista energiaa sähköenergiaksi niin pitkään kuin niihin syötetään reagoivia lähtöaineita. Polttokennot kuuluvat tähän kolmanteen luokkaan.

Kuvassa 7 on vertailtu perinteistä sähköntuotantoa ja polttokennon avulla tapahtuvaa sähköntuotantoa. Perinteisessä sähköntuotannossa käydään läpi kolme muuntoprosessia eli kemiallisen energian muunto lämpöenergiaksi, lämpöenergian muunto mekaaniseksi energiaksi ja mekaanisen energian muunto sähköenergiaksi. Polttokennoissa kemiallinen energia muuttuu suoraan sähköksi ja lämmöksi. [31]



Kuva 7. Sähköntuotanto lämpövoimakoneella ja polttokennolla [31].

Verrattaessa polttokennon ja perinteisen lämpövoimakoneen hyötysuhteita voidaan todeta, että polttokennon hyötysuhde ylittää lämpövoimakoneen (Carnot-kierto) hyötysuhteen laajalla käyttöalueella. Kuvassa 8 on esitetty polttokennojen ja Carnot-kierron teoreettiset maksimihyötysuhteet. Lämpövoimakoneilla maksimihyötysuhde saavutetaan, kun niitä käytetään maksimiteholla. Polttokennojen etuna on se, että korkea hyötysuhde saavutetaan jo matalilla käyttötehoilla. Lämpövoimakoneiden maksimaalinen hyötysuhde voidaan saavuttaa vasta erittäin korkeissa lämpötiloissa. Käytännössä tämä ei ole mahdollista, koska käytössä olevat materiaalit eivät näissä lämpötiloissa kestä. [32]



Kuva 8. Polttokennon ja Carnot-kierron teoreettiset hyötysuhteet. [32]

Suuri osa vedyn energiakäyttöön liittyvistä eduista saavutetaan ainoastaan polttokennojen avulla. Esimerkkejä näistä eduista ovat korkea hyötysuhde polttomoottoreihin verrattuna, ilman laatua heikentävien päästöjen puuttuminen sekä melun väheneminen. Tästä syystä polttokennot ovat merkittävässä asemassa vedyn energiakäytön yleistymisen kannalta. Ilman polttokennoja laajamittaisella ja toimivalla vedyn energiakäytöllä ei ole juurikaan mahdollisuuksia yleistyä ja toimia. Polttokennojärjestelmä voi olla päästötön tapa tuottaa sähköä, kunhan polttoaineena käytettävä vety on tuotettu päästöttömällä tavalla. Tietyissä polttokennotyypeissä voidaan käyttää myös muita polttoaineita kuin vetyä esimerkiksi metanolia. [31; 32]

4.3. Polttokennon toimintaperiaate

Polttokenno kostuu kahdesta elektrodista ja niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Negatiiviselle elektrodille eli anodille syötetään jatkuvasti kennon polttoainetta ja positiiviselle elektrodille eli katodille syötetään puolestaan hapetinta. Anodilla tapahtuvien reaktioiden seurauksena vapautuu elektroneja, jotka ohjataan ulkoisen kuorman kautta katodille, jolloin saadaan sähköä. Elektrolyytin tehtävänä on kuljettaa reaktion seurauksena syntyvät ionit siten, että elektrodeilla tapahtuvat reaktiot pysyvät tasapainossa.

Polttokennoja on useita erilaisia tyyppejä ja ne luokitellaan useimmiten toimintalämpötilan ja käytettävän elektrolyytin mukaan. Jokaisella polttokennotyypillä on omat etunsa ja heikkoutensa sekä myös sovelluskohteet, joissa niiden ominaisuuksia voidaan parhaiten hyödyntää. Matalan toimintalämpötilan polttokennot soveltuvat paremmin pieniin, kannettaviin ja liikuteltaviin sovelluksiin, joiden toimintakuntoon saattaminen ei saa viedä kauan aikaa. Matalan lämpötilan kennotyyppejä ovat polymeeri- (PEM), suora metanoli- (DMFC) ja alkalipolttokenno (AFC).

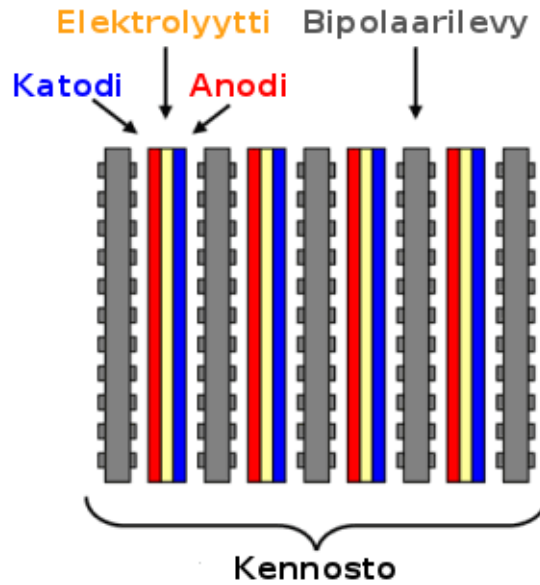
Korkean lämpötilan polttokennotyypit soveltuvat puolestaan parhaiten sovelluksiin, joissa tuotetaan jatkuvasti sähköä ja joissa kennon tuottama lämpö voidaan myös käyttää hyödyksi. Tämä parantaa kokonaishyötysuhdetta. Lämpöä voidaan hyödyntää joko järjestelmään integroidussa reformoinnissa tai lämpöä voidaan hyödyntää tilojen lämmittämiseen. Korkean lämpötilan kennotyyppejä ovat kiinteäoksidi- (SOFC), sulakarbonaatti- (MCFC) ja fosforihappokennot (PAFC). [34, s. 255]

Käytännössä polttokennojen toimintaan liittyy erilaisia häviöitä. Aktivoitumishäviöt ovat seurausta elektrodeilla tapahtuvien reaktioiden hitaudesta. Vuotovirtahäviöitä syntyy polttoaineen diffuntoituessa elektrolyytin läpi, jolloin polttoainetta kuluu ilman, että syntyisi sähkövirtaa. Polttoaineen hävikki on hyvin vähäistä, mutta vuotohäviöiden vaikutus on huomattava etenkin matalan lämpötilan kennojen tyhjäkäyntijännitteessä. Ohmiset häviöt ovat seurausta elektrodien liitosresistansseista sekä elektrolyytin läpi kulkeviin ioneihin kohdistuvasta vastuksesta. Konsentraatiohäviöt ovat seurausta reaktioainneiden konsentraation muutoksesta reaktioiden tapahtuessa. [32]

Yksittäinen polttokenno pystyy tuottamaan ainoastaan noin 0,7 V jännitteen. Pienestä jännitteestä johtuen on useita kennoja kytkettävä sarjaan, jolloin jännite kasvaa. Kennot kytketään sarjaan kytkemällä yksittäisten kennojen anodi ja katodi yhteen. Tällaista usean kennon sarjankytkentää kutsutaan kennostoksi eli stackiksi.

Kennojen välisten liitosten sähköjohtavuuden on oltava hyvä, sillä yksittäisten häviöiden yhteisvaikutus muodostuu merkittäväksi. Hyvän sähköjohtavuuden lisäksi kennojen hapen ja vedyn saanti täytyy turvata. Kennot kytketään toisiinsa käyttämällä bipolaari-levyjä, jotka on valmistettu hyvän sähköjohtavuuden omaavasta materiaalista ja joissa on urat hapen ja vedyn viemiseksi kennolle.

Hyvän sähköjohtavuuden lisäksi bipolaarilevyjen materiaalin tulee kestää korroosiota ja antaa kennostolle mekaanista tukea. Materiaalin hinnalla ja työstettävyydellä on merkittävä vaikutus materiaalin valinnassa, sillä bipolaarilevyt muodostavat merkittävän osan kennoston hinnasta. Käytettyjä materiaaleina ovat esimerkiksi grafiitti ja ruostumaton teräs. Kaikki ehdot täyttävän materiaalin valinta ei kuitenkaan ole helppoa, sillä esimerkiksi usein käytetyllä grafiitilla on ruostumatonta terästä parempi korroosion kestävyys, mutta sen on vaikeammin työstettävää. [32] Kuvassa 9 on esitetty periaatekuva bipolaarilevyjen avulla tehdystä polttokennostackista.

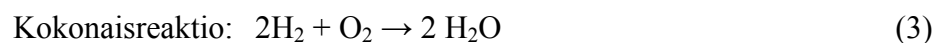
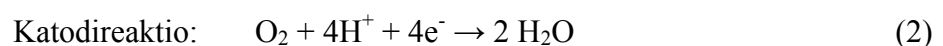
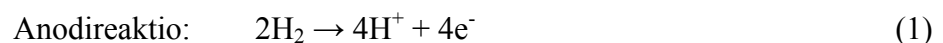


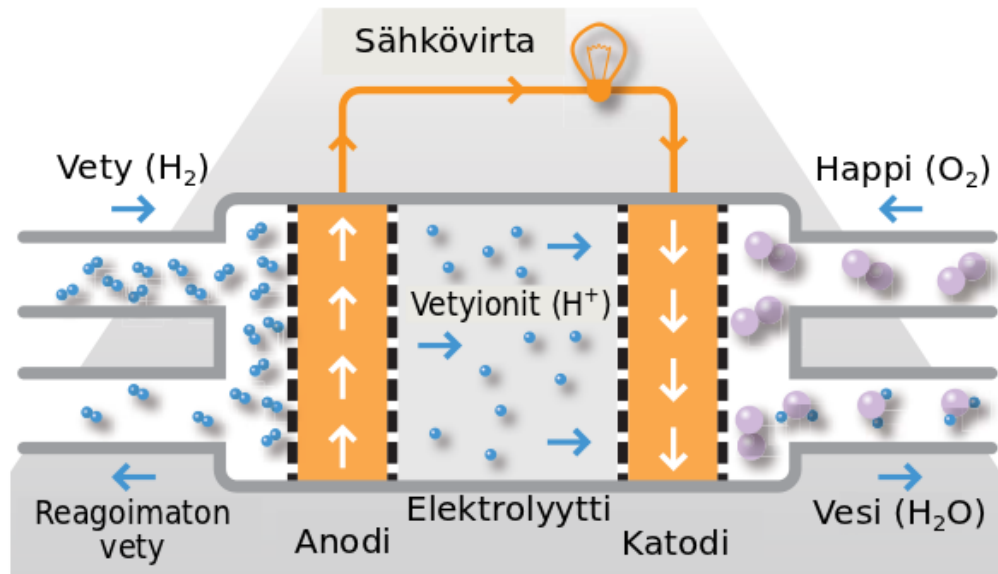
Kuva 9. Periaatekuva bipolaarilevyjen avulla tehdystä polttokenno stackista [33].

Ajoneuvoissa polttokennojärjestelmät on kehitetty lähes poikkeuksetta kiinteän polymeeripolttokennon eli PEM-kennon (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pohjalta. Syitä tähän ovat PEM-kennon kyky reagoida nopeasti muuttuviin kapasiteetin tarpeen muutoksiin, nopea käynnistysaika verrattuna muun tyyppisiin polttokennoihin, ideallinen toiminta osittaisilla kuormilla ja myös PEM-kennojen korkea kehitystaso. [34, s. 255]

PEM-kenno käyttää kiinteää polymeeriä elektrolyytinä ja tarvitsee anodille ja katodille platinakatalyytin. PEM-kennon kiinteä elektrolyytti tarjoaa etuja verrattuna kennotyyppeihin, joissa elektrolyytti on nestemäinen. Kun elektrolyytti on kiinteä, on anodin ja katodin tiivistäminen helpompaa, mikä säästää valmistuskustannuksissa. Muihin elektrolyytteihin verrattuna kiinteillä elektrolyyteillä on parempi korroosionkestävyys, eikä elektrolyytti myöskään rajoita kennon asentoa. Hyvällä korroosionkestävyydellä saavutetaan myös pidempi toiminta-aika. [35]

PEM-kennon anodilla syötettävä vetypolttoaine jakautuu vetyioneiksi ja elektroneiksi platinakatalyytin vaikutuksesta. Vetyionit kulkevat kostutetun elektrolyytin läpi katodille ja elektronit kulkevat ulkoisen kuorman läpi tuottaen sähkövirtaa. Happi, joka yleensä otetaan ilmasta, syötetään katodille, missä se yhdistyy kemiallisessa reaktiossa vetyionin ja kuormalta tulevien elektronien kanssa muodostaen vettä. Kuvassa 10 on periaatekuva PEM-kennon toiminnasta. PEM-kennon elektrodireaktiot ovat:



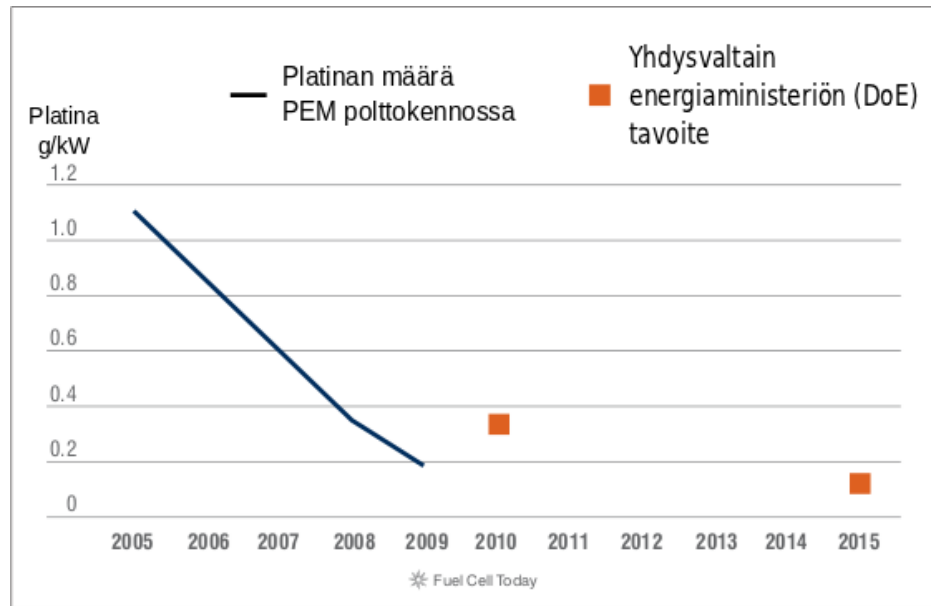


Kuva 10. PEM-kennon toimintaperiaate [35].

PEM-kenno tuottaa enemmän tehoa massaansa ja kokoonsa nähden kuin mikään muu kennotyyppi. Korkeasta tehotehdydestään johtuen kennostoista voidaan tehdä pieniä ja kevyitä. Myös mahdollisuus asentaa PEM-kennot mihin asentoon tahansa ja PEM-kennojen hyvä teho-paino suhde tekevät niistä sopivia ajoneuvosovelluksiin. [36]

PEM-kennon kannalta oikea kosteustasapaino sekä platinakatalyytti ja sen toimiminen ovat ensiarvoisen tärkeitä tekijöitä. Tarvittava platinakatalyytti on myös yksi PEM-kennojen hintaan voimakkaasti vaikuttava tekijä. Platina on erittäin kallista ja mahdollisuus tarvittavan platinamäärän vähentämiseen tai sen korvaamiseen halvemmalla katalyyttimateriaalilla vaikuttaa PEM-kennojen hintaan. Vuoden 2012 maaliskuussa (9.3.2012) platinan hinnaksi ilmoitettiin 1 683 \$/unssi (1 281 €/unssi). Kilohintana tämä tarkoittaa 54 110 \$/kg (41 194 €/kg). Viiden vuoden aikajaksolla (maaliskuu 2007–maaliskuu 2012) platinan hinta on alimmillaan ollut 770 \$/unssi ja korkeimmillaan 2 250 \$/unssi. [61]

PEM-kennon toiminnan kannalta platinakatalyyttiä pidetään kuitenkin ylivoimaisena vaihtoehtona, eikä sen korvaaminen muilla katalyyttimateriaaleilla ole lähitulevaisuudessa kovin todennäköistä. Sen sijaan PEM-kennoissa tarvittavan platinan määrää on tutkimus- ja kehitystyön tuloksena kyetty viime vuosina huomattavasti vähentämään (kuva 11). Fuel Cell Todayn vuoden 2011 teollisuuskatsauksen mukaan PEM-kennossa tarvittavan platinan määrä oli vuonna 2005 1,1 g/kW, kun se vuonna 2009 oli noin 0,2 g/kW. Vuoden 2015 tavoitteeksi on asetettu, että platinaa tarvittaisiin noin 0,1 g/kW. [37, s. 31]



Kuva 11. PEM-kennossa tarvittavan platinakatalyytin määrän kehittyminen [37].

US Department of Energyn julkaiseman polttokennoja koskevan vuoden 2010 markkinakatsauksen mukaan liikennekäyttöön tarkoitetun polttokennosysteemin hinta olisi 51 \$/kW, jos valmistusmäärät olisivat 500 000 kpl vuodessa. Vuodesta 2002 hintataso on pudonnut 80 %. Tavoitteena on saavuttaa hintataso 30 \$/kW vuoteen 2015 mennessä. Tällä hintatasolla polttokenno olisi kilpailukykyinen polttomoottorin kanssa. [38 s. 4]

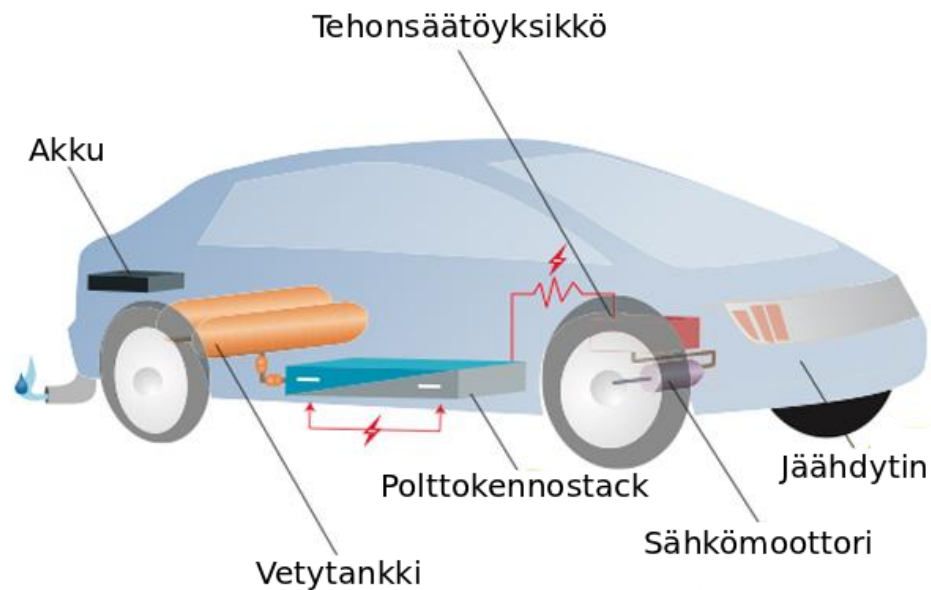
Vuodelta 2011 olevassa polttokennosysteemin kustannusanalyysissä on 80 kW järjestelmän kokonaiskustannuksiksi arvioitu 3 825 \$ eli noin 48 \$/kW, jos valmistusmäärä on 500 000 kpl vuodessa. Analyysin mukaan polttokennostackin osuus kokonaiskustannuksista on noin 45 %, ja noin 52 % kustannuksista tulee sen operointiin tarvittavista komponenteista (balance of plant). Systemin asennus ja testaus muodostavat loppuosan kustannuksista. Polttokennostackin kustannuksista 21 % muodostuu bipolaarilevyistä ja 72 % MEA:n (membrane electrode assembly) kustannuksista. MEA:n kustannuksista 50 % on platinakatalyytin kustannuksia. [39]

Polttokennojen hinnan ohella yksi merkittävä ongelma polttokennojen ajoneuvosovellusten kannalta on vedyn varastoinnin vaikeus. Useimmissa polttokennoajoneuvoissa puhdas vety varastoidaan paineistettuna kaasuna. Kaasumaisen vedyn energiatiheys tilavuuteen nähden on hyvin matala, joten sitä on vaikeaa varastoida riittävästi, jotta ajoneuvojen toimintasäde vastaisi esimerkiksi bensiiniä käyttävien autojen toimintasädettä.

4.4. Polttokennoauto

Polttokennoauto on sähköauto. Se eroaa ladattavista sähköautoista siinä, että polttokennoajoneuvot tuottavat tarvitsemansa sähköenergian polttokennon avulla. Autossa oleva polttokennosto (stack) muuttaa auton tankkiin varastoidun vedyn ilmasta peräisin ole-

van hapen avulla sähköksi, mikä käyttää auton voimanlähteenä toimivaa sähkömoottoria. Ulkoisesti nykypäivän polttokennoauto ei eroa tavallisesta autosta. [40] Tyypillisen polttokennoauton pääjärjestelmät on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Polttokennoauton pääjärjestelmät [41]

Vetyä käyttävän polttokennoajoneuvon pääkomponentit ovat vetytankit, polttokennostack, tehonsäätöyksikkö, sähkövarasto (akku) ja sähkömoottori. Polttokennoajoneuvon polttoaineena toimiva vety voidaan varastoida joko kaasuna tai nesteenä. Suurin osa nykypäivän polttokennoajoneuvoista varastoi vedyn kaasumaisessa muodossa. Jotta riittävä määrä energiaa voidaan varastoida kaasumaisen vedyn avulla, täytyy vedyn paineen olla korkea. Tällä hetkellä paineen maksimiarvo on 700 bar.

Ajoneuvon vetytankista vety johdetaan polttokennoon, missä se yhdessä ilman hapen kanssa aikaansaa tarvittavan sähköenergian. Polttokennon tuottama sähkö johdetaan tehonsäätöyksikölle, joka huolehtii auton käyttämän sähkön hallinnasta. Tehonsäätöyksikkö jakaa tuotetun sähkötehon auton eri järjestelmille, jotka käyttävät sähköä. Suurin osa sähköstä käytetään sähkömoottorissa, joka muuntaa polttokennon tuottaman sähkön auton liike-energiaksi.

Polttokennoajoneuvoissa sähkön varastointiin käytettävillä laitteilla saavutetaan monia etuja. Sähköä voidaan varastoida erillisiin akkuihin tai kondensaattoreihin. Näihin laitteisiin varastoitua sähköä käytetään tilanteissa, joissa auton tehonkulutus on erityisen suuri. Lisäksi akut toimivat sähkövarastoina, jolloin polttokennon toiminta ei ole suoraan riippuvainen ajotavasta. Erillisiin sähkövarastoihin voidaan varastoida myös jarrutusenergiaa. Sähköenergian varastoinnilla helpotetaan polttokennon toimintaa ja saadaan se kestävämpään pidempään. [41]

Autonvalmistajat eri puolella maailmaa ovat osoittaneet kiinnostusta vetykäyttöisiin polttokennoajoneuvoihin. Vuonna 2009 johtavat autovalmistajat Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors Corporation/Opel, Honda Motor Co., Ltd., Hyundai Mo-

tor Company, Kia Motors Corporation, the alliance Renault SA and Nissan Motor Corporation and Toyota Motor Corporation tekivät yhteisen aiesopimuksen polttokennoajoneuvojen kehittämisestä ja markkinoille saattamisesta. Autonvalmistajat ennakoivat, että vuodesta 2015 lähtien polttokennoautojen määrä olisi huomattava. Jokaisella autonvalmistajalla on oma strategiansa ja aikataulunsa polttokennoajoneuvojen markkinoille saattamisesta. [10; 42]

Polttokennoja koskevan markkinakatsauksen mukaan vuoden 2010 aikana eri autovalmistajat ilmoittivat suunnitelmistaan koskien polttokennoautojen kaupallista tuotantoa. Esimerkiksi Hyundai ilmoitti vuotuisen tuotantotavoitteensa olevan 2 000 polttokennoautoa vuoteen 2012 tai 2013 mennessä ja 10 000 polttokennoautoa vuoteen 2015 mennessä. Hintatavoitteeksi on asetettu alle 50 000 \$. Daimler aloitti Mercedes-Benz B-Class F-Cell -mallin tuotannon ja suunnittelee tuotannon kasvattamista kymmeniin tuhansiin 2015–2017 mennessä. [38]

Eurooppaa koskeva perusteellinen vertailu eri voimalaitteilla toimivien autojen ympäristöystävällisyydestä, suorituskyvystä ja taloudesta on esitetty McKinsey & Companyn tekemässä tutkimuksessa [15], joka perustuu yli 30:ltä eri intressitahoja edustavilta toimijoilta saatuihin tietoihin. Intressitahot edustivat mm. autonvalmistajia, laite-toimittajia, energiayhtiöitä, vetyä toimittavia kaasuyhtiöitä ja järjestöjä. Vertailussa olivat mukana vetyä käyttävät polttokennoajoneuvot, sähköautot ja polttomoottorilla varustetut autot. Tutkimusraportissa todetaan, että sekä sähköautojen että polttokennoautojen avulla voidaan vähentää liikenteen hiilidioksidipäästöjä ja muita haitallisia päästöjä, kunhan myös sähkön- ja vedyntuotannossa kiinnitetään huomiota hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseen. [15]

McKinsey & Companyn raportin mukaan polttokennoajoneuvojen suorituskyky (esimerkiksi kiihtyvyys, käyttösäde yhdellä tankkauksella, tankkaukseen kuluva aika) on vertailukelpoinen perinteisten polttomoottoriautojen kanssa. Ne voivatkin olla käyttökelpoinen vaihtoehto perinteisille autoille keskikokoisten ja isojen henkilöautojen luokassa, kun ajomatkat ovat keskipitkiä tai pitkiä. Keskikokoiset ja isot henkilöautot edustavat noin puolta henkilöautokannasta ja ne aiheuttavat noin 75 % hiilidioksidipäästöistä. Polttokennoajoneuvojen yleistyminen voi siis huomattavasti pienentää henkilöautojen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä, koska polttokennoautot itsessään eivät aiheuta lainkaan päästöjä (eli niiden tank-to-wheel hiilidioksidipäästöt ovat nolla). Kokonaisuuden kannalta on kuitenkin tarkasteltava auton lisäksi myös polttoaineen tuotannossa ja kuljetuksessa syntyviä päästöjä eli ns. well-to-wheel hiilidioksidipäästöjä. [15]

EU:n seitsemänteen puiteohjelmaan kuuluvassa tutkimushankkeessa Technology opportunities and strategies towards climate friendly transport (TOSCA) on vaihtoehtoja henkilöautojen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi tarkasteltu teknisistä, taloudellisista ja sosiaalisista näkökulmista. Hankkeen puitteissa julkaistussa teknis-taloudellisessa analyysissä polttokennoauton energiankulutuksen on vuonna 2015 arvioitu olevan välillä 80–120 MJ/100 km ja well-to wheel hiilidioksidipäästöjen 72,5 gCO₂-ekv/km. Vastaavasti vuoden 2010 bensiinikäyttöiselle autolle annetaan energiaku-

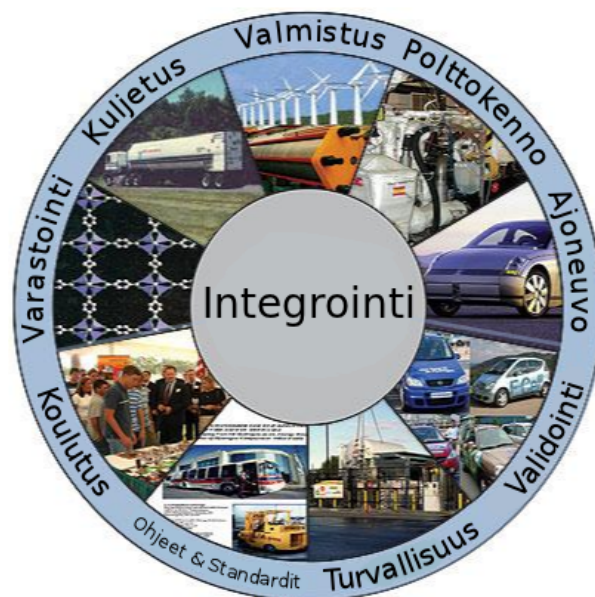
lutukseksi 177–232 MJ/100 km ja well-to-wheel hiilidioksidipäästöiksi 171 gCO₂-ekv/km. [43] Tämän arvion mukaan polttokennoauton energiatehokkuus on parempi ja koko energiantuotantoketjun hiilidioksidipäästöt huomattavasti pienemmät kuin bensiinikäyttöisellä polttomoottoriautolla.

4.5. Edellytykset vetykäyttöisten polttokennoajoneuvojen yleistymiselle

Jotta vedyn käyttö liikenteen energialähteenä olisi mahdollista ja voisi yleistyä, markkinoille tarvitaan vetyä käyttäviä ajoneuvoja ja niiden tarpeisiin soveltuva vetyinfrastruktuuri. Tällä tarkoitetaan vedyn tuotantoa liikennekäyttöön, sekä vedyn jakelun ja tankkausmahdollisuuksien järjestämistä siten, että se mahdollistaa ajoneuvojen käytön. Lisäksi on kyettävä herättämään kuluttajien kiinnostus ostaa ja käyttää polttokennoajoneuvoja.

Ongelmalliseksi tilanteen tekee se, että edellä kuvatut tekijät ovat voimakkaasti riippuvaisia toisistaan, mutta niihin liittyvät ratkaisut ja päätökset eivät ole minkään yksittäisen toimijatahon hallinnassa. Näin ollen niiden kehittäminen ei välttämättä etene toivotussa järjestyksessä ja aikataulussa. Jos vetyä käyttäviä autoja ei ole markkinoilla, ei kiinnostus toimivan vetyinfrastruktuurin rakentamiseen ole kovin suuri, eikä ilman infrastruktuuria kannata kehittää, myydä tai osta laitteita esimerkiksi autoja, jotka toimiakseen tarvitsevat vetyä.

Polttokennoajoneuvojen yleistymiseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa esimerkiksi teknisiin, taloudellisiin ja yleiseen hyväksyttävyyteen liittyviin tekijöihin. Eri osaluokkiin liittyvät tekijät ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja vaikuttavat toisiinsa. Kuvassa 13 on esitetty, mistä eri osa-alueista muodostuu se kokonaisuus, joka luo mahdollisuudet vetyä käyttävien polttokennoajoneuvojen yleistymiselle.



Kuva 13. Polttokennoajoneuvojen yleistymiseen vaikuttavia tekijöitä. [88]

Teknisillä tekijöillä tarkoitetaan esimerkiksi polttokennoihin, ajoneuvoihin, vedyn tuotantoon ja jakelun toteuttamiseen liittyviä tekijöitä. Taloudellisilla tekijöillä tarkoitetaan vetyinfrastruktuurin rakentamiseen liittyviä kustannuksia sekä ajoneuvojen hankinnan ja käytön kustannuksia. Yleinen hyväksyttävyyden liittyä esimerkiksi siihen, millainen käsitys ihmisillä on polttokennoajoneuvojen ympäristöystävällisyydestä ja miten tärkeänä ympäristöystävällisyyttä pidetään. Hyväksyttävyyteen vaikuttaa voimakkaasti myös se, miten ihmiset suhtautuvat vetyyn ja sen käyttöön osana omaa arkipäiväänsä. Merkittävä tekijä tässä on ihmisten käsitys esimerkiksi siitä, miten turvallista on vedyn säilytys auton tankissa tai miten turvallista on ajoneuvon tankkaus vetytankkausasemalla.

Vetykäyttöisten ajoneuvojen markkinoille tulon ja yleistymisen teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä ovat esimerkiksi [20]:

- Vetyä käyttävien autojen ja niihin kuuluvien laitteiden on oltava hinnan, kestävyden, luotettavuuden, turvallisuuden ja käyttömukavuuden suhteen vertailukelpoisia perinteisten ratkaisujen kanssa.
- Tehokkaasti, turvallisesti ja ympäristöystävällisesti tuotetun vedyn tuotanto- ja jakelukustannukset on saatava laskemaan sellaiselle tasolle, että vedyn käyttö on kustannuksiltaan vertailukelpoista perinteisten polttonesteiden kanssa.
- Autossa olevan vetymäärän on mahdollistettava samaa suuruusluokkaa oleva käyttösäde, kuin mihin bensiini/dieselmäärällä ajoneuvoilla on totuttu. Lisäksi on luotava toimiva ja riittävän tiheä vetytankkausasemien verkosto.

Kuten edellä esitettiin, on useilla autovalmistajilla jo olemassa demonstraatio-, koekäyttö- ja testikäytössä olevia polttokennoajoneuvoja. Näiden avulla pyritään osoittamaan, että polttokennoajoneuvot ovat suorituskyvyltään, käyttömukavuudeltaan ja kustannuksiltaan vertailukelpoisia perinteisten autojen kanssa. Elleivät nämä edellytykset täyty on kuluttajien mielenkiintoa vaikea tai mahdotonta herättää. McKinsey & Companyn tekemässä tutkimuksessa todetaan polttokennoajoneuvojen tekniikassa tapahtuneen merkittävää kehitystä useilla keskeisillä osa-alueilla. [15] Esimerkkeinä mainitaan yhden tankkauksen mahdollistaman käyttösäteen kasvaminen vastaamaan perinteisen auton käyttösädetä. Samoin polttokennoautojen kylmäkäynnistysominaisuudet (-25 °C) ja niiden kestävyys ovat parantuneet kennostojen ja materiaalitekniikan kehittymisen myötä. Selvä on, että kaupallistamisen alkuvaiheessa polttokennoajoneuvot ovat kalliimpia kuin perinteiset autot, koska suurten tuotantomäärien mukanaan tuomaa etua ei alkuvaiheessa saavuteta. Jos niin halutaan, on tätä hintaeroa mahdollista kompensoida erilaisilla rahoitukseen, verotukseen jne. liittyvillä ratkaisuilla. Tämä vaatii myös muiden tahojen kuin autonvalmistajien osallistumista. [38]

Polttokennoajoneuvojen tullessa laajasti markkinoille on välttämätöntä, että myös toimiva vetyinfrastruktuuri on olemassa. Se käsittää laitteet ja järjestelmät, jotka tarvitaan polttoaineena toimivan vedyn tuotantoon, jakeluun, varastointiin ja tankkaukseen. Kokonaan uuden infrastruktuurin muodostaminen ja rakentaminen on kuitenkin hidasta

ja kallista, eikä investointien tekeminen ole houkuttelevaa tilanteessa, jossa varmuutta toiminnan kannattavuudesta ja investoinnin takaisinmaksusta ei ole. Tämä on tyypillinen piirre lähes kaikille energiainvestoinneille. Eri puolilla maailmaa on jo käytössä vedyn liikennekäyttöön tarkoitettua infrastruktuuria, mutta se ei laajuudeltaan ja kattavuudeltaan riitä vastaamaan polttokennoajoneuvojen yleistymisen tarpeita. Kokemuksia vedyn käytöstä ajoneuvoissa kuitenkin siis jo on.

Eri voimalaitteilla (polttokenno, sähkö, polttomoottori) toimivien autojen taloutta on McKinsey & Companyn raportissa arvioitu omistamisen aikaisten kokonaiskustannusten avulla (total cost of ownership TCO). Tämä muodostuu auton hankintahinnasta ja sen elinaikaisista käyttökustannuksista. Näihin kuuluvat ylläpito- ja huoltokustannukset sekä polttoainekustannukset, joissa on otettu huomioon vetyinfrastruktuurin rakentamisesta aiheutuvat pääomakustannukset ja varsinaiset tuotanto- ja jakelukustannukset. Omistamisen aikaisten kokonaiskustannusten perusteella tarkasteltuna polttokennoajoneuvojen on arvioitu olevan muilla voimalaitteilla toimivia autoja edullisempia vuoden 2030 jälkeen. Tätä ennen omistamisen aikaisten kokonaiskustannusten korkeus muihin verrattuna johtuu lähes yksinomaan polttokennoajoneuvon korkeammasta hankintahinnasta. Vetyinfrastruktuurin rakentamisen aiheuttamien kustannusten on arvioitu vastaavan noin 5 % polttokennoautojen hinnasta, kun oletetaan polttokennoautoja olevan noin 25 % autokannasta. [15]

Puhtaasti tekniikkaan ja talouteen liittyvien tekijöiden lisäksi vetyä käyttävien sovelusten yleistymiseen tarvitaan toimia, joiden avulla varmistetaan ihmisten käsitys vedyn käytön yleisestä hyväksyttävyydestä ja turvallisuudesta. Nämä toimet käsittävät esimerkiksi vedyn tankkaukseen ja tankkausasemiin liittyvän standardoinnin ja turvallisuuden varmistamisen sekä vetyyn ja sen käyttöön liittyvän koulutuksen ja opastuksen. McKinsey & Companyn raportissa todetaan polttokennoajoneuvoihin ja vedyn käyttöön liittyvän standardoinnin edenneen, mikä helpottaa esimerkiksi turvallisuuteen liittyvien asioiden huomioon ottamista ja varmistamista maailmanlaajuisesti yhdenmukaisella tavalla. [15]

Vuoden 2011 teollisuuskatsauksessaan FuelCellToday [37, s.19] tarkastelee henkilöautojen ohella erilaisia materiaalinkäsittelyyn ja -siirtoon tarkoitettuja työkoneita (trukit, konttilukit jne.) sekä linja-autoja mahdollisina liikkuvina polttokennosovelluksina. Lisäksi mainitaan erilaiset sotilaskäyttöön tarkoitettut miehittämättömät ilma- tai vesiajoneuvot, skootterit ja veneet.

5. VEDYN TUOTANTO JA KULJETUS

Vetyä ei esiinny luonnossa puhtaana aineena, vaan se on aina sitoutuneena yhdisteissä esimerkiksi erilaisissa hiilivedyissä ja vedessä. Nämä ovat myös tyypillisimmät vedyn valmistuksen lähtöaineet. Vedyn tuotanto teollisessa mittakaavassa on tunnettua tekniikkaa, sillä vetyä käytetään maailmalla suuria määriä esimerkiksi öljynjalostuksessa, kemianteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa ja metallurgisessa teollisuudessa. Vetyä syntyy myös tiettyjen kemianteollisuuden prosessien sivutuotteena.

5.1. Tuotantoprosessit

Vedyn tuotantoon on monia eri mahdollisuuksia ja teknologioita. Vedyn tuotantomenetelmät on kuvassa 14 jaettu termisiin, elektrolyyttisiin ja fotolytyttisiin menetelmiin. Termisistä prosesseista höyryreformointi, osittaihapetus ja kaasutus vaativat lämpöenergiaa, jotta vety saadaan vapautumaan lähtöaineina käytettävistä hiilivedyistä. Termokemiallisissa menetelmissä vesi sidotaan sellaisiin kemiallisiin yhdisteisiin (esim. jodi-rikki, kalsium-bromi), joista vety saadaan erotetuksi riittävän korkeissa lämpötiloissa. Elektrolyysissä vesi hajotetaan sähkövirran avulla vedyksi ja hapeksi. Vedyn fotolytyttinen valmistus perustuu auringon säteilyenergian hyväksikäyttöön. [40, s. 35]

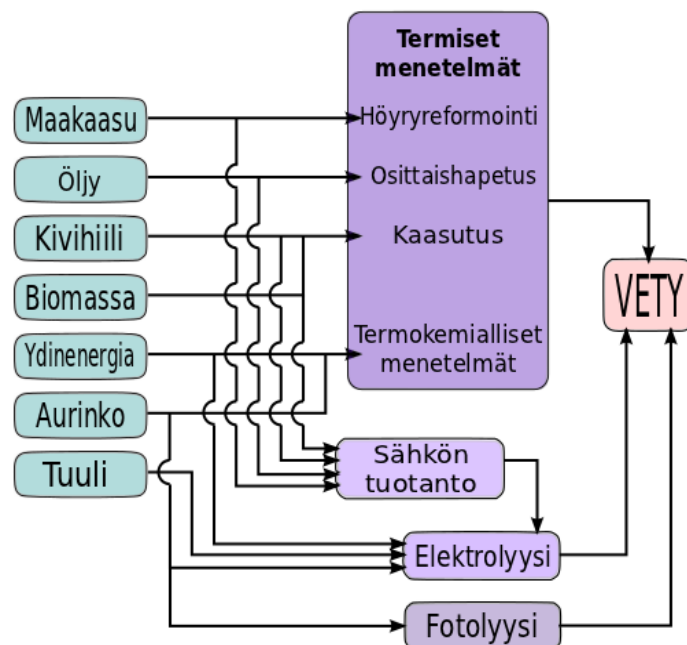
Kun vetyä valmistetaan fossiilisista polttoaineista, muodostuu tuotantoprosessissa hiilidioksidia. Jotta vetyä voitaisiin valmistaa fossiilisista polttoaineista aiheuttamatta hiilidioksidipäästöjä ilmakehään, tulisi hiilidioksidi kyetä ottamaan talteen ja varastoitmaan. Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (Carbon Capture and Storage eli CCS) pidetään merkittävänä mahdollisuutena vähentää suurten pistelähteiden kuten teollisuuslaitosten ja voimalaitosten hiilidioksidipäästöjä tulevaisuudessa. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on laajan tutkimuksen kohteena maailmanlaajuisesti.

CCS perustuu hiilidioksidin erottamiseen prosessi- tai savukaasuista, hiilidioksidin puhdistamiseen, kokoon puristamiseen ja kuljettamiseen pitkäaikaiseen säilytykseen soveltuvaan paikkaan. Varteenotettavimmat kuljetusvaihtoehdot hiilidioksidille ovat putkikuljetus ja/tai nestemäisen hiilidioksidin laivakuljetus. Hiilidioksidivarastoiksi soveltuvat lähinnä käytetyt tai hiipuvat öljy- ja maakaasulähteet sekä maanalaiset suolavesiesiintymät. CCS:n haasteisiin kuuluvat runsaasti energiaa kuluttavat hiilidioksidin talteenotto prosessit, jotka huonontavat esimerkiksi voimalaitosten hyötysuhteita huomattavasti. Myöskään hiilidioksidin pitkäaikainen varastointi ei ole yksinkertaista. CCS:n eri teknologiaosa-alueista, eli hiilidioksidin talteenotosta, kuljetuksesta ja varastoinnista, löytyy useita demonstraatioprojekteja maailmassa, mutta vielä ei ole toteutettu

yhtäkään projektia, jossa koko ketjua talteenotosta varastointiin sovellettaisiin täydessä teollisuusmittakaavassa. [74]

Hiilidioksidipäästöjen minimoimisen kannalta parhaita vedyn tuotantotapoja ovat sellaiset, jotka ovat kestäväen kehityksen mukaisia ja perustuvat uusiutuvien energialähteiden käyttöön. Veden elektrolyysi voi käytettävän sähkön tuotantotavasta riippuen tarjota mahdollisuuden tuottaa vetyä ilman hiilidioksidipäästöjä. Esimerkkinä olkoon vedyn elektrolyyttinen valmistus käyttäen tuulivoimalla tuotettua sähköä energialähteenä.

Maakaasun höyryreformointi, kivihiilen kaasutus ja veden elektrolyysi ovat vedyn valmistustapoina teollisen mittakaavan käytössä ympäri maailmaa. Maailmanlaajuisesta vedyntuotannosta noin puolet perustuu maakaasuun, noin 30 % öljyyn, hiukan alle 20 % kivihiileen ja noin 5 % veden elektrolyysiin. Maakaasun höyryreformointi on eniten käytetty ja myös taloudellisesti edullisin tapa tuottaa vetyä. Lisäksi sen tuottamat hiilidioksidipäästöt ovat fossiilisia raaka-aineita hyödyntävistä vedynvalmistustavoista pienimmät. NykYTEKNIKALLA maakaasun höyryreformoinnissa muodostuu 10 kg hiilidioksidia tuotettua vetykiloa kohti. Käytettäessä tuotantoprosessina kivihiilen kaasutusta muodostuu hiilidioksidia 19 kg tuotettua vetykiloa kohti. Jotta hiilen käyttö vedyn tuotannossa voisi yleistyä, on kehitettävä suureen mittakaavaan soveltuvia hiilidioksidin talteenottojärjestelmiä.[44; 45 s. 305]



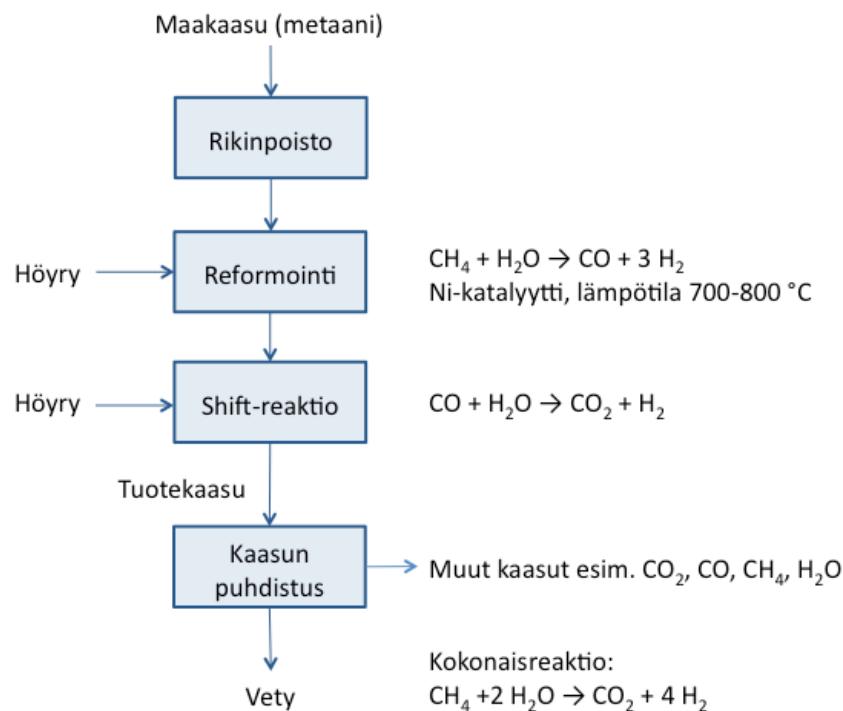
Kuva 14. Vedyn tuotantoteknologioita ja mahdollisia raaka-aineita [40].

On arvioitu, että maakaasun hinnan noustessa tulee hiilen kaasutus edullisimmaksi vedyn tuotantotavaksi vuoden 2030 jälkeen. Biomassan kaasutuksen ennustetaan muodostuvan edullisimmaksi uusiutuvaa energialähdettä käyttäväksi vedyn tuotantotavaksi. [18]

Veden elektrolyysi on höyryreformointia kalliimpi vedyn tuotantotapa, eikä se kykene kilpailemaan suurissa tuotantolaitoksissa metaanin höyryreformoinnille. Elektrolyysiä käytetään kuitenkin silloin kun halutaan saada erittäin puhdasta vetyä tai kun vedyn tarve on niin pieni, että sen tuottaminen höyryreformoinnilla tai kuljettaminen kauempaa on liian kallista. Elektrolyysillä tuotettuun vetyyn kohdistuvat hiilidioksidipäästöt riippuvat yksinomaan elektrolyysissä käytetyn sähkön alkuperästä.

5.1.1. Vedyn valmistus maakaasusta

Vetyä voidaan valmistaa maakaasusta (pääasiassa metaania) höyryreformoinnilla, osittaishapetuksella tai autotermisellä reformoinnilla. Vedyn valmistus maakaasun höyryreformoinnilla tapahtuu kuvan 15 prosessivaiheiden mukaisesti. Ensimmäisessä vaiheessa maakaasusta poistetaan rikkiyhdisteet. Maakaasu reformoidaan sekoittamalla siihen vesihöyryä, jolloin nikkelikatalyytin avulla saadaan hiilimonoksidia (CO) ja vetyä. Ihanteelliset olosuhteet höyryreformoinnille ovat 3–25 bar ylipainetta ja 700–800 °C lämpötila. Reaktio vaatii tapahtuakseen runsaasti lämpöä (206 kJ/mol metaania). Muodostuneessa synteetikaasussa (vedyn ja hiilimonoksidin seos) oleva hiilimonoksidi muutetaan hiilidioksidiksi katalyyttisessä shift-reaktiossa. Reaktiossa hiilimonoksidi reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen lisää vetyä ja hiilidioksidia. [44 s. 25; 46 s. 31]



Kuva 15. Prosessivaiheet tuotettaessa vetyä maakaasun höyryreformoinnilla [46].

Viimeisessä prosessivaiheessa vety puhdistetaan. Vedyn puhdistus tapahtuu tyypillisesti PSA-yksikössä (Pressure Swing Adsorber). Johtamalla tuotekaasu PSA-yksikön läpi saadaan vety erotettua, sillä muut tuotekaasuvirrassa olevat kaasut (höyry, hiilimonoksidi, hiilidioksidi ja metaani) adsorboituvat puhdistuksessa käytettävän molekyyli-*liseulan* massaan. [46 s. 31]

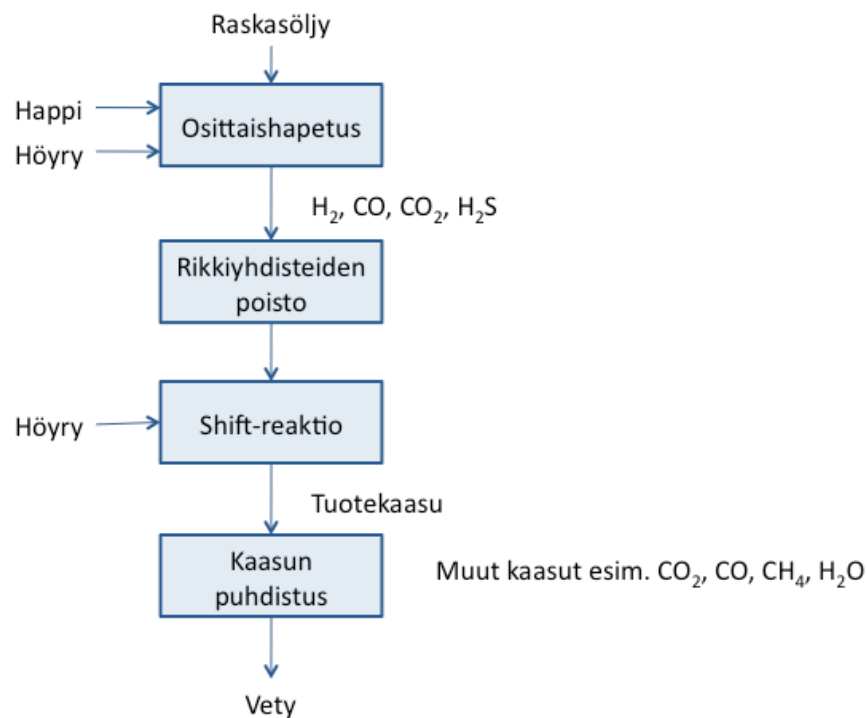
Metaanin osittaishapetus on eksoterminen prosessi, missä metaani reagoi hapen kanssa muodostaen synteetikaasua (vedyn ja hiilimonoksidin seos) reaktion 4 mukaisesti. Prosessin ongelmana on hiilen muodostuksesta aiheutuva katalyytin tehon heikkeneminen ja räjähdysvaara lähtöaineena käytettävien kaasujen sekoituksessa.



Metaanin autoterminen reformointi yhdistää metaanin höyryreformoinnin ja osittaishapetuksen. Prosessissa osa hiilimonoksidista muutetaan shift-reaktiossa hiilidioksidiksi. Höyryn käyttö pienentää hiilen muodostuksesta aiheutuvia ongelmia ja myös räjähdysvaaraa. Oikeilla metaanin, ilman ja höyryn syöttösuhteilla osittaishapetusreaktio tuottaa kaiken höyryreformointireaktion tarvitseman energian. [46, s. 31]

5.1.2. Vedyn valmistus raskasöljystä tai kivihielestä

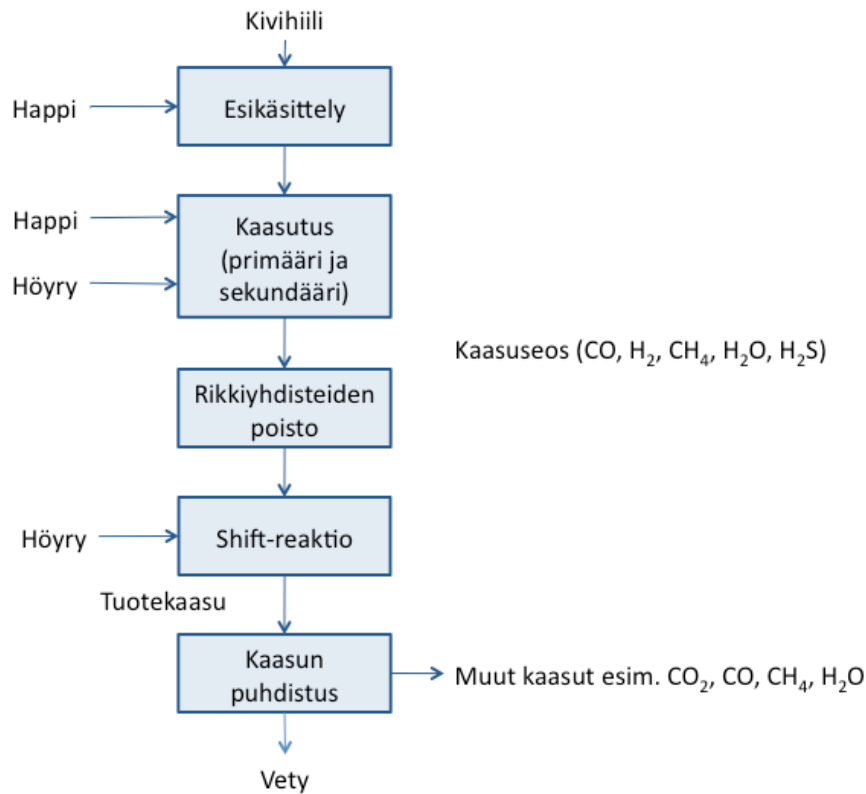
Vedyn valmistus raskasöljystä tapahtuu osittaishapetuksella, missä öljy reagoi hapen ja vesihöyryn kanssa 1 200–1 500 °C lämpötilassa ja 30–80 bar paineessa. Kuvassa 16 on kaavio vedyn tuottamisesta raskasöljystä.



Kuva 16. Prosessivaiheet tuotettaessa vetyä raskasöljyn osittaishapetuksella [46].

Höyryn avulla raskasöljyn pitkät hiilivetyketjut katkaistaan eli krakataan. Hiilivetyketjujen reagoissa kontrolloidun happimäärän (happea vähemmän kuin stökiometrisen eli reaktion kannalta ihanteellinen määrä) kanssa, muodostuu synteetikaasua (vedyn ja hiilimonoksidin seos). Synteetikaasun reagoissa höyryn kanssa (shift-reaktio) hiilimonoksidista muodostuu hiilidioksidia ja vetyä. Ennen shift-reaktiota on kaasusta poistettava rikkiyhdisteet, koska ne pilaavat reaktiossa käytettävän katalyytin. Vedyn erotus tuotekaasusta tapahtuu samalla tavalla kuin edellä kohdassa 5.1.1 on esitetty. [46]

Vedyn valmistus kivihiilestä tapahtuu kaasuttamalla. Kaasutus voi olla joko ilmanpaineinen tai paineistettu prosessi. Esimerkki kaasutusprosessin päävaiheista on kuvassa 17.



Kuva 17. Prosessivaiheet tuottaessa vetyä kivihiilen kaasutuksella [46].

Kivihiilen kaasutus vaatii raaka-aineen jauhamisen ja homogoinnin. Esikäsitteilyssä polttoainepartikkeli lämpenee ja siitä poistuu yhdisteitä, jotka aiheuttaisivat partikkelien yhteen kasautumista (agglomeroitumista) ja kaasuttimen likaantumista. Esikäsitteilyä seuraavassa primäärikaasutusvaiheessa kivihiili reagoi hapen ja höyryn kanssa ja siitä muodostuu useiden eri kaasukomponenttien (synteesikaasu, metaani, höyry, hiilidioksidi ym.) seos. Sekundäärikaasutusvaiheessa jäännöshiili reagoi vesihöyryn kanssa tuottaen synteesikaasua. Kaasutuslämpötila on noin 900–1 000 °C.

Hiilimonoksidia ja vetyä tuottavat kaasutusreaktiot ovat endotermisiä, joten prosessin vaatima lämpö on tuotettava joko osittaisella jäännöshiilen palamisella tai ulkopuolisella lämmöntuonnilla. Tavallisin tapa on toteuttaa osittainen palaminen ilman tai hapen avulla. Kaasutuskaasu konvertoidaan hiilidioksidiksi ja vedyksi shift-reaktion avulla. Ennen tätä kaasusta on poistettava rikkiyhdisteet. Shift-reaktorista poistuva tuotekaasu puhdistetaan, kuten edellä on kuvattu. [46; 40 s. 44]

5.1.3. Vedyn valmistus biomassan kaasutuksella

Vetyä voidaan valmistaa myös biomassaa kaasuttamalla. Prosessina se on hyvin samanlainen kuin vedyn valmistus kivihiilen kaasutuksella. Kaasuttimessa kiinteä biomassamuunnetaan kaasuiksi (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , kevyet hiilivedyt) ja tervoiksi 800–

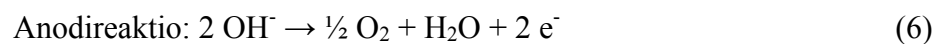
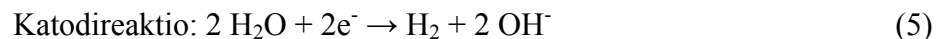
1200 °C lämpötilassa. Tuotekaasu sisältää myös polttoaineesta peräisin olevia epäpuhtauksia, kuten rikki- ja typpiyhdisteitä, hiukkasia, raskasmetalleja sekä klooriyhdisteitä ja alkalimetalleja.

Tuotekaasun koostumus riippuu suuresti kaasutusmenetelmästä ja prosessiolosuhteista. Muodostuvan tervan määrää pitää kontrolloida, jotta mekaanisten laitteiden toimintavarmuus pysyy hyvänä ja jotta voidaan varmistaa vedyn erotukseen ja puhdistukseen liittyvien prosessivaiheiden onnistuminen Tuotekaasun epäpuhtaudet on poistettava järeällä kaasunpuhdistuslaitteistolla (suodattimet, pesurit, katalyytit ym.), jotta haluttu tuotekaasu (CO ja H₂) saadaan jatkokäyttöön. Koska vedyn osuus biomassassa on pienempi kuin esimerkiksi maakaasussa, on teoreettinenkin vetysaanto biomassan kaasutuksessa pienempi. Ongelmia aiheuttaa myös biomassan heterogeeninen koostumus ja korkea vesipitoisuus. Toisaalta biomassassa on kasvaessaan sitonut ilmakehän hiilidioksidia, jolloin hiilidioksidin nettopäästöjä ei ole. [40; 47]

5.1.4. Vedyn valmistus veden elektrolyysillä

Veden elektrolyysi on vastakkainen reaktio polttokennossa tapahtuvalle reaktiolle. Elektrolyysissä vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähköän avulla. Veden elektrolyysillä on mahdollista tuottaa vetyä ilman hiilidioksidipäästöjä, mikäli elektrolyysissä käytetty sähkö on tuotettu päästöttömästi.

Elektrolyysissä veteen johdetaan elektrodien kautta sähkövirtaa, jonka seurauksena vesimolekyylien vety pelkistyy katodilla ja vesimolekyylien happi hapettuu anodilla seuraavien reaktioiden mukaisesti (käänteisiä polttokennoreaktioiden kanssa):

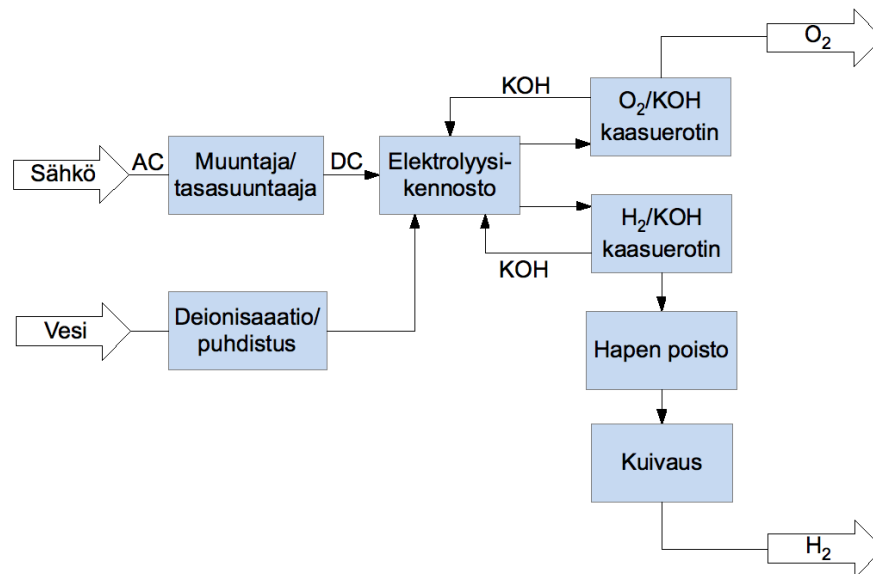


Vedyn tuotanto veden elektrolyysillä vaatii enemmän energiaa tuotettua vetymäärää kohti kuin vedyn tuotanto hiilivedyistä. Elektrolyysin etuina voidaan toisaalta pitää sitä, että vedyntuotannon lähtöaineena on vesi, jonka saatavuus on parempi kuin hiilivetyjen. Elektrolyysiä pidetään myös mahdollisuutena hajautettuun vedyntuotantoon esimerkiksi tankkausasemilla. [44, s. 40]

Käytännössä vedyn tuotanto tapahtuu ns. elektrolyyserissä, jossa elektrodien (anodi ja katodi) kautta johdettu sähkövirta hajottaa veden edellä esitettyjen reaktioiden mukaisesti. Elektrolyysin sähkönsäilytystä parannetaan elektrodien välissä olevalla katalysoidulla (katalyyteillä varustetulla) elektrolyytillä. Elektrolyytin tyypin mukaan puhutaan esim. alkali-elektrolyysistä, jossa elektrolyytti-vesiliuoksessa on alkalisuoloja (esim. kaliumhydroksidi), tai membraaneelektrolyysistä (PEM, polymer exchange membrane), jossa elektrolyytinä toimii polymeerikalvo. Elektrolyysin tehokkuutta voidaan parantaa nostamalla prosessin lämpötilaa ja painetta. Korkean lämpötilan ns. höyryelektrolyysissä vesihöyry voidaan hajottaa vedyksi ja hapeksi elektrolyyserissä, jossa on keraami-

perusteinen (zirkonium, yttrium) korkeita lämpötiloja sietävä ja hyvin happi-ioneja johdava elektrolyytti. [48]

Yleisimmin käytössä on alkalielektrolyysi. Myös PEM -elektrolyysi on kehittymässä voimakkaasti. Alkalielektrolyysit soveltuvat hyvin paikallisiin sovelluksiin, joita ei ole tarkoitus siirtää paikasta toiseen. Niiden toimintapaine voi olla noin 25 bar. Alkalielektrolyysin päävaiheet on esitetty kuvassa 18. [49, s. 11]



Kuva 18. Alkalielektrolyysin päävaiheet. [49]

Elektrolyysillä valmistetaan vain noin 5 % maailmassa tuotetusta vedystä. Prosessissa voidaan valmistaa erittäin puhdasta vetyä esim. lääketieteellisiin tarkoituksiin ja kaupallisia elektrolyysereitä on saatavissa muutaman litran tuntituotannosta aina 1 000 m³ tuotantoon. Hyötysuhteet vaihtelevat tyypillisesti välillä 40–80 %, ja parhaimmillaan yksi m³ vetyä syntyy noin 5 kWh energialla. [48]

5.1.5. Vedyen muut valmistustavat

Vetyä voidaan valmistaa myös hajottamalla vettä korkean lämpötilan avulla. Vesi hajoaa happi- ja vetymolekyyleiksi 2 500–3 000 °C lämpötilassa. Lämpötilaa voidaan alentaa käyttämällä katalyyttejä. Veden hajottamiseen tarvittava lämpötila voidaan tuottaa joko ydinreaktorin tai auringon avulla. Käytettäessä auringon lämpöenergiaa veden hajottamiseen voidaan vetyä tuottaa uusiutuvan energian avulla.

Biologiset ja fotobiologiset prosessit käyttävät levviä ja bakteereita vedyn tuottamiseen. Tietyissä olosuhteissa eräiden levien pigmenttikomponentit absorboivat auringonenergiaa, jolloin leväsolujen entsyymien katalysoimana vesi hajoaa vedyksi ja hapeksi. Nykytekniikalla levien vedyn tuotanto on kuitenkin niin vähäistä, että se ei ole kannattavaa. Myös jotkut bakteerit pystyvät tuottamaan vetyä. Toisin kuin leväorganismit,

ne tarvitsevat kasvualustan. Levien ja bakteerien käytön etuna on, että vedyn tuotanto voidaan yhdistää jätteen ja epäpuhtauksien hävittämiseen.

5.2. Teollisuuden ylimäärä- ja sivutuotevety

Monissa teollisissa prosesseissa tarvitaan vetyä prosessiaineena, ja joissain prosesseissa vetyä syntyy sivutuotteena. Runsaasti vetyä käyttävien laitosten kuten öljynjalostamojen ja ammoniakkitehtaiden yhteydessä on yleensä niiden tarpeisiin rakennettu vedyntuotantolaitos. On arvioitu, että Euroopassa vedyn kokonaiskulutuksesta käytetään öljynjalostuksen tarpeisiin noin puolet ja ammoniakkin valmistukseen noin kolmannes. [50] Ylimääräisellä vedyllä tarkoitetaan esimerkiksi tällaisen suuren vedynkäyttäjän tarpeita palvelevan vetylaitoksen tuotantokapasiteetin ja todellisen kulutuksen eroa. Merkittävä vedynlähde on myös tiettyjen kemianteollisuuden prosessien sivutuotteena muodostuva vety.

Prosessissa muodostuva sivutuotevety voidaan käyttää täyttämään muiden prosessien vedyntarvetta tai se voidaan käyttää energiantuotannossa polttoaineena. Jos laitoksella ei ole tarvetta sivutuotevedyn käyttöön, vety voidaan ottaa talteen ja myydä muualla käytettäväksi. Useimmissa tapauksissa sivutuotevety on puhdistettava, ennen kuin sitä voidaan myydä muihin käyttötarkoituksiin. Sivutuotevetyä muodostuu esimerkiksi kloori-alkaali-teollisuudessa sekä natriumklooraatin, etyleenin, asetyleenin, syaanivedyn ja styreenin valmistuksessa. [50]

Teollisuuden ylimäärä- tai sivutuotevedyn määrää ei ole helppo arvioida, koska siihen vaikuttavat merkittävästi esimerkiksi vetyä käyttävien laitosten ja myös muun kemianteollisuuden tuotantoasteet. Arvioiden tekemistä vaikeuttaa myös se, että todellista tietoa vetyä tuottavilta ja käyttäviltä laitoksilta on vaikea saada. Arviot perustuvatkin yleensä tilastollisiin ja keskimääräisiin oletuksiin. Eräänä arviona on esitetty, että Euroopassa olisi saatavissa 2–10 miljardia Nm^3 ylimäärä- ja sivutuotevetyä. Tämän on arvioitu vastaavan 1–6 miljoonan ajoneuvon vuotuista kulutusta. [50] Toisen arvion mukaan sivutuotevetyä syntyy Saksassa 850 milj. Nm^3 /vuosi, Norjassa 650 milj. Nm^3 /vuosi, Ranskassa 300 milj. Nm^3 /vuosi ja Hollannissa 100 milj. Nm^3 /vuosi [51]. Merkityksettömästä määrästä ei siis ole kysymys.

On esitetty, että sivutuotevety olisi eräs halvimmista tavoista tyydyttää polttokennoajoneuvojen vedyntarve erikoisesti sellaisilla tankkausasemilla, jotka sijaitsevan suhteellisen lähellä sivutuotevedyn muodostumispaikkaa. Sivutuotevety ei tule ratkaisemaan edullisen vedyntuotannon ongelmaa tilanteessa, missä polttokennoajoneuvot yleistyvät voimakkaasti ja niiden käyttöön tarvitaan kattava tankkausasemaverkosto. Sivutuotevety voi kuitenkin olla toimiva ja ympäristöystävällinen ratkaisu polttokennoajoneuvojen demonstraatiovaiheessa ja niiden yleistymisen alkuvaiheessa. [18; 50; 51]

Fuel Cell Todayn julkaisemassa Suomea koskevassa katsauksessa esitetyn arvion mukaan syntyy Kemira Chemicalsin natriumklooraatti- ja klooridioksiditehtailla Äetsässä, Joutsenossa ja Kuusankoskella vuosittain 18 000 tonnia sivutuotevetyä, mikä voitai-

siin hyödyntää energiantuotantoon stationäärisissä polttokennosovelluksissa. [52] Tehtailla muodostuvaa sivutuotevetyä on poltettu sähköntuotannossa Äetsässä vuodesta 2003 ja Joutsenossa vuodesta 2006 lähtien. Osa tehtailla muodostuvasta sivutuotevedystä otetaan talteen ja puhdistetaan jatkokäyttöä varten.

5.3. Vedyn varastointi ja kuljetus

Tuotetun vedyn varastoinnin ja kuljetuksen tarpeeseen vaikuttaa esimerkiksi se, tapahtuuko tuotanto suurissa keskitetyissä laitoksissa vai kapasiteetiltaan pienemmissä, lähellä käyttökohdetta (esimerkiksi tankkausasemaa) olevissa paikallisissa laitoksissa. Keskitetyissä laitoksissa tuotetun vedyn siirtomatkat voivat olla pitkiä ja siirrettävät määrät suuria. Monesti tarvitaan myös vedyn varastointikapasiteettia tasaamaan kulutusvaihteluja. Paikallisesti tuotetun vedyn etuna on kuljetustarpeen vähäisyys. Kaikissa tapauksissa tarvitaan kuitenkin jonkin suuruista varastointikapasiteettia.

Vety varastoidaan tavallisimmin paineistettuna kaasuna tai nesteytettynä. Vedyn varastointi kaasumaisena erityyppisiin painesäiliöihin lienee tällä hetkellä tavallisin vedyn varastointimenetelmä. Kaupalliset vedyn varastointisäiliöt jaotellaan luokkiin I-IV. Luokan I säiliöt on tavallisimmin valmistettu teräksestä. Niiden tilavuus vaihtelee välillä 2,5–50 l ja paine niissä on 200–300 bar. Teräksiset säiliöt ovat melko painavia. Niissä säilöttävän vedyn massa suhteessa koko säilytysjärjestelmän massaan on luokkaa 0,01 kg H₂/kg. Vetysäiliöiden painon pienentämiseksi on käytössä myös komposiittimateriaaleista valmistettuja säiliöitä. Kaasutiiveyden varmistamiseksi II ja III luokkiin kuuluvien komposiittisäiliöiden sisäpinta on vuorattu ohuella metallikerroksella. IV luokan säiliöissä myös kaasutiiveyden varmistava sisävuoraus on tehty synteettisestä materiaalista. Komposiittisäiliöiden hintaa lisäävä tekijä on niissä tarvittava hiilikuitu. III ja IV luokan säiliöissä paine voi olla joko 350 bar tai 700 bar. Säiliön tilavuudesta riippuen III ja IV luokan säiliöissä vedyn massan suhde koko säilytysjärjestelmän massaan vaihtelee välillä 0,036–0,055 kg H₂/kg. [75]

Teollisuuskäytössä ja muissa stationäärisissä sovelluksissa, joissa säiliön massa tai sen vaatima tilavuus eivät ole kriittisiä, käytetään vedyn varastointiin suuria pallosäiliöitä, joissa paine on noin 12–16 bar. Paineistettua vetyä voidaan säilöä myös suuriin maanalaisiin varastoihin. Kaasumaisena varastoitavan vedyn heikkoutena on sen pieni energiatiheys. Kaasumaisen vedyn energiatiheys (LHV) on 10,7 MJ/m³ (25 °C, 1 bar) ja samassa lämpötilassa 200 bar paineessa 1 850 MJ/m³. Vertailun vuoksi vastaavat arvot metaanin energiatiheudeksi ovat 32,6 MJ/m³ ja 6 860 MJ/m³ [55 s. 24]. Paineen ollessa 700 bar on vedyn energiatiheys noin 4 500 MJ/m³. Yhteistä kaikille painesäiliöille on, että varastointia varten vety täytyy paineistaa, ja tähän kuluu energiaa. [49]

Vedyn varastointi nestemäisenä eristettyihin kevytrakenteisiin kryotankkeihin tarjoaa paineistusta tehokkaamman varastointiratkaisun. Nestevedyn energiasisältö on noin 8 700 MJ/m³. Vedyn nesteyttämiseksi se täytyy jäähdyttää 20 K (-253 °C) lämpötilaan, jolloin vedyn tiheys on noin 70 kg/m³. Nesteytys vaatii teknologiasta riippuen energiaa

30–35 MJ vetykiloa kohden, mikä on 25–27 % sen energiasisällöstä. Termodynamiikan mukaan ideaalinen nesteytysprosessi koostuu kaasun isotermisestä puristuksesta ja sen jälkeen tapahtuvasta kaasun adiabaattisesta laajentumisesta. Adiabaattisen laajentumisen vaikutusta kaasun lämpötilaan kutsutaan Joule-Thomson efektiksi. Lämpötilan muutoksen suunta on riippuvainen aineen ominaisuuksista ja lämpötilasta. Adiabaattisen laajentumisen seurauksena kaasu jäähtyy vain, jos sen Joule-Thomson vakio on positiivinen. Jotta vety voidaan nesteyttää Joule-Thomson efektin avulla, se täytyy ensin esijäähdyttää esimerkiksi nestemäisen tyypin avulla lämpötila-alueelle, missä sen Joule-Thomson vakio on positiivinen. [56, s. 330] Huoneenlämpötilassa tapahtuva vedyn adiabaattien laajentuminen nostaa sen lämpötilaa.

Jotta vety pysyy nesteenä, se on varastoitava hyvin eristetyissä säiliöissä. Ulkoa vetyä lämmittävän lämpökuorman lisäksi myös vedyn atomitason ilmiöt lämmittävät sitä, ja siten kiehuttavat nestemäistä vetyä kaasuksi. Vetymolekyylillä on kaksi spinisomeeriä orto- ja para-vety. Näiden isomeerien fysikaalisissa ominaisuuksissa on eroja. Normaalisti huoneenlämpötilassa olevasta vedystä noin 75 % on orto- vetyä ja loput 25 % on para-vetyä. Vedyn jäähtyessä orto-vedyn osuus pienenee. Nestemäisessä vedyssä para-muoto on vallitseva, koska se on silloin stabiilimpi. Orto-vedyn muuntuminen para-isomeeriksi on eksoterminen prosessi. Se aiheuttaa siten lämpökuormaa nestevedyyn ja kiehuttaa sitä. [56]

Nesteytetyn vedyn säiliökoot vaihtelevat kymmenistä litroista aina tuhansien litrojen tankkerien ja LNG -säiliöiden tyyppisiin ratkaisuihin. Nesteytettyä vetyä käytetään pääosin vain suurehkojen vetymäärien varastointiin ja kuljetukseen. Käytössä on myös painestetun ja nesteytetyn vedyn yhdistelmäratkaisuja. Näissä lämpöhäviöiden aiheuttama nestevedyn vähittäinen muuttuminen kaasuksi (boil-off) saadaan kätevästi talteen. [48]

Vedyn siirto ja jakelu tuotantopaikalta käyttökohteeseen esim. tankkausasemalle voi tapahtua joko putkikuljetuksena tai säiliökuljetuksena. Vedyn putkikuljetuksessa siirto-putkiston paine on tavallisesti 40–70 bar, ja putkiston halkaisija vaihtelee välillä 10–300 mm. Tuotetun vedyn painetasosta riippuen voidaan vedyn painetta joutua korottamaan putkikuljetusta varten. Pitkissä putkilinjoissa (yli 100 km) voidaan tarvita myös paineenkorotusasemia kompensoimaan virtauksen painehäviöt. Yhtenä vaihtoehtona on esitetty, että vetyä kuljetettaisiin maakaasuun sekoitettuna maakaasuputkistoja pitkin ja siirron jälkeen maakaasu ja vety erotettaisiin. [53]

Vedyn siirtotapana putkikuljetus on käytössä ympäri maailmaa öljynjalostus- ja kemianteollisuuden tarpeita varten. Euroopassa arvioidaan olevan vetyputkistoa 1 600 km ja Pohjois-Amerikassa 900 km. Myös Japanissa on vedyn siirtoon tarkoitettuja putkistoja. Euroopassa vedyn siirtoon tarkoitettut putkistot ovat lähes kokonaan suurten kaasuyhtiöiden hallinnassa. [54]

Euroopan laajin vetyputkisto on AirLiquide -yhtiön hallinnassa. Kuvan 19 kartassa näkyy yritykselle kuuluva Pohjois-Ranskan, Belgian ja Hollannin alueelle sijoittuva Pohjois-Euroopan ja Saksan Ruhrin alueelle sijoittuva vetyputkisto. Tyypillinen siirto-

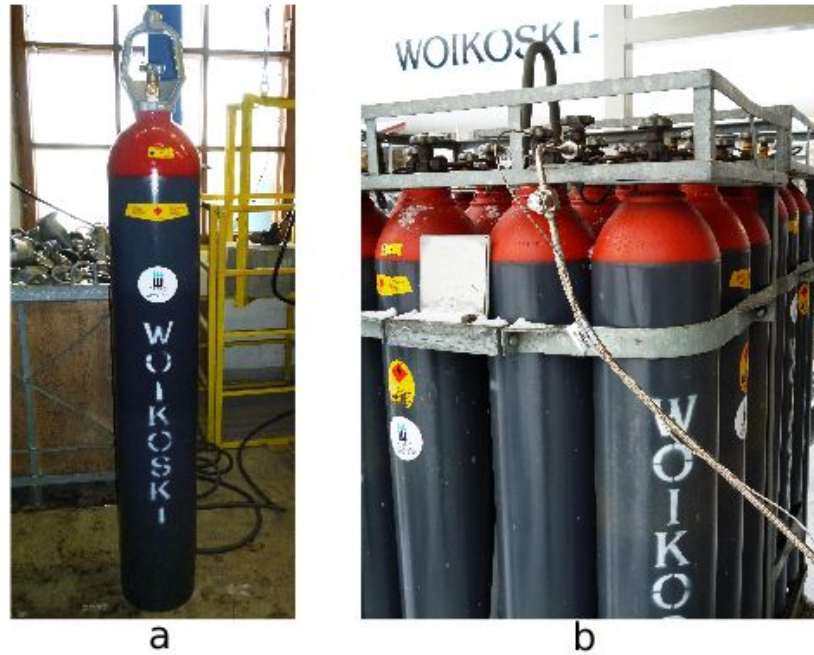
putken läpimitta on 100 mm ja paine maksimissaan 100 bar. Pohjois-Euroopan vedynsiirtoverkoston kapasiteetti on noin 1 200 miljoonaa m³ vuodessa ja Ruhrin alueen siirtoputkiston kapasiteetti on 250 miljoonaa m³ vuodessa.



Kuva 19. AirLiquide -yhtiön Pohjois-Euroopan ja Ruhrin alueen vetyputkisto [54].

Vedyn siirtoon tarkoitettuja putkilinjoja on Euroopassa myös Lindellä (Saksassa ja Englannissa) ja Air Productsilla (Hollannissa, Englannissa ja Italiassa). Pohjoismaissa muutamien kilometrien mittaisia vetyputkistoja on Ruotsin Stenungsundissa sijaitsevalle kemianteollisuuden keskittyneellä alueella.

Koska vedyn energiatiheys tilavuusyksikköä kohti on pieni, sen säiliökuljetus painestettuna kaasuna (tyypillisesti 200–300 bar paineessa) on taloudellisesti järkevää ainoastaan, kun siirtomatkat ovat lyhyitä ja määrät suhteellisen pieniä (ks. luku 5.4). Kuljetettavat vetysäiliöt voivat olla yksittäisiä kaasupulloja, usean kaasupullon paketteja tai suurempia säiliöitä. Kuvassa 20 on yksittäinen vetypullo ja usean pullon muodostama pullopatteri. Suurempaa käyttötarvetta varten asiakkaalle toimitetaan esimerkiksi kuvan 21 kaltainen pullokonttilava. Kaasumaisen vedyn säiliökuljetus voi olla toimiva ratkaisu vedyn energiakäytön alkuvaiheessa, kun kuljetusmäärät ovat suhteellisen pieniä, eikä muita kuljetustapoja (esimerkiksi putkistokuljetus) ole vielä laajamittaisesti käytössä. [56]



Kuva 20. (a) Vetykaasupullo (50 l, 200 bar, 0,72 kg vetyä) ja (b) 12 pullon muodostama pullopatteri (600 l, 200 bar, 8,6 kg vetyä).



Kuva 21. Pullokonttilava (13 760 l, 200 bar, 247 kg vetyä).

Nestemäisenä vetyä voidaan kuljettaa puoliperävaunurekkojen hyvin eristetyissä kryogeenisissä säiliöissä. Kuvassa 22 on esitetty nestemäisen vedyn kuljetukseen tarkoitettu säiliö. Vedyn nesteytys on kuitenkin hyvin kallista samoin kuin kuljetuksessa tarvittava kalusto. Nesteytyksen korkeista kustannuksista huolimatta vedyn kuljetus nesteytettynä on kaasumaisena tapahtuvaa kuljetusta edullisempi vaihtoehto, kun kuljetusmatkat ovat pitkiä.



Kuva 22. Nestevedyn kuljetussäiliö (40 954 l, 2 905 kg vetyä).

Suurimmat nesteitetyn vedyn kuljetussäiliöt ovat tilavuudeltaan jopa 50 000 litraa ja vetyä voidaan kuljettaa noin 3 500 kg. Kryogeenisellä säiliöllä varustettu rekka-auto pystyy kuljettamaan vetyä jopa kuusi kertaa enemmän kuin, mitä on mahdollista kuljettaa kaasumaisena. [54]

5.4. Vedyn tuotannon ja kuljetuksen kustannustietoja

Arviot vedyn tuotantokustannuksista vaihtelevat suuresti riippuen esimerkiksi tarkastelusta tuotantotavasta, tuotantolaitoksen kapasiteetista, käytetyn lähtöaineen hinnasta, sen saatavuudesta ja kuljetuskustannuksista sekä sähkön hinnasta. **Esitetyt hinta-arviot ovatkin enemmän suuntaa-antavia kuin täsmällistä kustannustietoa vedyn valmistuksesta.**

Seuraavassa esitetyt hinta-arviot on poimittu useista eri lähteistä, joissa hintatietoja on ilmoitettu sekä euroina että dollareina. Muutettaessa hintatiedot euroiksi on dollarin ja euron välisenä vaihtokurssina käytetty Suomen Pankin aikavälillä 1.1.2007 - 21.2.2012 tilastoimista kuukauden keskiparssista laskettua keskiarvoa, jonka perusteella 1 € on 1,39 \$ [57]. Tarkempien kurssitietojen käyttäminen ei ole mahdollista, koska alkuperäislähteistä ei käy ilmi hintatietojen tarkkaa ajankohtaa. Tavoitteena on antaa ainoastaan suuruusluokka-arvioita vedyn tuotannon ja kuljetuksen kustannuksista. Hinta-arviot on pyöristetty yhden desimaalin tarkkuudella.

Vuoteen 2030 ulottuvana arviona vedyn valmistuskustannusten vaihteluvälistä on esitetty 1,9–2,9 €/kg [18, s. 621]. Laajassa, eri voimansiirtotapoja käyttävien henkilöautojen (erilaiset sähköautot, polttomoottoriautot) taloudellisuutta ja suorituskykyä koskevassa vertailussa on esitetty arvio jakeluasemalle toimitetun vedyn hinnasta vuonna 2030. Vedyn valmistus- ja kuljetuskustannukset sisältävän hinnan arvioidaan vaihtelevan välillä 2,8–5,5 €/kg riippuen tuotantotavasta. [15, s. 37]

Metaanin höyryreformointi on nykyisistä tuotantotavoista edullisin tapa tuottaa vettä. Lähtöaineena käytettävän maakaasun hinnan on arvioitu suurilla tuotantolaitoksilla edustavan 52–68 % ja pienillä laitoksilla 40 % vedyn tuotantokustannuksista. Loppuosa kustannuksista muodostuu laitoksen pääomakustannuksista. Arviot maakaasun höyryreformoinnilla tuotetun vedyn hinnasta vaihtelevat välillä 1,1–2,7 €/kg. [58, s. 865; 59, s. 7]

Vedyn tuotantokustannukset veden elektrolyysillä riippuvat laitoksen koosta ja ennen muuta käytetyn sähkön hinnasta. Suuressa elektrolyysilaitoksessa tuotetun vedyn hinnan on arvioitu vaihtelevan välillä 3,4–5,3 €/kg sähkön hinnasta riippuen. Hintarvio pienissä hajautetuissa elektrolyysilaitoksissa tuotetulle vedylle on 3,7–18,3 €/kg. [59, s. 9]

Edellä todettiin arvioiden vedyn valmistuskustannuksista olevan ainoastaan suuntaantavia. Sama pätee myös vedyn kuljetuskustannuksista tehtyihin arvioihin, jotka ovat riippuvaisia esimerkiksi tarkasteluajankohtana vallinneista materiaalien, sähkön ja liikennepolttoaineiden hinnasta. Arvioihin eri kuljetusmuotojen eduista ja heikkouksista tällä ei kuitenkaan liene merkitystä. Taulukossa 4 on verrattu kaasumaisen vedyn säiliökuljetuksen, nestemäisen vedyn säiliökuljetuksen ja vedyn putkikuljetuksen ominaisuuksia ja kustannusrakennetta.

Taulukko 4. Vedyn eri kuljetusmuotojen ominaisuuksien ja kustannusrakenteen vertailu [53].

| | Säiliökuljetus kaasuna | Säiliökuljetus nesteenä | Putkikuljetus |
|--|--|--|---|
| Soveltuva kuljetusmäärä | Pieni | Kohtalainen | Suuri |
| Soveltuva kuljetusmatka | Lyhyt | Kohtalainen-pitkä | Kaikki |
| Edut | Pienet pääomakustannukset, kun kuljetettava määrä on pieni | Yksikön suuri kuljetuskapasiteetti | Täydellä kapasiteetilla pienet kustannukset |
| Rajoitukset | Korkeat käyttökustannukset, yksikön pieni kuljetuskapasiteetti | Korkeat nesteyttämisestä aiheutuvat kustannukset (laitteet, energia) | Korkeat pääomakustannukset |
| Kapasiteetin kasvusta johtuvat edut | Ei ole | Nesteytyksessä kapasiteettietua | Huomattavat edut matkan ja siirtomäärän suhteen |

Vedyn kuljetuskustannukset riippuvat kuljetustavasta, siirrettävästä määrästä ja siirtomatkan pituudesta. Kuljetuksen kokonaiskustannukset muodostuvat kuljetustapaan

liittyvistä investointi- ja käyttökustannuksista. Arviona keskimääräisistä siirtokuljetuksista on esitetty 0,2–0,9 €/kg. [18]. Kuljetuskustannusten vaihteluväliksi eri kuljetusmuodoilla on esitetty myös 0,1–2,9 \$/kg [60, s.277].

Kaasumaisen vedyn säiliökuljetuksen pääomakustannukset muodostuvat ajo- ja kuljetuskalustosta ja käyttökustannukset lähinnä kuljetushenkilökunnan ja polttoaineen kustannuksista. Vedyn kuljetuksen kustannuksia ja edullisimpia kuljetustapoja tarkastelevassa tutkimuksessa todetaan kaasumaisen vedyn säiliökuljetuksen yksikköhinnan olevan suhteellisen riippumaton kuljetettavasta määrästä. Pientä kapasiteettietua saavutetaan vedyn komprimointikustannuksissa. Kuljetusmatka on kaasumaisen vedyn säiliökuljetuksen hinnan määräävä tekijä, koska se vaikuttaa tarvittavan kuljetuskaluston, polttoaineen ja henkilökunnan määrään.[53, s.6; 60 s. 270] Kaasumaisen vedyn säiliökuljetuksen kustannusten on arvioitu vaihtelevat välillä 0,6–2,2 €/kg riippuen vedyn komprimoinnin tarpeesta ja siirrettävästä matkasta [59, s. 15; 60, s. 277].

Nestemäisen vedyn säiliökuljetuksen kustannuksista valtaosa aiheutuu vedyn nesteyttämisen kustannuksista. Vedyn nesteyttämisen ja kuljetuksen kustannuksiksi on arvioitu 0,8–1,3 €/kg. Nesteytyslaitoksen pääomakustannuksissa saavutetaan selvää kustannusetua, kun laitoksen kapasiteetti kasvaa. Pienillä laitoksilla pääomakustannukset ja nesteyttämiseen tarvittavan sähkön kustannukset edustavat lähes yhtä suurta osaa nesteytetyn vedyn yksikkökustannuksista. Suurilla laitoksilla pääomakustannukset ovat 30 % ja nesteytykseen tarvittava energia 50–60 % kustannuksista. Nesteytetyn vedyn kuljetuskustannukset eivät ole kuljetusmatkan suhteen yhtä herkkiä kuin kaasumaisen vedyn kustannukset. Tämä johtuu nestekuljetusten suuremmasta kapasiteetista. [60, s. 276]

Korkeat investointikustannukset, mutta matalat käyttökustannukset ovat tyypillisiä putkikuljetuksille. Putkistojen investointikustannuksia nostaa vedyn kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista aiheutuva tarve kalliiden materiaalien käyttöön. Vetyputkiston investointikustannuksiksi on arvioitu 216 000–1 100 000 €/km riippuen putkiston sijainnista ja sen halkaisijasta. Materiaalikustannusten on arvioitu olevan 15–35 % (halkaisijasta riippuen) putkiston kokonaiskustannuksista. [53, s. 5]

Vedyn siirtoon tarkoitettujen putkiston rakentaminen on noin kaksi kertaa kalliimpaa kuin samankokoisen maakaasuputkiston rakentaminen. Putkikuljetuksen käyttökustannukset muodostuvat etupäässä vedyn komprimoinnista.[18]. Vedyn putkikuljetuksen kustannusten on arvioitu olevan välillä 0,2–3,0 €/kg [60, s. 277]. Lähteessä [59] vedyn putkikuljetuksen kustannuksiksi on arvioitu 0,2 €/kg. On huomattava, että tämä arvio pätee vain suurille vetymäärille (yli 5 Gm³/vuodessa) [59, s. 16].

Putkikuljetus soveltuu parhaiten tilanteisiin, joissa on tarve siirtää suuria vetymääriä pitkiä matkoja. Nesteytetyn vedyn säiliökuljetus soveltuu pitkille siirtomatkoille, kun määrät ovat kohtalaisia (sellaisia, että putkikuljetus ei ole kannattava vaihtoehto). Painestettuna kaasuna tapahtuva kuljetus soveltuu käytettäväksi, kun siirrettävän vedyn määrä on suhteellisen pieni ja siirtomatka lyhyt [18; 60].

6. VETYTANKKAUKSEN TURVALLISUUS, SÄÄDÖKSET JA STANDARDIT

Vedyn ja sen käytön tärkeimmät turvallisuusnäkökohdat liittyvät vedyn keveyteen ja sen syttymisherkkyyteen. Seuraavassa on tarkasteltu vetyä ja sen ominaisuuksia lähinnä vetytankkausasemien ja niiden toiminnan turvallisuuden näkökulmasta. Vedyn käytön ja vetytankkausasemien turvallisuus pyritään mahdollisimman hyvin varmistamaan niiden suunnittelua, sijoittamista, rakentamista, käyttöä ja kunnossapitoa koskevilla säädöksillä ja ohjeilla.

Käyttöön otettavan vetytankkausaseman on täytettävä lainsäädännössä ja viranomashjeissa asetetut vaatimukset. Näiden lisäksi on myös tiettyjä standardeja ja muita ohjeita, joiden noudattaminen on joko pakollista tai suositeltavaa. Teknisillä määräyksillä ja vapaaehtoisilla standardeilla pyritään varmistamaan tuotteiden turvallisuus, laatu ja tekninen yhteensopivuus.

EU:n rahoittaman HyFacts -projektin kotisivuille on koottu kattava luettelo vetyyn ja sen käyttöön liittyviä säädöksiä, standardeja ja ohjeita [62]. EU:n alueella keskeisiä vetyä ja sen polttokennosovelluksia koskevia direktiivejä ovat mm. vaarallisia aineita ja niiden kuljetusta, räjähdysvaarallisia ilmaseoksia (ATEX), painelaitteita sekä kuljetettavia kaasusäiliöitä koskevat direktiivit, joiden vaatimukset on siirretty EU-maiden kansallisiin säädöksiin. [55].

6.1. Vedyn aineominaisuudet

Vety on väritön ja hajuton, erittäin helposti syttyvä kaasu. Sen kiehumispiste (nesteytetyn vedyn höyrystymislämpötila) on -253 °C ja kaasumaisen vedyn suhteellinen tiheys 0,07 (ilma = 1). Vedyn käsittelyn ja käytön ensisijaiset vaaratekijät ja onnettomuusmahdollisuudet liittyvät tulipaloihin ja räjähdyksiin, sillä vety muodostaa ilman kanssa erittäin helposti syttyvän seoksen laajalla pitoisuusalueella. Vedyn syttymisalue ilmassa on 4–75 tilavuus-%. Syttymisalueeseen vaikuttavat jonkin verran esimerkiksi paine, lämpötila ja kosteus. [63; 64] Taulukossa 5 on esitetty vedyn ja eräiden muiden polttoaineiden aineominaisuuksia ja erityisesti niitä ominaisuuksia, joilla on merkitystä aineiden turvallisen käsittelyn kannalta.

Taulukko 5. Vedyn ja eräiden muiden polttoaineiden aineominaisuuksia [55; 63; 64].

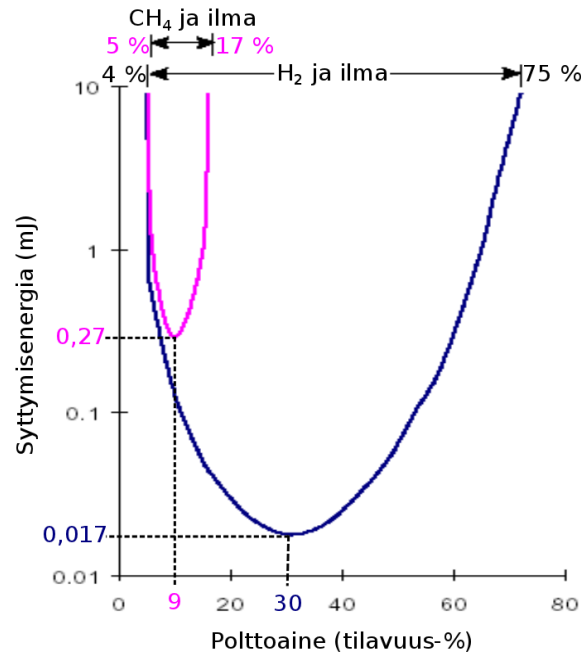
| | Vety | Metaani | Propaani | Bensiini |
|---|---|-------------------------|------------------------|--|
| Tiheys | 0,082 kg/m ³ (25 °C, 0,1 MPa) neste 72 kg/m ³ (norm. kieh.piste) | 0,657 kg/m ³ | 1,83 kg/m ³ | höyry 4,5 kg/m ³ neste 750 kg/m ³ |
| Kiehumispiste | -253 °C | -161 °C | -42 °C | kiehumisalue 20–210 °C |
| Minimisyttymisenergia | 0,017 mJ | 0,27 mJ | 0,24 mJ | 0,24 mJ |
| Itsesyttymislämpötila | 560 °C | 537 °C | 450 °C | 215 °C |
| Syttymisalue, pitoisuus ilmassa | 4–75 til-% | 5–17 til-% | 2–11 til-% | 1–7 til-% |
| Räjähdyalue | 18–59 til-% | 6–14 til-% | 3–9 til-% | 1–3 til-% |
| Lämpöarvo, LHV (Lower heating value) | 120 MJ/kg | 49 MJ/kg | 46 MJ/kg | 43 MJ/kg |

Puhdas vetykaasu ei ole myrkyllistä. Se ei myöskään aiheuta haittaa ympäristölle. Vetykaasu on väritöntä, hajutonta ja mautonta, joten sen aistinvarainen havaitseminen on mahdotonta. Toisin kuin esimerkiksi maakaasua vetyä ei voida hajustaa havaitsemisen helpottamiseksi. Ei ole olemassa hajusteainetta, joka olisi keveydeltään vedyn luokkaa ja siis leviäisi samalla tavalla kuin vety. Hajusteaineen käyttö olisi hankalaa myös siksi, että polttokennokäytössä vedyn on oltava puhdasta. Suurina pitoisuuksina vety syrjäyttää hapen ja voi aiheuttaa tukehtumisen suljetussa tilassa (kuten kaikki muutkin kaasut). Hapenpuutteen oireita alkaa ilmetä, kun hengitysilman happipitoisuus on alle 18 tilavuus-%. [64]

Nestemäinen vety on väritöntä ja hajutonta ja se on tiheydeltään neljästoistaosa veden tiheydestä. Nestemäinen vety ja myös siitä höyrystyvä kylmä kaasu aiheuttavat erittäin vakavia paleltumisvammoja ja kudolvaurioita. Ympäristöön vapautuva nestemäinen vety höyrystyy hyvin nopeasti, jolloin normaaliolosuhteissa litrasta nestemäistä vetyä muodostuu noin 850 litraa kaasumaista vetyä. [65]

Vety palaa kuumalla liekillä ja kosketus siihen aiheuttaa pahoja palovammoja. Vety liekkiä on vaikea havaita, koska vedyn palaessa ei muodostu nokea ja vetyliekin aiheuttama lämpösäteily on pientä verrattuna hiilivetyjen palamisen aiheuttamaan lämpösäteilyyn. [64] Vedyn minimisyttymisenergia on hyvin alhainen (0,017 mJ, kun pitoisuus 30 tilavuus-% ilmassa) verrattuna esimerkiksi metaanin ja propaanin minimisyttymisener-

gioihin (noin 0,24–0,27 mJ). Toisaalta syttymisalueidensa alarajalla (vedyllä pitoisuus ilmassa 4 tilavuus-% ja metaanilla 5 tilavuus-%) syttymisenergiat ovat hyvin lähellä toisiaan eli noin 10 mJ. Kuvassa 23 on verrattu vedyn ja metaanin syttymisenergioita eri pitoisuuksissa. [55]



Kuva 23. Vedyn ja metaanin muodostamien ilmaseosten syttymisenergiat eri pitoisuuksissa [55].

Onnettomuuden vaaraa aiheuttavista aineista laadittujen OVA-ohjeiden mukaan puristetun vedyn vuoto voi muodostaa niin paljon staattista varausta, että vuoto syttyy näennäisesti itsestään. Myös muuten muodostunut staattinen varaus, kipinät, kuumat pinnat ja liekit sytyttävät vedyn helposti. Ruosteinen pinta voi sytyttää vedyn huomattavasti itsesyttymislämpötilaa alemmassa lämpötilassa. Hienojakoinen platina ja jotkut muut metallit sytyttävät vedyn. Tulipalon kuumentama vetykaasusäiliö voi repeytyä, minkä jälkeen vapautunut vety palaa räjähdysnomaisesti. [63]

Vedyn ja ilman suuresta tiheyserosta johtuen säiliöstä tms. vuotava kaasumainen vety kohoaa ylöspäin ja suljetussa tilassa muodostaa syttyvän seoksen tilan yläosaan. Sisätiloissa vetyvuoto aiheuttaa räjähdysvaaran. Humahtaen palava kaasupilvi aiheuttaa pilven sisälle jääneille vaikeita palovammoja. [63] Avoimessa ulkotilassa vety ei muodosta pysyvää kaasupilveä, vaan noustessaan se sekoittuu tehokkaasti ilmaan, jolloin vedyn pitoisuudet laimenevat nopeasti. Vetyatomien pienestä koosta johtuen se kulkeutuu helposti erilaisten materiaalien läpi, mistä aiheutuu tiukat vaatimukset säiliöiden, putkistojen, tiivisteiden jne. materiaaleille.

Kuten edellä on esitetty, vedyn ominaisuudet poikkeavat melko suuresti muiden kaasumaisten polttoaineiden ja bensiinihöyryjen ominaisuuksista. Vedyllä on ominaisuuksia, joiden vuoksi se on esimerkiksi huomattavasti herkempi syttymään kuin muut polttoaineet. Toisaalta keveytensä ansiosta vety sekoittuu helposti ilmaan, jolloin pitoi-

suudet laimenevat nopeasti ja kaasuvuodon aiheuttama vaara voi olla muita polttoaineita pienempi. Verrattaessa vetyä ja muita polttoaineita ei voida yksikäsitteisesti sanoa, että vety kaikissa tilanteissa ja olosuhteissa olisi muita polttoaineita vaarallisempi tai vaaratomampi. Kun vedyn varastoinnin ja käsittelyn kaikissa vaiheissa tiedostetaan sen ominaisuudet ja niistä aiheutuvat vaatimukset esimerkiksi materiaali- ja laitevalinnoissa, kaasun kertymisen estämisessä ja tuuletusten järjestämisessä, vuodonvalvonnassa jne., ja kun laitteiden käytön- ja kunnossapidon osalta noudatetaan annettuja suosituksia ja ohjeita, on vedyn käytön turvallisuus verrattavissa muiden polttoaineiden käyttöön. [55]

Kaikkien polttoaineiden kohdalla on muistettava, että ne ovat syttyviä ja sopivissa olosuhteissa niistä muodostuu räjähdyskelpoisia ilmaseoksia. Kaikkien polttoaineiden käsittely myös vaatii juuri niille soveltuvan asianmukaisen ja korkeatasoisen tekniikan käyttöä sekä laitteiden ja järjestelmien huollon ja kunnossapidon varmistamista. Samoin kaikkien polttoaineiden käsittelyssä ja esimerkiksi ajoneuvojen tankkausasemien suunnittelussa ja toteutuksessa on varmistettava, ettei kohteen ulkopuolelta tuleva tekijä (esim. tulipalo kohteen läheisyydessä), inhimillinen virhe tai laitteiston väärinkäyttö aiheuta onnettomuutta.

6.2. Tietoa vetytankkausasemien vaaratilanteista

Tyypilliset vetytankkausaseman vaaratilanteet ja onnettomuusmahdollisuudet liittyvät laitteistoista, liitoksista tai letkuista tapahtuviin vetyvuotoihin. Vedyn syttymisherkkyydestä johtuen vuoto voi syttyä staattisesta sähköstä, kuumasta pinnasta, kipinästä jne. Ajoneuvojen törmäyksistä, voimakkaista iskuista tai muista vastaavista syistä voi aiheutua vakavia laitteistovaurioita, jolloin vuotamaan pääsevän vedyn määrä voi olla suurempi kuin laitteiston tyypillisessä vuototilanteessa. Mahdollisen vetyvuodon syttymisestä aiheutuvat seuraukset riippuvat esimerkiksi vuodon suuruudesta, sen kestosta ja vuotopaikan sijainnista.

Vetyyn liittyvistä onnettomuuksista löytyy tietoa esim. U.S. Department of Energyllä ylläpitämästä tietokannasta, jonka tiedot perustuvat eri puolilta maailmaa ja erilaisista lähteistä (teollisuus-, viranomais-, tutkimuslähteet) saatuihin tietoihin. H2Incidents-tietokannan tavoitteena on kerätä ja jakaa tietoa vetyyn liittyvistä onnettomuuksista ja läheltä-piti -tilanteista, jotta näistä tapahtumista voitaisiin oppia ja välttää vastaavat vaaratilanteet tulevaisuudessa. Tapauskuvauksista poistetaan tunnistetiedot ja muut sellaiset tiedot, joiden perusteella kohde olisi tunnistettavissa. Näin halutaan varmistaa se, että onnettomuuksista ja vaaratilanteista saadaan mahdollisimman kattavat ja totuudenmukaiset tiedot. [66]

Huhtikuussa 2012 H2Incidents-tietokantaan oli tallennettu 20 vetytankkausasemaan liittyvää tapahtumaa ja häiriötilannetta. Kymmenessä tapauksessa vetyä oli päässyt vapautumaan laitteiston ulkopuolelle. Vuodon syynä oli tyypillisesti venttiilivuoto. Muutamissa raportoidussa tapauksissa tankattava ajoneuvo oli lähtenyt liikkeelle tankkausyhteen ollessa kytkettynä. Tällaisessa tilanteessa pieni määrä vetyä pääsee vapautumaan,

ennen kuin järjestelmässä olevat letkurikkoventtiilit sulkeutuvat. Ainoastaan yhdessä kahdestakymmenestä tapauksesta oli syttynyt tulipalo. Siinä tulipalo sai alkunsa tankkausaseman kompressoriyksiköstä. Syyksi arvioitiin hitsaussaumasta vuotaneen vedyn syttymistä, varsinaista sytytyslähdettä ei tunnustettu. Tulipalon leviäminen aiheutti tiivisteen ja letkujen vaurioitumisen, mistä seurauksena oli mm. jäähdytysaineena käytetyn glykolin ja hydraulinesteiden vuoto ja palaminen. Kukaan ei loukkaantunut onnettomuudessa ja vahingot rajoittuivat kompressoriyksikköön ja sen lähellä sijaitseviin laitteisiin. Hydrogen Fuel Cars Now -sivustolla [67] olevan tiedon mukaisesti Yhdysvalloissa Rochesterissa tapahtui 27.8.2010 räjähdys vetytankkausaseman annostelulaitteessa. Lehtiartikkelin mukaan räjähdyksessä loukkaantui kaksi henkilöä. Tarkempia tietoja onnettomuudesta tai sen syistä ei ole käytettävissä.

Vetyä käyttävien polttokennoautojen yleistymisen tuo tankkausasemille ihmisiä, joilla ei ole välttämättä tietoa vedyn ominaisuuksista tai kokemusta kaasujen käsittelystä. Kaikista vetytankkausasemalla olevista teknisistä turvallisuusjärjestelyistä huolimatta on huomiota kiinnitettävä myös ihmisten toimintaan tankkausasemalla. Tämä pitää sisällään esimerkiksi oikeiden toimintatapojen noudattamisen tankkauksen yhteydessä sekä selkeät ohjeet toiminnasta mahdollisen tankkaukseen liittyvän häiriö- tai muun poikkeustilanteen yhteydessä. [68]

6.3. Vetytankkausasemaa koskevia säädöksiä

Suomen lainsäädäntöön kuuluvia säädöksiä, joihin sisältyy vedyn käyttöä ja vetytankkausasemia koskevia vaatimuksia ovat esimerkiksi kemikaali-, ATEX-, painelaitte-, pelastus- ja rakennussäädökset [69]. Myös muissa säädöksissä on kemikaaleja, sähkölaitteita, ohjausjärjestelmiä jne. koskevia vaatimuksia, jotka koskevat tai voivat koskea myös vetytankkausasemia. Seuraavassa on tarkasteltu vetytankkausasemien ja niiden turvallisuuden varmistamisen kannalta tärkeimpiä säädöksiä. Niistä on mainittu ainoastaan alkuperäinen numero, ei säädökseen tehtyjen muutosten numeroita. Ajantasainen säädös löytyy alkuperäisen numeron perusteella FINLEX®-Valtion säädöstietopankin Ajan tasalle toimitettujen säädösten tietokannasta [70].

6.3.1. Kemikaalisäädöksiä

Tärkeimmät kemikaaleja ja kemikaalien käsittelyn turvallisuutta koskevat lait ovat kemikaalilaki (744/1989) ja laki vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin turvallisuudesta (390/2005). Näistä ensin mainittu koskee ensisijaisesti kemikaalien valmistusta, maahantuontia, markkinoille luovuttamista, jakelua, pakkaamista ja myyntiä. Vedyn tankkausasemien kannalta tärkeämpi on vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin turvallisuudesta annettu ns. kemikaaliturvallisuuslaki (390/2005). Sen tarkoituksena on ehkäistä ja torjua vaarallisten kemikaalien (sekä räjähteiden) valmistuksesta, käytöstä, varastoinnista, ja muusta käsittelystä aiheutuvia henkilö-, ympäristö- ja omaisuusvahinkoja sekä lisäksi edistää yleistä turvallisuutta.

Vetytankkausasemien kannalta oleellisia ovat lakiin 390/2005 sisältyvät turvallisuusvaatimukset (lain luku 2), jotka käsittelevät mm. yleisiä turvallisuusperiaatteita, toiminnan järjestämistä, laitoksen sijoitusta sekä sen suunnittelua ja rakentamista. Tärkeä on myös lakiin sisältyvä vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin jako laajamittaiseen ja vähäiseen teolliseen käsittelyyn ja varastointiin (lain luku 3). Jako tehdään vaarallisten kemikaalien määrän ja vaarallisuuden mukaan. Kemikaalien käsittelyyn ja varastointiin liittyvä luvan- ja ilmoituksenvaraisuuden määräytyminen sekä turvallisuuden varmistamiseen liittyvien toimenpiteiden laajuus määräytyvät tämän jaon perusteella. Yksityiskohtaisemmin näitä vaatimuksia on tarkasteltu asetuksessa vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnista (59/1999).

Asetuksen 59/1999 mukaisesti vedyn teollinen käsittely ja varastointi on laajamittaista, jos vetyä on tuotantolaitoksessa vähintään 2 tonnia. Tätä pienemmällä määrällä vedyn käsittely luokitellaan vähäiseksi. Vetytankkausasemilla varastoitavan vedyn määrä ei ole niin suuri, että toiminta olisi laajamittaista. Vetytankkausasemilla tapahtuva vedyn käsittely ja varastointi on siis asetuksen 59/1999 mukaisessa tarkoituksessa luokiteltavissa vähäiseksi.

Vedyn vähäinen teollinen käsittely ja varastointi on ilmoituksenvaraista, jos vetyä on tuotantolaitoksessa vähintään 0,1 tonnia (100 kg). Ilmoitus tehdään pelastusviranomaiselle ennen käsittelyn tai varastoinnin aloittamista. Ilmoituksessa on selvitettävä tiedot vedyn käsittelystä vastaavasta toiminnanharjoittajasta ja laitoksen sijainnista. Siihen on myös liitettävä:

- selvitys vedyn käsittelyyn ja varastointiin liittyvistä vaaroista ja onnettomuuksien mahdollisuuksista
- käyttöturvallisuustiedotteet tai vastaavat tiedot
- pääpiirteittäinen selostus siitä, miten käsittely ja varastointi on suunniteltu tapahtuvaksi
- selvitys palontorjunnan järjestelyistä, mahdollisen vuodon hallinnasta ja muista onnettomuuksien varalta suunnitelluista toimenpiteistä.

Asetuksen 59/1999 mukaisesti pelastusviranomaisen tarkastaa vähäistä teollista käsittelyä tai varastointia harjoittavan, ilmoitusvelvollisen tuotantolaitoksen, kuten vetytankkausaseman, kolmen kuukauden kuluessa toiminnan aloittamisesta. Sama määräaika koskee tarkastuslaitosta, kun se tekee kyseisen tarkastuksen. Tarkastuksessa kiinnitetään huomiota kohteen turvalliseen käyttöön ja sen rakenteiden, laitteistojen ja varusteiden huoltoon ja kunnossapitoon, henkilöstön koulutukseen ja opastukseen sekä onnettomuuksien ehkäisyyn ja pelastustoiminnan organisointiin.

Vetytankkausasemia koskevat myös kemikaaliturvallisuuslakiin (390/2005) sisältyvät räjähdysten estämiseen ja räjähdyksiltä suojautumiseen liittyvät velvoitteet (lain luku 4). Niiden mukaisesti vetytankkausasemalla on 1) arvioitava vedystä aiheutuvien räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamat vaaratekijät ja räjähdysvaaran aiheuttamat

riskit, 2) luokiteltava tilat, joissa voi esiintyä räjähdyskelpoisia vety-ilmaseoksia, 3) merkittävä näiden tilojen sisäänkäynnit ja 4) huolehdittava niistä toimenpiteistä, jotka ovat tarpeen näistä tiloista aiheutuvien vaaratilanteiden ehkäisemiseksi. Lisäksi on huolehdittava siitä, että räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamia vaaratekijöitä ja räjähdysvaaran aiheuttamia riskejä arvioitaessa laaditaan räjähdys-suojausasiakirja. Tarkemmin näistä velvoitteista säädetään asetuksessa 576/2003 (ks. seuraava kappale).

6.3.2. Räjähdyksvaarallisia ilmaseoksia koskevia säädöksiä

ATEX-nimitystä käytetään Euroopan yhteisön direktiiveistä 94/9/EY (laitedirektiivi) ja 1999/92/EY (työolosuhdedirektiivi), jotka koskevat räjähdysvaarallisia tiloja, niissä työskentelyä ja tiloissa käytettäviä laitteita. Suomen lainsäädäntöön laitedirektiivin vaatimukset on siirretty asetuksella räjähdysvaarallisiin ilmaseoksiin tarkoitetuista laitteista ja suojausjärjestelmistä (917/1996) sekä kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksellä räjähdysvaarallisiin ilmaseoksiin tarkoitetuista laitteista ja suojausjärjestelmistä (918/1996). Työolosuhdedirektiivi on saatettu kansallisesti voimaan asetuksella räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta (576/2003).[71] Räjähdykskelpoisella ilmaseoksella tarkoitetaan seosta, jossa toisena osana on normaali-paineinen ilma ja toisena osana on kaasun, höyryn, sumun tai pölyn muodossa olevia palavia aineita ja jossa palaminen leviää syttymisen jälkeen koko palamattomaan seokseen.

Asetusta (576/2003) sovelletaan työssä, jossa saattaa esiintyä räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamia vaaroja. Asetusta sovelletaan myös yleisen turvallisuuden ylläpitämiseksi sekä henkilö- ja omaisuusvahinkojen estämiseksi siltä osin kuin räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttaman vaaran torjunnasta ei ole muualla säädetty. Asetuksessa työnantajalle asetetut velvollisuudet koskevat soveltuvin osin myös muuta toiminnanharjoittajaa, esimerkiksi vetytankkausaseman toiminnasta vastaavaa yritystä. Velvollisuuksiin kuuluu mm räjähdysvaaran olemassaolon selvittäminen, räjähdysten estäminen ja suojauminen, oikean laitteen valinta oikeaan tilaan, työntekijöiden perehdyttäminen ja räjähdys-suojausasiakirjan laatiminen.

Arvioitaessa räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamaa vaaraa on otettava huomioon 1) räjähdyskelpoisten ilmaseosten syntymisen ja esiintymisen todennäköisyys ja kesto, 2) sähköstaattisten purkauksien ja muiden syttymislähteiden sekä niiden aiheuttamien syttymisten todennäköisyys, 3) laitteistot, käytetyt aineet, prosessit ja niiden mahdolliset yhteisvaikutukset ja 4) ennalta arvattavien vaikutusten laajuus. Toiminnanharjoittajan on ryhdyttävä asianmukaisesti teknisiin tai työjärjestelyitä koskeviin toimenpiteisiin, joilla räjähdykset voidaan estää ja suojautua mahdollisilta räjähdyksiltä. Räjähdyksvaaralliset tilat on luokiteltava (Ex-tilat) ja merkittävä.

Asetus räjähdysvaarallisiin ilmaseoksiin tarkoitetuista laitteista ja suojausjärjestelmistä (917/1996) ja Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös räjähdysvaarallisiin ilmaseoksiin tarkoitetuista laitteista ja suojausjärjestelmistä (918/1996) sisältävät vaati-

muksia koskien laitteita ja suojausjärjestelmiä, joita käytetään asetuksen 576/2003 mukaisesti luokitelluissa tiloissa. Perusvaatimukset Ex-tilojen laitevalinnoille on esitetty asetuksessa 576/2003. ATEX-säädöksiä koskevia ohjeita löytyy Tukesin julkaisemasta oppaasta ATEX Räjähdyksivaarallisten tilojen turvallisuus [71].

6.3.3. Painelaitteita ja koneita koskevia säädöksiä

Painelaitelaissa (869/1999) tarkoitetaan painelaitteella säiliötä, putkistoa ja muuta teknistä kokonaisuutta, jossa on tai johon voi kehittyä ylipainetta, sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettuja teknisiä kokonaisuuksia. Painelaite on rakennettava ja sijoitettava ja sitä on hoidettava, käytettävä ja tarkastettava niin, ettei se vaaranna kenenkään terveyttä, turvallisuutta tai omaisuutta. Lain luvussa 2 on määräyksiä painelaitteen turvallisuuden varmistamisesta.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaitteista (938/1999) sisältää painelaitteita koskevia teknisiä vaatimuksia, luokitusta koskevia vaatimuksia sekä määräyksiä vaatimustenmukaisuuden arvioinnista. Päätöstä sovelletaan painelaitteisiin ja laitekokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar. Paineella tarkoitetaan painetta suhteessa ilmakehän paineeseen (eli alipaine ilmaistaan negatiivisella arvolla).

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä painelaiteturvallisuudesta (953/1999) sovelletaan mm. kuljetettavien painelaitteiden (esimerkiksi vetysäiliöiden) sijoitukseen, käyttöön ja niihin liittyvään tarkastukseen. Kuljetettavalla painelaitteella tarkoitetaan vaarallisten aineiden kuljetuksesta annetussa laissa (719/1994) tarkoitettuja astioita ja säiliöitä. Päätöksessä käsitellään mm. painelaitteen rekisteröintiä, sijoitusta ja painelaitteelle tehtäviä tarkastuksia. Päätöksen (953/1999) 6 luku käsittelee kuljetettavia painelaitteita. Määräyksiä on liittyen mm. täyttöön, täyttöpaikkaan ja tarkastukseen. Nämä määräykset koskevat ensisijaisesti kuljetettavien painelaitteiden täyttöä hoitavaa toimijaa.

Eräiden teknisten laitteiden vaatimustenmukaisuudesta annetun lain (1016/2004) tarkoituksena on varmistaa, että kone, työväline, henkilönsuojain tai muu tekninen laite on vaatimusten mukainen eikä aiheuta valmistajan tarkoittamassa käytössä tapaturman vaaraa eikä terveyden haittaa. Valtioneuvoston asetuksella koneiden turvallisuudesta (400/2008) säädetään koneiden suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvistä olennaisista terveys- ja turvallisuusvaatimuksista sekä niiden vaatimuksenmukaisuuden osoittamisesta, markkinoille saattamisesta ja käyttöön otosta.

6.3.4. Pelastustoimen säädöksiä

Pelastuslain (379/2011) tavoitteena on parantaa ihmisten turvallisuutta ja vähentää onnettomuuksia. Lain tavoitteena on myös, että onnettomuuden uhatessa tai sen tapahduttua ihmiset pelastetaan, tärkeät toiminnot turvataan ja onnettomuuden seurauksia rajoitetaan tehokkaasti. Pelastuslaki velvoittaa omatoimiseen varautumiseen. Sen mukaisesti rakennuksen omistajan ja haltijan sekä toiminnanharjoittajan (esimerkiksi vetytank-

kausaseman toiminnasta vastaavan tahon) on 1) ehkäistävä tulipalojen syttymistä ja muiden vaaratilanteiden syntymistä, 2) varauduttava henkilöiden, omaisuuden ja ympäristön suojaamiseen vaaratilanteissa, 3) varauduttava tulipalojen sammuttamiseen ja muihin sellaisiin pelastustoimenpiteisiin, joihin ne omatoimisesti kykenevät sekä 4) ryhdyttävä toimenpiteisiin, joilla turvataan poistuminen tulipaloissa ja muissa vaaratilanteissa, sekä 5) ryhdyttävä toimenpiteisiin pelastustoiminnan helpottamiseksi.

Pelastuslain mukaisesti pelastussuunnitelma on laadittava sellaiseen kohteeseen, joka on poistumisturvallisuuden tai pelastustoiminnan kannalta tavanomaista vaativampi, tai jossa aiheutuvan vaaran taikka mahdollisen onnettomuuden aiheuttamien vahinkojen voidaan arvioida olevan vakavat. Pelastustoimesta annetussa valtioneuvoston asetuksessa (407/2011) on lueteltu erityyppisiä kohteita, joita velvoite pelastussuunnitelman laatimisesta koskee. Yhtenä on mainittu kohteet, joissa vaarallisen kemikaalin vähäistä teollista käsittelyä ja varastointia saa harjoittaa vain tekemällä siitä kemikaaliturvallisuuslaissa (390/2005) tarkoitetun ilmoituksen pelastusviranomaisille (ks. kappale 6.3.1). Vetytankkausasemien osalta velvoite pelastussuunnitelman laatimisesta koskee tilannetta, missä vetyä on vähintään 0,1 tonnia eli 100 kg.

Pelastussuunnitelmassa on oltava selostus 1) vaarojen ja riskien arvioinnin johtopäätelmistä, 2) rakennuksen ja toiminnassa käytettävien tilojen turvallisuusjärjestelyistä, 3) annettavista ohjeista onnettomuuksien ehkäisemiseksi sekä onnettomuus- ja vaaratilanteissa toimimiseksi sekä 4) mahdollisista muista kohteen omatoimiseen varautumiseen liittyvistä toimenpiteistä.

6.3.5. Rakentamissäädöksiä

Rakentamiseen liittyviä tärkeimpiä säädöksiä ovat Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999) ja Maankäyttö- ja rakennusasetus (895/1999). Laissa 132/1999 säädetään kaavoituksesta sekä rakentamisen ja muiden toimenpiteiden luvanvaraisuudesta. Rakentamiseen liittyviä lupia ovat rakennuslupa ja toimenpidelupa.

Rakennuslupa liittyy varsinaisten rakennusten rakentamiseen ja laajentamiseen. Rakennelmat ja laitokset, jotka eivät tarvitse rakennuslupaa, voivat tarvita toimenpideluvan. Lisäksi kunta voi rakennusjärjestyksessään määrätä, että merkitykseltään ja vaikutukseltaan vähäiseen rakentamiseen tai muuhun toimenpiteeseen voidaan ryhtyä ilman rakennus- tai toimenpidelupaa, kun asianomainen on tehnyt tätä koskevan ilmoituksen kunnan rakennusvalvontaviranomaiselle. Vetytankkausasemien osalta yhteydenpito kunnan rakennusvalvontaviranomaisen kanssa antanee selkeimmät toimintaohjeet.

6.4. Standardeja ja ohjeita

Vetyä, vetyteknologioita ja vedyn käytön turvallisuutta koskevia standardeja ja ohjeita ovat laatineet esimerkiksi International Organisation for Standardisation (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), European Industrial Gas Association (EIGA), Society of Automotive Engineers (SAE) ja Compressed Gas Association (CGA).

Standardeilla pyritään poistamaan kaupan teknisiä esteitä niin Euroopan sisämarkkinoilla kuin kansainvälisessä kaupassa. Lisäksi standardeja käytetään täyttämään EU:n direktiivien teknisiä määräyksiä. [72]

Yhtenevillä standardeilla on kansainvälisesti toimiville yrityksille merkittävä strateginen arvo etenkin aloilla, joilla laajan, samanlaista tuotetta käyttävän kuluttajakunnan luominen on tärkeää. Kansainväliset standardit, niiden harmonisointi ja vastavuoroista tunnustamista koskevat käytännöt alentavat kustannuksia ja edistävät kauppaa poistamalla tuotteisiin kohdistuvia päällekkäisiä ja ristiriitaisia vaatimuksia.

Kattava luettelo vetyyn ja sen käyttöön liittyvistä standardeista ja ohjeista löytyy mm. EU:n HyFacts -projektin kotisivuilta [62]. Näistä monista standardeista ja ohjeista on taulukkoon 6 koottu muutamia vetytankkauksen ja tankkausasemien kannalta tärkeimpiä. Ne on jaoteltu tankkausasemilla käsiteltävän vedyn laatuun liittyviin, tankkauslaitteita ja tankkausta käsitteleviin sekä vedyn käsittelyn turvallisuuteen liittyviin standardeihin ja ohjeisiin.

Taulukko 6. Esimerkkejä vetytankkaukseen liittyvistä standardeista ja ohjeista.

| Vedyn laatua käsitteleviä standardeja ja ohjeita |
|--|
| <p>ISO/TS 14687-2:2008: Hydrogen fuel - Product specification Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Määrittelee polttoaineena käytettävän vedyn laatuvaatimukset. • Tavoitteena on varmistaa jaeltavan vedyn soveltuvuus PEM-polttokennoilla varustettuihin ajoneuvoihin. |
| <p>SAE-J2719: Information Report on the Development of a Hydrogen Quality Guideline for Fuel Cell Vehicles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Määrittelee PEM-polttokennoilla varustettujen ajoneuvojen käyttöön tarkoitettun vedyn laatuvaatimukset. Vedyn tulee olla puhtaudeltaan 99,97 %. • Epäpuhtaudet voivat olla joko inerttejä tai reaktiivisia aineita. Pääsääntöisesti inertit epäpuhtaudet eivät vaikuta kennon toimintaan, mutta voivat vaikuttaa muihin järjestelmiin esimerkiksi säätimiin. Reaktiiviset aineet sitä vastoin voivat vaikuttaa kennon toimintaan tai sen käyttöikään. • Esitetään epäpuhtauksina esiintyvien aineiden (vesi, hiilivedyt, happi, typpi jne.) sallitut maksimipitoisuudet. |
| Tankkauslaitteita käsitteleviä standardeja ja ohjeita |
| <p>ISO 17268:2006: Compressed hydrogen surface vehicle refuelling connection devices</p> <ul style="list-style-type: none"> • Käsittelee kaasumaisen vedyn tankkausaseman ja ajoneuvon välisen liitoksen suunnittelua, turvallisuutta ja käyttöä. • Tavoitteena on estää ajoneuvon tankkaaminen liian korkeapaineisella vedyllä, mahdollistaa tankkaaminen oikealla tai matalapaineisemmalla vedyllä, estää muiden kaasujen tankkaaminen ja estää vedyn tankkaaminen ajoneuvoihin, jotka toimivat muilla kaasumaisilla polttoaineilla. |

| |
|---|
| <p>SAE J2600: Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refuelling Connection Devices</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sovelletaan vetytankkauslaitteisiin, joiden toimintapaine on 25 MPa, 35 MPa, 50 MPa tai 70 MPa. • Sovelletaan suuttimiin ja liittimiin, joiden tavoitteena on estää ajoneuvon tankkaaminen liian korkeapaineisella vedyllä, mahdollistaa tankkaaminen oikealla tai matalampipaineisella vedyllä, estää muiden kaasujen tankkaaminen ja estää vedyn tankkaaminen muita kaasumaisia polttoaineita käyttäviin ajoneuvoihin. |
| <p>SAE J2799: 70 MPa Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fuelling Connection Device and Optional Vehicle to Station Communications</p> <ul style="list-style-type: none"> • Määrittelee ajoneuvojen takkaukseen käytettävien laitteistojen vaatimukset käytettäessä 70 MPa painetta. |
| <p>Tankkausta käsitteleviä standardeja ja ohjeita</p> |
| <p>ISO/TS 20100:2008: Gaseous hydrogen -- Fuelling stations</p> <ul style="list-style-type: none"> • Käsittelee ajoneuvojen käyttöön tarkoitettujen, ulkotiloissa sijaitsevien yleisessä ja ei-yleisessä käytössä olevien vedyn tankkausasemien suunnittelua, käyttöä ja kunnossapitoa. |
| <p>SAE J2601: Fuelling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Määrittelee turvallisuusrajat ja tehokkuusvaatimukset kaasumaisen vedyn tankkaukselle. Kriteerit sisältävät vedyn korkeimman sallitun lämpötilan syöttölaitteen päässä, suurimman sallitun vedyn virtausnopeuden, suurimman sallitun paineen nousun ja muita tehokkuuskriteereitä liittyen vedyn jäähtymiseen annostelijassa (dispenser). • Määrittää raja-arvot tankkaukselle, jossa tankattavan ajoneuvon ja tankkausaseman välillä ei ole tiedonsiirtoa, sekä tankkaukselle, jossa määriteltyä informaatiota siirretään ajoneuvosta dispenserille (varmentaa saamansa tiedon). • Tiedonsiirrolla varustetun tankkauksen suoritus on määritelty standardissa. Standardi määrittää myös auton ja tankkausaseman välisen kommunikointiprotokollan. |
| <p>Vetyturvallisuutta käsitteleviä standardeja ja ohjeita</p> |
| <p>ISO/TR 15916:2004: Basic considerations for the safety of hydrogen systems</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sisältää ohjeita koskien kaasumaisen ja nestemäisen vedyn käyttöä ja käsittelyä. • Tarkastelee keskeisiä turvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä ja riskejä sekä turvallisuuden kannalta tärkeitä vedyn aineominaisuuksia. |

Suomessa ei toistaiseksi ole vetytankkausasemia koskevia viranomaisohjeita. Suomen kaasuyhdistys on yhdessä Turvallisuus- ja kemikaaliviraston (Tukes) kanssa julkaissut suunnitteluohjeen maa- ja biokaasun tankkausasemille [73]. Suunnitteluohjeesta löytyvät perusohjeet tankkausasemien sijoittamiselle sekä tekniset vaatimukset, merkin-

nät, tarkastukset sekä käyttöön ja kunnossapitoon liittyvät asiat. Vaikka suunnitteluohjetta ei sellaisenaan voikaan käyttää vetytankkausasemien suunnitteluohjeena, on siinä kohtia, jotka soveltunevat myös vetytankkausasemille. Vastaavan ohjeen laatiminen vetytankkausasemille tulee varmasti ajankohtaiseksi, kun näköpiirissä alkaa olla vetytankkausasemien määrän lisääntyminen.

7. VEDYN TANKKAUS

Vedyn tankkausmahdollisuuksien järjestäminen ja tankkausverkoston luominen ovat tärkeimpiä vetyinfrastruktuurin kehittämiskohteita, sillä ilman toimivaa ja käyttäjien tarpeiden kannalta riittävän tiheää tankkausverkostoa eivät polttokennoajoneuvot voi yleistyä. Tankkausasemaverkoston luominen ei tapahdu hetkessä, eikä se voi ajoneuvojen demonstraatiovaiheessa eikä markkinoille tulon alkuvaiheissa olla kattavuudeltaan lähelläkään sitä, mihin on totuttu perinteisten polttoaineiden jakelun osalta. Vetytankkausasemat voivat tulevaisuudessa olla joko pelkästään vedyn tankkaukseen tarkoitettuja tai vedyn tankkausmahdollisuus voidaan rakentaa perinteisiä polttonesteitä jakelevien asemien yhteyteen.

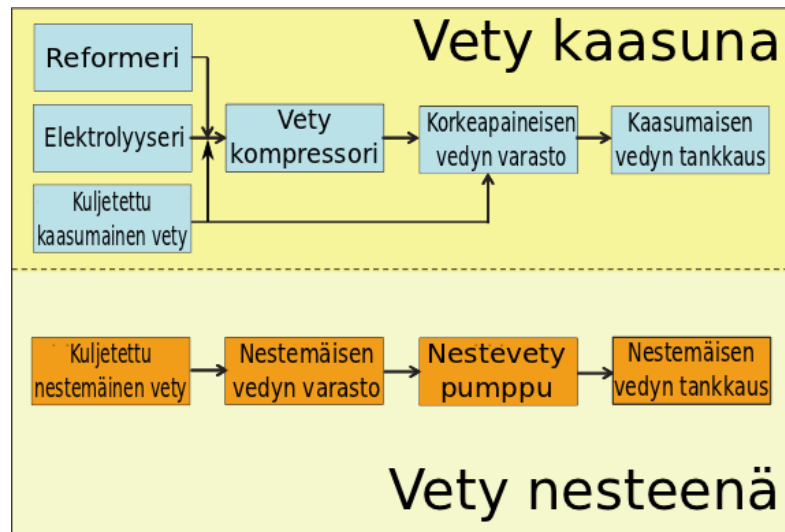
Tarvittavien vetytankkausasemien lukumäärä on sidoksissa polttokennoajoneuvojen markkinoille tulon ja niiden yleistymiseen. Eri tahot ovat esittäneet arvioita vetytankkausasemien määrän kehittymisestä. Amerikkalaisen Pike Research Companyn vuonna 2011 esittämän arvion mukaan vuonna 2020 toiminnassa olisi maailmanlaajuisesti noin 5 000 vetytankkausasemaa ja vuoteen 2020 mennessä polttokennoajoneuvojen kokonaismäärä olisi noin miljoona kappaletta. [76; 77] California Fuel Cell Partnershipin, mihin kuuluu autonvalmistajia ja energiayhtiöitä, suunnitelmissa on saada Kaliforniaan 40 vetytankkausasemaa vuoden 2014 loppuun mennessä. Nämä palvelisivat 4 000 polttokennoajoneuvon tarpeita. [78]

Vedyn tankkausverkosto tulee todennäköisesti ensin muodostumaan tietyille melko rajatuille alueille ns. Hydrogen Highways väylien varrelle. Tankkausverkostoja on luotu esimerkiksi Saksaan, Japaniin ja Kaliforniaan. Skandinaviassa vetytankkausasemien verkosto on luotu Tanskan sekä Ruotsin ja Norjan eteläosien alueille. [79; 80] Kappaaleessa 7.3 olevissa kartoissa on esitetty vuoden 2011 lopun tilanne Euroopassa ja muualla maailmassa toimivien ja suunnitteilla olevien vetytankkausasemien osalta.

7.1. Vetytankkauksen vaihtoehdot

Vety voidaan tankata ajoneuvoon joko kaasumaisena tai nestemäisenä. Tankattavan vedyn olomuoto vaikuttaa suuresti tankkausaseman teknisiin ratkaisuihin ja sille asetettuihin vaatimuksiin. Kaasumaisen vedyn osalta oleellinen tankkauksen toteuttamiseen liittyvät tekijä on kaasuna olevan vedyn matala energiatiheys tilavuuteen nähden. Kaasumainen vety täytyy tankkausta varten paineistaa korkeaan paineeseen, jotta saavutetaan suurempi energiatiheys ja ajoneuvon tankkiin saadaan riittävän käyttösäteen varmistava määrä vetyä. Nestemäisen vedyn tankkauksen suurimpana haasteena on tarvit-

tavan matalan lämpötilan ylläpitäminen ja varmistaminen. Vedyn tankkauksen perusratkaisut on esitetty kuvassa 24.

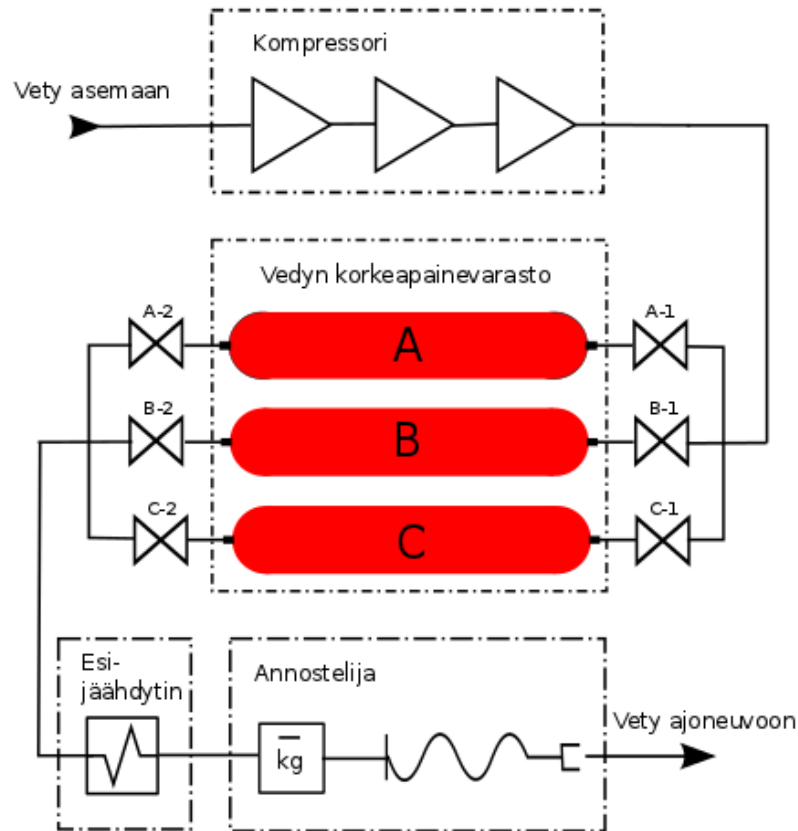


Kuva 24. Vedyn tankkauksen perusratkaisut. [81]

Kaasumaisena tankattava vety voidaan tuottaa paikallisesti tankkausasemalla esimerkiksi maakaasun reformoinnilla tai elektrolyysillä, tai se voidaan kuljettaa tankkausasemalle muualla sijaitsevalta suuremmalta tuotantolaitokselta. Vedyn nesteyttämisen korkeiden kustannusten takia nestemäisenä tankattava vety toimitetaan tankkausasemalle suuremmalta tuotantolaitokselta, missä myös vedyn nesteyttäminen tapahtuu. Vedyn valmistusta ja kuljetusta on käsitelty luvussa 5. Seuraavassa pääpaino on kaasumaisen vedyn tankkauksessa, koska lähes kaikki nykyisistä polttokennoajoneuvoista tankkaavat kaasumaista vetyä.

7.1.1. Vety kaasuna

Polttokennoajoneuvon tankkaus kaasumaisella vedyllä perustuu paine-eroon. Tankkausaseman säiliöissä vety varastoidaan korkeassa paineessa ja tankkauksessa vety siirtyy paine-eron avulla ajoneuvon vetytankkiin, missä painetaso on alhaisempi. [56] Paine-eron saavuttamiseksi ja tankkauksen toteuttamiseksi tärkeimmät tankkausaseman laitekokonaisuudet ovat vedyn paineistukseen käytettävä kompressori, korkeapaineisen vedyn säiliöt, vedyn esijäähdytyslaitteisto ja vedyn annosteluun käytettävä laitteisto (dispenser). Näiden lisäksi asemassa on vedyn siirtoon, sen puhtauden varmistamiseen ja annostelun hallintaan liittyviä laitteita. Aseman toiminnan ja tankkauksen onnistumisen kannalta välttämättömiä ovat myös mittauksiin (lämpötila, paine, virtaus) ja säätöihin liittyvät komponentit ja järjestelmät. Turvallisuuden varmistamiseksi asemassa on turva-automaatiikkaa ja suojausjärjestelmiä. Kuvassa 25 on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva kaasumaisen vedyn tankkausasemasta. [56]



Kuva 25. Kaasumaisen vedyn tankkausaseman päälaitteet.

Tankkausaseman kompressorit nostavat tankkausasemalle toimitetun vedyn paineen tankkauksen vaatimaan paineeseen (paine kuvan 25 säiliöissä A, B ja C). Kompressorit ovat tavallisesti monivaiheisia, jotta vety saadaan puristettua tehokkaasti tankkauspa-neeseen. Jotta tankkaus onnistuu, on paineen tankkausaseman vetyvarastoissa oltava selvästi korkeampi kuin ajoneuvon tankin maksimitäyttöpaine. Vedyn varastointipaine on 400–500 bar, kun ajoneuvon maksimi täyttöpaine on 350 bar ja 850–1000 bar, kun maksimitäyttöpaine on 700 bar. Nykyiset polttokennoautot on varustettu 700 bar vetytankeilla, jotta tankkauksella päästään riittäviin käyttöasteisiin. [56] Tällainen tankki on nettotilavuudeltaan 120 l ja sinne mahtuu 4–5 kg vetyä. Tankkijärjestelmän kokonai-smassa on noin 85 kg. [75]

Korkeapaineisen vedyn tankkauksen yhteydessä vedyn lämpötila nousee. Tämä muutos on otettava huomioon, ettei tankkausasemalla sallittuja vedyn lämpötila- ja painerajoja ylitetä. Tankkauksen aikana tapahtuvalle lämpötilan nousulle on kaksi syytä. Tankkauksen alkaessa korkeapaineisen vedyn paine laskee voimakkaasti, kun se virtaa matalammassa paineessa olevaan ajoneuvon tankkiin. Nopea paineen lasku aiheuttaa vedyn lämpötilan nousua, koska tankkausolosuhteissa vedyn Joule-Thomson kerroin on negatiivinen. Joule-Thomson -ilmiötä on käsitelty kappaleessa 5.3 vedyn nesteytyksen yhteydessä. Toinen vedyn lämpötilan nousuun vaikuttava tekijä on vedyn paineen nousu ajoneuvon tankissa, kun tankkia täytetään vakiovirtauksella. Tästä syystä johtuva läm-

pötilan nousu on voimakkainta tankkauksen alkuvaiheessa, kun paine ajoneuvon tankissa on alimmillaan. Lämpötilan nousunopeus pienenee tankissa olevan vedyn paineen kasvaessa. Tankkauksen yhteydessä tapahtuvan vedyn lämpötilannousun takia tankkausasemassa on vedyn jäädytykseen tarkoitettu vedyn esijäähdytyslaitteisto.

Tankattavan vedyn määrä mitataan tankkausaseman annostelijalaitteistossa. Mittaukseen tarvittavien laitteiden lisäksi annostelijassa säädetään tankattavan vedyn virtausnopeutta siten, että se ei ylitä virtaukselle asetettuja raja-arvoja. Ajoneuvon tankkausta suorittavan henkilön näkökulmasta kaasumaisen vedyn tankkaus ei oleellisesti poikkea perinteisestä polttonesteiden tankkauksesta. Manuaalisia ihmisen tekemiä toimintoja tankkauksessa ovat annostelijassa olevan tankkaussuuttimen yhdistäminen ajoneuvoon ja sen irrottaminen siitä. Kuvassa 26 on esimerkki kaasumaisen vedyn tankkausyhteestä.



Kuva 26. Kaasumaisen vedyn tankkausyhde.

Kun kaasutiivis yhteys tankkausaseman ja ajoneuvon vetytankin välille on luotu, tapahtuu vedyn siirto ajoneuvon tankkiin tankkausaseman toimintaa ohjaavan automaattikan avulla. Standardi SAE TIR J2601 (ks. luku 6.4) määrittelee turvallisuusrajat ja tehokkuusvaatimukset kaasumaisen vedyn tankkaukselle. Kriteerit sisältävät vedyn korkeimman sallitun lämpötilan syöttölaitteen päässä, suurimman sallitun vedyn virtausnopeuden, suurimman sallitun paineen nousun sekä tehokkuuskriteereitä liittyen vedyn jäädytykseen annostelijassa (dispenser). Automaatiojärjestelmän suorittamien mittausten sekä ulkoisten olosuhteiden vaikutusten huomioon ottamisella (esim. ulkoinen lämpötila) varmistetaan, ettei paine ajoneuvon tankissa pääse liian suureksi ja että tankkaus tapahtuu standardin edellyttämällä tavalla.

Polttokennokäyttöisen henkilöauton tankkaus kaasumaisella vedyllä tapahtuu nykyisillä teknisillä ratkaisulla muutamassa minuutissa. Lyhyeen tankkaus aikaan päästään, kun kuvan 25 mukaisessa ratkaisussa tankkaus alkaa säiliöstä A (venttiili A-2 auki, B-2 ja C-2 kiinni) ja jatkuu siitä, kunnes paine säiliössä A laskee tietylle tasolle. Tämän jälkeen tankkaus jatkuu säiliöstä B (venttiili B-2 auki, venttiilit A-2 ja C-2 kiinni), jossa paine on edelleen korkea. Kun paine säiliössä B on laskenut säädetylle alarajalle, vii-

meistellään ajoneuvon tankkaus säiliöstä C (venttiili C-2 auki, venttiilit A-2 ja B-2 kiinni). Järjestelmän automatiikka ohjaa säiliöiden venttiilien avautumista ja sulkeutumista asetettujen säätöalgoritmien mukaisesti. Yllä kuvatulla järjestelyllä varmistetaan, että paine-ero tankkausaseman vetysäiliön ja ajoneuvon vetytankin välillä on koko tankkauksen ajan riittävän suuri. Tämä järjestely mahdollistaa myös tankkauksen yhteydessä tyhjentyneen varastosäiliön täyttämisen ja sen saattamisen valmiiksi seuraavaa tankkausta varten. Kun venttiili A-2 on suljettu, voidaan venttiili A-1 avata ja täyttää säiliötä A samanaikaisesti kun ajoneuvoa tankataan säiliöstä B.

Tankkausasemat voidaan jaotella niiden kapasiteetin mukaan pieniin 50 kg vetyä päivässä, keskikokoisiin 500 kg vetyä päivässä ja suuriin 1 300 kg vetyä päivässä toimittaviin asemiin. Oletuksilla, että ajoneuvo kuluttaa 0,8 kg vetyä sadalla kilometrillä ja että siinä on 4–5 kg vetysäiliö, pystytään pienillä asemilla tankkaamaan noin kymmenen ajoneuvoa päivässä, keskikokoisella noin 100 ajoneuvoa päivässä ja suurella noin 300–400 ajoneuvoa päivässä. Suuren vetytankkausaseman kapasiteetti on verrattavissa suureen perinteiseen tankkausasemaan.[56]

Standardi SAE TIR J2601 määrittelee tankkausasemassa käytettävät annostelijat eri luokkiin. Standardin vaatimusten mukaisesti tehokkaimpaan luokkaan kuuluvassa tankkausasemassa annosteltavan vedyn lämpötilan on oltava välillä -40 °C – -33 °C 15 sekunnin kuluttua tankkauksen alkamisesta. Tankattavan vedyn lämpötila vaikuttaa siihen kuinka nopeasti tankkaus voidaan suorittaa ilman ajoneuvon tankissa olevan vedyn lämpötilan liiallista nousua. Tankattavan vedyn lämpötilan tulee pysyä edellä mainitulla lämpötilavälillä koko tankkauksen ajan.

7.1.2. Vety nesteenä

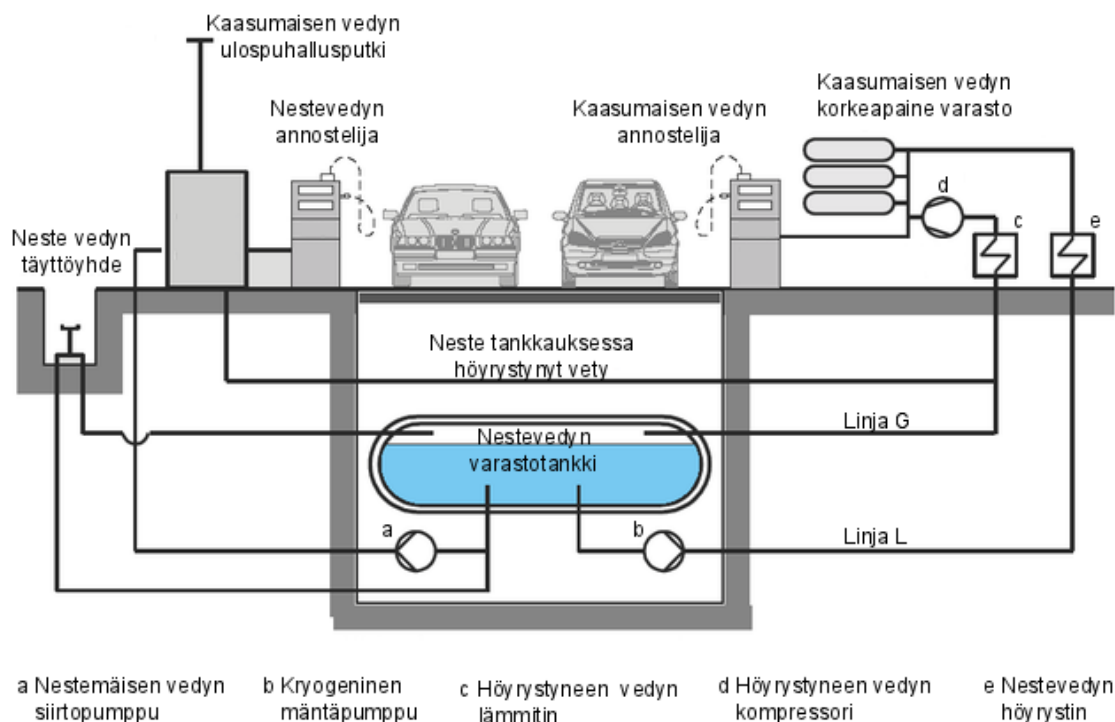
Nestemäisen vedyn tankkausasema muistuttaa perinteisten polttonesteiden tankkausasemia. Sen peruskomponentit ovat nestevedyn varastosäiliö, vedyn siirtopumppu ja -putkisto, nestemäisen vedyn jakelija sekä tarvittavat säätö-, mittaus- ja turvallisuuslaitteistot. Tankkausaseman nestevetysäiliö on monivaippainen tyhjöeristetty säiliö, joka voi olla sijoitettu joko maan päälle tai maan alle. Tyypillisesti paine säiliössä on 2 bar ja lämpötila noin -253 °C . Nestevety siirretään varastosäiliöstä ajoneuvon tankkiin pumpulla. Tyypillinen virtausnopeus on 0,05 kg/s. [55].

Nestemäistä vetyä käyttävän ajoneuvon tankkaus (noin 8 kg vetyä) tapahtuu noin viidessä minuutissa. Tyypilliset mitat nestemäistä vetyä käyttävän auton tankille ovat 660 x 880 mm ja järjestelmän massa on noin 130 kg. Manuaalisia toimintoja nestevedyn tankkauksen yhteydessä ovat ainoastaan tankkausyhteen kiinnittäminen ja irrottaminen, muu tankkaus tapahtuu automatiikan ohjaamana. Kuvassa 27 on esimerkki nestemäisen vedyn tankkausyhteestä.



Kuva 27. Esimerkki nestemäisen vedyn tankkausyhteestä [55].

Nestemäistä vetyä voidaan käyttää vedyn varastointiin myös silloin, kun vedyn tankkaus ajoneuvoon tapahtuu kaasumaisena. Kuvassa 28 on esitetty tankkausasematarkaisu, missä vetyä voidaan tankata joko nestemäisenä tai kaasumaisena. Kuvan vasemmalla puolella olevasta annostelijasta tankataan nestemäistä vetyä ja oikeanpuoleisesta annostelijasta kaasumaista vetyä.



Kuva 28. Periaatekuva tankkausasemasta, jossa nestemäisenä varastoitavaa vetyä voidaan tankata joko nestemäisenä tai kaasumaisena. [56]

Nestemäisenä varastoitavasta vedystä tapahtuu jatkuvasti höyrystymistä, mikä aiheuttaa paineen nousua varastosäiliössä. Paineen hallitsemiseksi vety täytyy joko nesteyttää uudelleen tai säiliöstä on poistettava kaasumaista vetyä. Varastosäiliössä höyrystynyt vety voidaan säiliön kaasutilasta johtaa lämmityksen ja paineistuksen kautta korkea-

painesäiliöihin, joista tankataan kaasumaista vetyä (kuvan 28 linja G). Myös nestevedyn tankkauksen yhteydessä höyrystynyt vety voidaan ohjata kompressorin kautta korkeapainesäiliöihin. Kaasumaisena tapahtuvan tankkauksen tarpeisiin vetyä voidaan myös pumpata nestemäisenä höyrystimille ja johtaa kaasumainen vety korkeapainesäiliöihin (kuvan 28 linja L). Kuvan 28 oikean puolen tankkausjärjestely on siis perusratkaisuiltaan sama kuin, mitä on esitetty kappaleessa 7.1.1.

7.2. Eurooppalaisten vetytankkausasemien perusratkaisut

Vuosina 2005–2007 toteutetun EU:n HyApproval -tutkimushankkeen tavoitteena oli luoda yhteinen lähestymistapa ja yhteiset hyväksymiskriteerit vetytankkausasemille Euroopassa. Pyrkimyksenä oli määritellä tyypillinen eurooppalainen vetytankkausasema, joka voitaisiin ottaa käyttöön ja hyväksyä mahdollisimman monessa EU-maassa.

Hankkeeseen osallistui 25 tahoja, jotka edustivat monipuolisesti teollisuutta, yrityksiä, tutkimusorganisaatioita ja valvontaa suorittavia tahoja. Osalla partnereista oli laaja kokemus vetytankkausasemista. Mukana oli partnereita myös Kiinasta, Japanista ja Yhdysvalloista. He toivat hankkeeseen näkemystä ja tietoa Euroopan ulkopuolella sovellettavista säädöksistä, määräyksistä ja standardeista. Hankkeen tuloksena julkaistiin *Handbook for hydrogen refuelling station approval*. [55] Tämän käsikirjan tavoitteena on osaltaan myötävaikuttaa kehittyvän vetyinfrastruktuurin turvallisuuteen. Se pyrkii täydentämään ja konkretisoimaan esimerkiksi tankkausasemia ja tankkauksen järjestämistä koskevilla standardeilla esitettyjä ratkaisuja.

Käsikirja on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen sisältää vetytankkausasemien suunnittelua, käyttöä ja huoltoa koskevia ohjeita. Siinä on tietoa ja esimerkkejä vetytankkausaseman turvallisista teknisistä ratkaisuista sekä käytön ja kunnossapidon parhaista käytännöistä. Tankkausaseman kunnossapito-ohjelma koostuu tietyin väliajoin tehtävistä laitteiden, putkistojen, venttiilien ja liitosten kunnan ja tiiveyden varmistamisesta. Käsikirjan mukaan esimerkiksi kompressorista tarkastetaan vuosittain siihen liittyvien venttiilien tiiveys, mekaanisten osien kunto sekä lämpötilaa, painetta ja vedyn virtausta säätevien komponenttien kunto ja toiminta. Turvallisuuden varmistamiseen liittyvien komponenttien, esimerkiksi varoventtiilien ja tankkausyhteiden oikea toiminta suositellaan tarkastettavaksi 3 kuukauden välein. [55]

Käsikirjan toisessa osassa on esimerkkejä Euroopan eri maissa noudatettavista vetytankkausasemien lupakäytännöistä. Käsikirjan laatimisen ja julkaisemisen tavoitteena on ollut, että sen sisältämiä ohjeita voivat käyttää mm. eurooppalaiset viranomaiset myöntäessään vetytankkausasemien käyttö lupia sekä yritykset ja organisaatiot suunnitelluissaan ja ottaessaan käyttöön vetytankkausasemia.

7.3. Vetytankkausasemia maailmalla

Tietoa maailmalla käytössä olevista vetytankkausasemista löytyy esimerkiksi saksalaisen Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH:n ja TÜV SÜDin ylläpitämältä nettisivustolta osoitteessa <http://www.h2stations.org/>. Julkaistun tiedon mukaan toiminnassa olevien vetytankkausasemien määrä vuoden 2011 lopussa oli 215 kappaletta. Näistä 85 oli Euroopassa ja 80 Yhdysvalloissa. Loput sijaitsivat Itä-Aasiassa, lähinnä Japanissa, ja Brasiiliassa. Tietoja vetytankkausasemista löytyy myös FuelCell 2000 -kotisivuilta osoitteesta <http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>.

Kuvan 29 kartassa on esitetty toiminnassa ja suunnitteluvaiheessa olevien vetytankkausasemien sijoittuminen maailmalla vuodenvaihteessa 2011–2012 [82]. Vuonna 2011 maailmalla otettiin käyttöön 12 uutta vetytankkausasemaa, joista 9 sijaitsi Euroopassa. Suunnitteilla oli 122 vetytankkausasemaa. Kuvassa 30 on Euroopassa olevien tankkausasemien verkosto. Suomen kohdalla kartalla näkyvät Rovaniemen Arctic Driving Centerin käyttöön tammikuussa 2012 otettu vetytankkausasema ja Vuosaaren satamaan suunnitteilla oleva polttokennosovellusten demonstraatiohankkeen tarpeisiin tarkoitettu tankkausasema.



Kuva 29. Toiminnassa olevien ja suunnitteluvaiheessa olevien vetytankkausasemien sijoittuminen maailmalla vuodenvaihteessa 2011–12 [82].

Yhdysvaltalaisen Pike Research Companyn mukaan vedyn tankkaukseen ja tankkausasemiin liittyvä toiminta on toistaiseksi keskittynyt suurille kansainvälisille teollisuuskaasu- ja energiayhtiöille, jotka pyrkivät edistämään laajamittaisen vetyinfrastruktuurin kehittymistä. [76] Esimerkkejä toimijoista, joilla on vetytankkausasemia ovat mm. Air Liquid, Linde ja H2-Logic.



Kuva 30. Euroopassa toimivat ja suunnitteilla olevat vetytankkausasemat tammikuussa 2012. [82]

Pike Research Company on julkaissut ennusteen, jonka mukaan vuonna 2020 toiminnassa olisi maailmanlaajuisesti noin 5 000 vetytankkausasemaa polttokenokäyttöisten henkilöautojen, linja-autojen ja trukkien tarpeisiin. Vuonna 2020 trukkien ja henkilöautojen ennustetaan edustavan noin 70 % vetyä käyttävistä polttokennosovelluksista. Linja-autot, skootterit, varavoimasovellukset (UPS) ja CHP-sovellukset edustaisivat loppua kolmasosaa. [83] Ero tämän ennusteen ja vetytankkausasemien nykyiseen määrään välillä on melkoisen suuri. Jotta ennustettu vetytankkausasemien määrä toteutuisi, olisi autoteollisuuden saatava polttokenokäyttöiset ajoneuvot kapalliseen tuotantoon asettamansa tavoitteen mukaan vuonna 2015 ja tämän jälkeen niiden olisi yleistyttävä melko nopeasti ainakin Hydrogen Highways alueilla.

Huhtikuulta 2011 olevan Pike Research Companyn ennusteen mukaan polttokennoajoneuvojen esikaupallisessa vaiheessa, ennen vuotta 2015, niitä myytäisiin noin 10 000 kappaletta. Vuoden 2015 paikkeilla polttokennoajoneuvoja arvioidaan myytävän yli 50 000 kappaletta vuodessa ja vuoden 2020 jälkeen myynti olisi lähes 400 000 polttokennoajoneuvoa vuodessa. [77] Polttokennoajoneuvojen yleistymisen ehtona on se, että kuluttajat ovat valmiita ja halukkaita ostamaan ja käyttämään vetyä käyttäviä ajoneuvoja. Polttokennoajoneuvojen on oltava hinnaltaan ja käytettävyydeltään kilpailukykyisiä perinteisten autojen kanssa. Toimivien teknisten tuotteiden ja ratkaisujen markkinoille tulon lisäksi erilaisilla yhteiskunnallisilla päätöksillä ja tukimuodoilla voidaan ihmisten ostokäyttäytymiseen vaikuttaa, jos sitä pidetään tarpeellisenä.

Esimerkkejä vetytankkausverkoston laajentamisesta on mm. Keski-Euroopasta ja Skandinaviasta. Kesällä 2011 julkaistun tiedon mukaan [84] kaasuyhtiö Linde ja autovalmistaja Daimler aikovat rakentaa Saksaan 20 uutta vetytankkausasemaa seuraavan kolmen vuoden aikana. Tankkausasemat tulevat sijoittumaan suuriin kaupunkeihin ku-

ten Stuttgartiin, Berliiniin ja Hampuriin, joissa jo nyt on vetytankkausmahdollisuus, sekä pohjois-etelä ja itä-länsi suuntaisten valtaväylien varteen. Tällä pyritään takaamaan vedyn tankkausmahdollisuus kasvavalle polttokennoajoneuvojen joukolla. Uudet vetytankkausasemat pyritään sijoittamaan strategisesti merkittäville reiteille, mikä mahdollistaisi vetykäyttöisten ajoneuvojen käytön koko Saksan alueella. Suunnitelman toteutuessa Saksa olisi maailman ensimmäinen maa, jonka koko alueella olisi mahdollista ajaa vetykäyttöisellä ajoneuvolla. [84]

Helmikuussa 2012 avattiin Hampurissa Euroopan suurin vetytankkausasema. Se kykenee toimittamaan 750 kg vetyä vuorokaudessa niin julkisen liikenteen linja-autojen (20 kpl) kuin myös henkilöautojen tarpeisiin. Tankkausaseman hinta oli noin 10 miljoonaa euroa ja sen rahoittivat Vattenfall ja Saksan liikenneministeriö. [85]

The Scandinavian Hydrogen Highway -yhteenliittymän (Tanska, Ruotsi, Norja) tavoitteena on tehdä Skandinaviasta yksi Euroopan ensimmäisiä alueita, missä on kattava kaupallinen vetytankkausverkosto. Pyrkimyksenä on saada vuoteen 2015 mennessä tankkausverkosto, joka muodostuu 15 vetytankkausasemasta ja siirrettävistä asemista. Nämä palvelisivat 100 linja-auton, 500 henkilöauton ja 500 erikoisajoneuvon tarpeita. [86]

Vetykäyttöisten ajoneuvojen lisääntyessä vetyinfrastruktuurin laajentaminen on välttämätöntä. Perinteisten bensiiniasemien lukumäärä ja tiheys eivät kuitenkaan ole järkevä vertailuperuste arvioitaessa tarvittavien vetytankkausasemien määrää jakeluinfrastruktuurin kehityksen alkuvaiheessa. Järkevällä sijoittelulla voidaan muodostaa riittävän kattava takausasemaverkosto ja näin taata lisääntyvien polttokennoajoneuvojen tankkausmahdollisuudet. On oletettavaa, että tarvittavan tankkausverkoston luominen vaatii alkuvaiheissa myös erilaisia yhteiskunnan tukitoimia. Ajoneuvojen määrän lisääntyessä myös tankkausasemien määrä tulee lisääntymään, koska tällöin niistä tulee taloudellisesti kiinnostavia sijoitus- ja rakennuskohteita. Tällöin myös tarvittavien tukien määrä vähenee.

8. VEDYN TANKKAUKSEEN LIITTYVÄT HANKKEET SUOMESSA

Suomessa liikkuviin polttokennosovelluksiin ja vedyn tankkausinfrastruktuuriin liittyvää tutkimusta on tehty Tekesin (Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus) rahoittamassa Polttokennot -tutkimusohjelmassa, joka ajoittuu vuosille 2007–2013. Polttokennot -ohjelman tavoitteena on tutkia, hyödyntää ja kaupallistaa polttokennoalan teknologiaa Suomessa. Liikkuvina sovelluksina ovat olleet lähinnä työkoneet ja satami- en kontinkäsittelykoneet kuten lukit ja mobiilipukkinosturit. [87]

Polttokennot -ohjelman loppuvaiheessa painotus on polttokennosovellusten demonstraatiohankkeissa. Tähän liittyen käynnistyi vuoden 2011 loppupuolella Demo2013 -hanke, jonka tavoitteena on demonstroida Polttokennot -ohjelman hankkeissa ja eurooppalaisissa yhteishankkeissa saavutettuja tuloksia. Erilaisia polttokennosovel- luksia on tarkoitus esitellä toiminnassa yhdessä paikassa Vuosaaren satamassa. Tämä tulee olemaan päästöttömien energiatehokkaiden ratkaisujen näyteikkuna, jossa sovel- lusalueet voimalaitoksesta työkoneisiin ja televerkon tukiaseman varavoimaan ovat yh- täaikaisessa käynnissä Vuosaaren satamassa vuonna 2013. [87]

Vetytankkauksen järjestämisen edelläkävijä Suomessa on kaasuja toimittava Oy Woikoski Ab, jolla on pitkäaikainen kokemus vedyn valmistuksesta, talteenotosta ja toimittamisesta. Yritys on mukana Demo2013 -hankkeessa tarvittavan vedyn toimittajana ja tankkausmahdollisuuden järjestäjänä. Talvella 2012 Woikoski hankki kokemusta vedyn tankkausjärjestelyistä toimittamalla tanskalaisen H2Logicin vetytankkausaseman ja sen tarvitseman vedyn Rovaniemellä sijaitsevan Arctic Driving Centerin käyttöön. Osallistumalla polttokennosovelluksiin ja vetytankkaukseen keskittyviin hankkeisiin Woikoski haluaa olla mukana kehittämässä vedyn liikennekäytön vaatimaa jakeluinfra- struktuuria ja samalla jatkaa perinteitään vedyn toimittajana. Woikosken tavoitteena on tulevaisuudessa pystyä tarjoamaan vedyn tuotantoon, jakeluun, varastointiin ja tankka- ukseen kuuluvat palvelut.

8.1. Rovaniemen Arctic Driving Centerin vetytankkausasema

Suomen ensimmäinen vetytankkausasema otettiin käyttöön tammikuussa 2012 Arctic Driving Centerissä Rovaniemellä. Arctic Driving Center on yksityinen ja itsenäinen ajoneuvojen testaukseen keskittyvä yritys. Sillä on Rovaniemen pohjoispuolella ajoneu- vojen testauksessa tarvittavia laitteistoja ja testausratoja, joilla eri autovalmistajat voivat testata uusien automalliensa käyttäytymistä ja toimivuutta erilaisissa olosuhteissa. Poh-

joiden sijaintinsa puolesta Arctic Driving Center tarjoaa erinomaiset mahdollisuudet kylmissä ja talvisissa olosuhteissa tapahtuvien ajoneuvotestien suorittamiseen.

Monet suurista autovalmistajista ovat sitoutuneet yhteiseen periaatepäätökseen käynnistää polttokenoajoneuvojen sarjatuotanto vuonna 2015. Tämä edellyttää ajoneuvojen toimivuuden, luotettavuuden ja kestävyys selvittämistä, testaamista ja varmistamista myös arktisissa olosuhteissa. Arctic Driving Center halusi tarjota talvella 2012 autovalmistajille vetykäyttöisten polttokenoajoneuvojen testausmahdollisuuden, mikä tietenkin edellytti vedyn tankkauksen järjestämistä. Tankkausmahdollisuus toteutettiin yhteistyössä Oy Woikoski Ab:n kanssa, joka vuokrasi Arctic Driving Centerin tarpeita palvelevan vetytankkausaseman tanskalaiselta H2Logicilta.

8.1.1. Tankkausaseman teknisiä ja toiminnallisia tietoja

Arctic Driving Centerin käytössä ollut asema on siirrettävä, 30 jalan (eli 9 metrin) merikonttiin rakennettu vetytankkausasema, joka tuotiin Tanskasta maantiekuljetuksena tammikuun alussa 2012. Tankkausasema nostettiin rekka-auton lavalta kahden nosturin avulla sitä varten valetun betonilaatan päälle. H2Logicin edustajat vastasivat tankkausaseman toimintakuntoon saattamiseen liittyvistä toimista ja Woikosken edustajat pullokonttilavan ja tankkausaseman välisen yhteyden tekemisestä.

Tankkausasemaan korkeapainevarastoihin mahtuu yhteensä 37,4 kg vetyä. Korkeapainevarastojen lisäksi tankkausasemassa on matalamman paineen varasto johon mahtuu 16,8 kg vetyä. Asennusten ja paineistetun vedyn tankkien täytön jälkeen asemaa testattiin tankkaamalla testitarkoitukseen suunniteltuja tankkeja. Testien avulla varmistettiin aseman oikea toiminta ja voitiin todeta myös että asema toimii standardin mukaisesti.

Rovaniemen vetytankkausasemalla pystyttiin tankkaamaan ajoneuvoja, joiden käyttämän vedyn maksimipaine on 700 bar. Tankkausaseman kapasiteetti on noin 30 kg vetyä/vrk. Tämä mahdollistaa noin 10 ajoneuvon tankkaamisen vuorokaudessa. Woikoski toimitti tankattavan vedyn pullokonttilavoilla 200 bar paineessa (ks. luku 5.3 kuva 21). Vety toimitettiin autokuljetuksena Äetsästä tai Joutsenosta Kemira Chemicalsin tehtailta, missä se on otettu natriumklooraatin tuotannon sivutuotteena talteen.

Tankkausasemakontti (kuva 31) sisältää vedyn paineistukseen tarvittavan kompressorin, korkeapaineisen vedyn säiliöt, tankattavan vedyn jäähdytysjärjestelmän, vedyn tankkausjärjestelmän (dispenser) ja kokonaisuutta ohjaavan automatiikan. Teknisiltä perusratkaisuiltaan se on luvussa 7.1.1 esitetyn kuvan 25 mukainen.



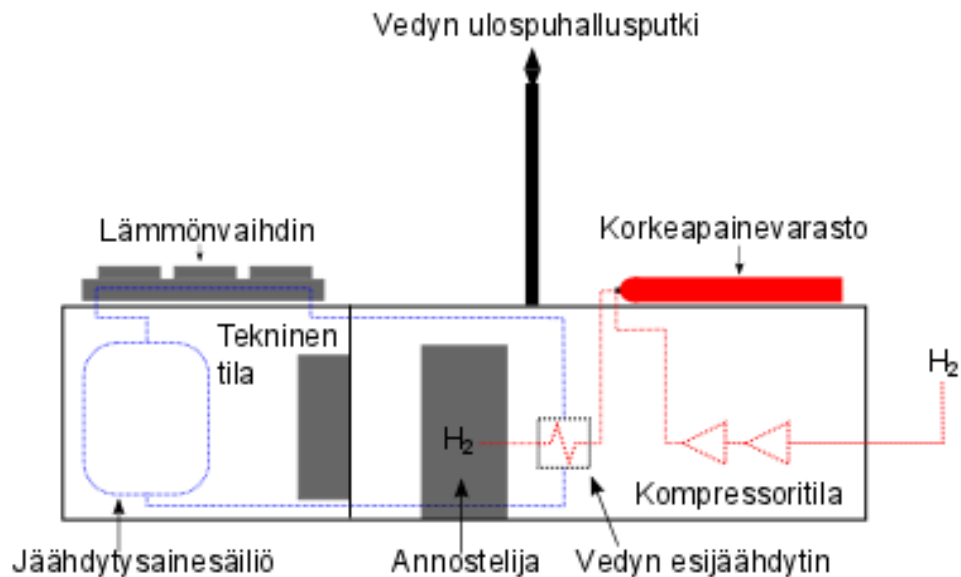
Kuva 31. Rovaniemen Arctic Driving Centerin vetytankkausasema. (kuva H2Logic)

Pullokonttilavassa oleva vety siirretään tankkausasemaan kuvassa 32 esitetyn kytken avulla. Toinen kuvassa olevista punaisista letkuista liitettiin pullokonttilavaan, mistä vety ohjattiin kaasukeskuksen venttiilien kautta tankkausasemaan. Kuvassa vasemmassa yläkulmassa oleva putki on tankkausasemaan johtava syöttöputki. Järjestelmä on suunniteltu siten, että tankkausasemaa voidaan syöttää kahdesta pullokonttilavasta samanaikaisesti. Tällä järjestelyllä tankkausasemaa syöttävä pullokonttilava voidaan vaihtaa toiseen syötön katkeamatta.



Kuva 32. Vedyn toimitus tankkausasemaan.

H2Logicin tankkausasema on toteutettu standardien SAE J2601 (Fuelling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles) ja SAE J2799 (70 MPa Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fuelling Connection Device and Optional Vehicle to Station Communications) mukaisesti. Tankkausasema on suunniteltu toimimaan kylmissä olosuhteissa aina $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ asti. Lämpötilan laskiessa tämän alle tankkausasema siirtyy automaattisesti stand-by -tilaan (winter safety mode). Tankkaaminen on mahdollista vasta kun lämpötila nousee sallittuihin lämpötilarajoihin. Laitteistojen sijoittuminen tankkausasemakonttiin on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Tankkausaseman päälaitteet ja niiden sijoittuminen konttiin.

Kompressoritilassa sijaitsevat kompressori, instrumentointi, vedyn virtausta säätelevät venttiilit, putkistot sekä vedyn jäähdyttämiseen tarkoitettu lämmönsiirrin. Tankkausaseman kompressori on kaksivaiheinen kalvokompressori. Ensimmäisen vaiheen imupaine on välillä 5–50 bar jolloin poistopaine on 130 bar. Toisen vaiheen imupaine on 45–500 bar ja poistopaine 1000 bar. Kompressoritila on määritelty Ex-tilaksi (tilaluokka 2). Tämä asettaa Atex-säädöksiin mukaiset vaatimukset tilassa käytettävien laitteiden turvallisuustasolle [71]. Tilassa käytettävien laitteiden tulee olla laiteluokkaa 1, 2 tai 3. Laiteluokan 1 laitteilla on *erittäin korkea turvallisuustaso*, laiteluokan 2 laitteilla on *korkea turvallisuustaso* ja laiteluokan 3 laitteilla on *normaali turvallisuustaso*. Kaikki laitteet, jotka tankkausasemalla sisältävät vetyä, ovat joko tässä kompressoritilassa tai ulkotiloissa.

Atex-säädöksiin mukaisesti Ex-tilalla tarkoitetaan tilaa, missä voi esiintyä sellaisia määriä vaarallista räjähdyskelpoista ilmaseosta, että toimenpiteet työntekijöiden suojaamiseksi räjähdysvaaralta ovat tarpeen. Suojatoimenpiteiden laajuuden määräytymisperusteena käytetään olemassa olevien Ex-tilojen luokittelua vaarallisten räjähdyskelpoisten ilmaseosten esiintymistodennäköisyyden mukaisiin vyöhykkeisiin. Ex-tilaluokka 2 on tila, jossa ilman ja kaasun (pölyn tai sumun) muodossa olevan palavan

aineen muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalioloissa on epätodennäköistä tai se kestää vain lyhyen ajan.

Tankkausaseman katolla sijaitsevista vedyn **korkeapainevarastoista** vety ohjataan jäähdyttimen kautta **annostelijalle** (dispenser). Vedyn virtausta säätevien kompressoritilassa olevien venttiileiden ohjaus toimi automaattisesti, ohjelmoidun logiikan mukaisesti. Tankattava vety jäähdytetään kompressoritilassa olevassa lämmönsiirtimessä kylmäaineen avulla. Kylmäaineen säiliö sijaitsee kontissa vastakkaisessa päässä kuin kompressoritila. Tankattavan vedyn jäähdyttämisestä syntyvä lämpö poistetaan **katolla olevien lämmönvaihtimien avulla**.

Vedyn jäähdytyksen jälkeen se ohjataan annostelijalle, jonka avulla ajoneuvo tankataan. Ajoneuvoa tankkaava henkilö aktivoi laitteen henkilökohtaisella avaimella ja pin-kodilla. Aktivoinnin jälkeen tankkaaja liittyy tankkausyhteen ajoneuvoon ja käynnistää vedyn siirron painamalla START-nappia. Tankkausasema ilmoittaa merkkivalolla, kun ajoneuvon tankki on täynnä. Tämän jälkeen tankkausyhteen voi irrottaa. Tankkauksen voi keskeyttää ennen kuin tankki on täynnä painamalla STOP-nappulaa. Tankkaajan tekemät toimet tankkauksen yhteydessä ovat siis tankkauksen aktivointi (maksaminen), tankkausyhteen kiinnitys, tankkauksen aloitus, mahdollinen tankkauksen keskeytys ja tankkausyhteen irrotus.

Vetytankkausasemaa voidaan ohjata ja valvoa **teknisessä tilassa** sijaitsevien laitteiden avulla. Normaalisti H2Logicin vetytankkausasema on täysin automaattinen ja sen valvonta ja ohjaus voidaan tehdä etäyhteyden avulla Tanskasta yrityksen omasta valvomosta käsin. Ohjausjärjestelmän häiriötilanteessa turva-automaatiikka varmistaa tankkausaseman ohjautumisen turvalliseen tilaan. Tankkausaseman eri toimintatilat ja niihin sisältyvät toiminnot on kuvattu taulukossa 7.

Taulukko 7. Tankkausaseman eri toimintatilat ja niihin sisältyvät toiminnot.

| Vetytankkausaseman toimintatila | Toiminto |
|---|--|
| Aloitus/uudelleenkäynnistys (Initializing/re-set) | Tankkausaseman logiikkaohjelmisto käynnistyy ja alustuu. |
| Valmis (Ready) | Tankkausaseman perustila, jossa se odottaa muihin toimintatiloihin siirtymistä. Kaikki aseman turvajärjestelmät ovat täysin toiminnassa. |
| Tankkaus (Refuelling) | Aktivoi vedyn annostelijan ja keskeyttää mahdollisesti käynnissä olevan vedyn komprimoinnin (tila: komprimoinnin pysäytys). Takaa turvallisen vedyn tankkauksen. |
| Komprimointi (Compression) | Kompressoritila on käynnissä ja paineistaa vetyä tankkausaseman korkeapainesäiliöihin. |

| Vetytankkausaseman toimintatila | Toiminto |
|--|---|
| Komprimoinnin pysäytys (Stop compression) | Kompressori pysäytetään. Tähän tilaan siirrytään tankattaessa tai jonkin häiriön seurauksena. Häiriö voi olla esimerkiksi imupaineen putoaminen alle sallitun tason. |
| Komprimoinnin hätäpysäytys (Shut-down compression) | Kompressori pysäytetään totaalisesti tankkausasemassa esiintyvän häiriön seurauksena. Vaatii manuaalisen uudelleen käynnistyksen. |
| Turvavirta (Safety mode) | Tankkausaseman automaattinen hallinta ei ole mahdollista, mutta kaikki turvallisuuteen liittyvät toiminnot ovat käynnissä. Tilaan joudutaan esimerkiksi hätäpysäytyksen tai sähkökatkoksen tapahtuessa. |
| Tankkausaseman hätäpysäytys (Global emergency shut-down) | Jonkin osajärjestelmän tai komponentin vakava häiriö. Vaatii manuaalisen uudelleen käynnistyksen. |
| Huolto (Service). | Kaikki turvatoimet ovat käynnissä. Huoltohenkilökunnan tulee olla täysin tietoisia turvallisuusseikoista. |

8.1.2. Tankkausaseman turvajärjestelyjä

Tankkausasema täyttää sille asetetut tiukat turvallisuusvaatimukset. Sen toimintaa seurataan useiden erillisten lämpötila- ja painemittausten avulla. Tankkausaseman vetyputkisto on tehty ruostumattomasta teräksestä ja liitosten määrä on pyritty pitämään mahdollisimman pienenä. Ennen aseman käyttöönottoa asemalle on tehty paine- ja vuototestit. Tankkausaseman putkistolle tehdään vuototestaus jokaisen huollon yhteydessä. Putkistot, varastosäiliöt ja muut metalliset rakenteet on maadoitettu.

Normaalitoiminasta poikkeaviin häiriö- ja onnettomuustilanteisiin on varauduttu useilla erilaisilla turvajärjestelyillä. Suunnittelulla on pyritty minimoimaan vetyvuotojen ja syttymislähteiden mahdollisuudet sekä näistä aiheutuvat riskit. Tankkausasemalle tuotavan vedyn ja asemalla olevan korkeapaineisen vedyn varastot on varustettu sulkuventtiileillä, jotka sulkeutuvat hätätilanteessa.

Tankkausaseman annostelulaitteeseen liittyviä turvajärjestelyitä ovat muun muassa letkurikkoventtiilit, jotka sulkeutuvat jos ajoneuvo lähtee liikkeelle vedyn tankkausyhteen ollessa liitettynä, sekä automaattiset turvasulkuventtiilit, jotka sulkeutuvat hätäpysäytyksen tai järjestelmän virheen seurauksena. Näiden avulla pyritään minimoimaan onnettomuusmahdollisuudet ja käyttäjävirheen aiheuttamat hallitsemattomat vetyvuodot. Hätäpysäytyskytkimet on asennettu tankkausaseman jokaiseen tilaan, annostelulaitteen välittömään läheisyyteen ja hieman etäämmälle annostelulaitteesta.

Annostelijaan liittyvien turvajärjestelmien lisäksi asemassa on vetysäiliöitä, putkis-toja ja laitteita ylipaineelta suojaavia varoventtiileitä, joiden avautumis-paine on tankkaus-aseman suunnittelupaine. Korkean paineen syynä voi olla esimerkiksi tankkaus-aseman säiliöitä lämmittävä ulkoinen tulipalo tai kompressorin tai sen ohjauksjärjes-telmän vikaantuminen. Varastosäiliöiden lämpötilan nousu 120 °C:een käynnistää ve-dyn hätätyhjennyksen. Vedyn ulospuhalluskohta (katso kuva 33) on kolme metriä kon-tin katon yläpuolella (5,5 m maan pinnasta). Ulospuhalluskohdan sijoituksella on pyritty varmistamaan, ettei syttyvää vety-ilmasesta pääse muodostumaan alueelle, missä siitä voisi olla vaaraa ihmisille tai asemalle.

Tankkaus-aseman sisällä esiintyvien vetyvuotojen havaitsemiseksi tankkaus-aseman sisätilan korkeimpaan kohtaan on asennettu vetyilmaisimia. Jos vedyn pitoisuus ilmassa on yli 1 % turvajärjestelmä katkaisee asemasta sähköt ja sulkee kaikki pääventtiilit. Jär-jestelmä lähettää viestin myös valvontajärjestelmälle. Vetyilmaisimet ovat Ex-laitteita, joten ne voivat jatkaa toimintaansa ja tarkkailla nouseeko vety pitoisuus edelleen. Tä-män lisäksi asemassa on erillinen järjestelmä, joka tarkkailee vetypitoisuuden kehitystä pidemmällä aikavälillä. Mikäli asetusarvot ylittyvät riittävän usein, tekee järjestelmä hälytyksen (pienien vuotojen ilmaisin).

Mahdollisten vuotojen aiheuttaman vetypitoisuuden minimoimiseksi on tank-kaus-aseman sisätilojen tuuletuksen varmistamiseksi asennettu järjestelmä, jonka säh-könsaanti on muusta järjestelmästä erillinen. Ilmanvaihtojärjestelmä käynnistyy välit-tömästi, jos tankkaus-aseman sisällä havaitaan pieniäkin määriä vetyä. Ilmanvaihtojärjes-telmä pystyy siirtämään 800 m³ ilmaa tunnissa. Ilmastointijärjestelmä käynnistyy myös, mikäli lämpötila tankkaus-aseman sisätiloissa alkaa nousta.

8.1.3. Käyttökokemustietoja talvelta 2012

Oy Woikoski Ab:llä on sopimus H2Logicin tankkaus-aseman vuokraamisesta ainoastaan talvikausia varten. Tankkaus-asema kuljetettiin pois Rovaniemeltä huhtikuun aikana. Tankkaus-asemalla tankattiin noin 22 kg vetyä aikana, jonka tankkaus-asema oli Arctic Driving Centerin käytössä. Tankkaukset tehtiin 20.3.2012 – 29.3.2012 välisenä aikana, jolloin eräs autovalmistaja teki ajoneuvotestejään. Arctic Driving Centerin edustajan mukaan kaikki suoritettut tankkaukset sujuivat hyvin ja autovalmistajan testaajat olivat tyytyväisiä tankkaus-aseman toimintaan. Oletettavaa on, että myös seuraavalla talvikau-della vetytankkaus-asemalle on käyttöä.

Tankkaus-aseman toimintakuntoon saattamisen yhteydessä ongelmia aiheutti pai-neilmaa tuottavan kompressorin liian pieni puskurisäiliö. Paineilmalla ohjataan tank-kaus-aseman automaattiventtiilejä. Puskurisäiliö vaihdettiin asennuksen yhteydessä. Myös joitakin tiivisteitä jouduttiin uusimaan. Matalasta ulkolämpötilasta johtuen jou-duttiin tankkaus-aseman sisälämpötilaa säätämään, jotta lämpötila kontissa saatiin tasai-seksi ja pysymään lämpötilarajoissa (selvästi nollan yläpuolella). Tankkaus-aseman ka-tolle asennettiin ongelmatilanteista ilmoittava punainen merkkivalo.

8.2. Demo2013-hanke Vuosaaren satamassa

Tekesin Polttokenno -ohjelmaan kuuluvassa Demo2013-demonstraatiohankkeessa selvitetään polttokennosovellusten ja vedyn jakelun kaupallistamisen ja markkinoille tulon edellytyksiä ja kerätään käyttökokemuksia uusista ratkaisuista. Demonstraatiohankkeen on tarkoitus olla näyteikkuna erilaisille polttokennosovelluksille ja sen uusilla ja innovatiivisilla edelläkävijäratkaisuilla tavoitellaan myös kansainvälistä huomiota ja näkyvyyttä. Demo2013 -hanke on Teknologiateollisuus Oy:n hankesalkussa ja sitä hallinnoi Spinverse Oy. Hanketta rahoittaa Tekes ja siihen osallistuvat yritykset, Cargotec Finland Oy, Gasum Oy, T Control Oy, Oy Woikoski Ab ja Wärtsilä Finland Oy. Polttokennosovellusten käyttäjälähtöisenä kokeilualustana ja pitkäaikaisena kenttätestauspaikkana tulee toimimaan Helsingin Vuosaaren satama. [87]

Demo2013 -hankkeen puitteissa tutkitaan, testataan, kehitetään ja kartoitetaan polttokennosovelluksiin liittyvää kokonaisvaltaista järjestelmää kuten polttoaineiden jakelua, sähkön- ja lämmönsyöttöä verkkoon, turvallisuus-, lupa- ja standardikysymyksiä, laitteiden toimivuutta, käytettävyyttä ja luotettavuutta sekä koko järjestelmän vaikutusta alueen päästö- ja melutasoihin. Saatujen käyttäjäkokemusten pohjalta jatketaan sovellusten kehittämistä kohti kaupallisia versioita. Vastaavia kokonaisvaltaisia demonstraatioita ei ole aiemmin toteutettu Euroopassa. Kaikki hankkeen tuotesovellukset ovat energiatehokkuuden ja päästöttömyyden haasteeseen vastaavia uusia ratkaisuja.[87]

Vuoden 2013 loppupuolella Vuosaaren satamassa on tarkoitus olla toiminnassa erilaisia polttokennoihin ja polttoaineinfrastruktuuriin liittyviä sovelluksia esimerkiksi Cargotecin kehittämiä polttokennoilla varustettuja materiaalinkäsittelylaitteita (esim. trukit, lukit ja satamatraktorit) ja Wärtsilän 50 kW SOFC-polttokenno, jolla tuotettu sähkö hyödynnetään sataman alueella ja osa syötetään verkkoon. Kennon tuottama lämpö hyödynnetään lähialueen kiinteistöissä. Polttoaineena Wärtsilän polttokennoa käyttää maakaasua tai biokaasua, jonka toimittaa Gasum. Lisäksi T Control toimittaa varavoimasovelluksen teleliikenteen tukiasemalle Vuosaaren satamaan.

Oy Woikoski Ab kehittää sataman alueelle liikkuvien polttokennosovellusten käyttöön soveltuvan vetytankkausaseman. Demonstraatiohankkeen yhteydessä tehtävä kehitystyö ja Vuosaaren satamassa saatavat kokemukset luovat yritykselle valmiuksia laajemman vetytankkausverkoston rakentamiseen Suomessa. Woikosken suunnittelema liikuteltava vetytankkausasema on tarkoitus toteuttaa 40 jalan (12 metriä) konttiin. Perusratkaisuiltaan Woikosken vetytankkausasema tulee olemaan luvussa 7.1.1 esitetyn kaltainen. Se muodostuu kompressoritilasta, jäähdytys- ja laitetilasta sekä valvontatilasta. Laitteistojen ja ohjausjärjestelmien tekninen ja sijoitussuunnittelu on käynnissä. Käynnistymässä on myös hanke, missä Woikoski yhteistyössä muiden yritysten kanssa kehittää suomalaista vetykompressoria. Hankkeessa tutkitaan muun muassa korkeapaineisen vedyn vaikutusta vetykompressorin rakennemateriaaleihin ja pyritään löytämään parhaat ja toimivimmat ratkaisut niin materiaaliteknisissä kuin muissa laiteteknisissä kysymyksissä.

Vuosaaren satamassa Woikosken tavoitteena on, että tankkausasemaa voisivat käyttää satamalaitteiden lisäksi myös suurelle yleisölle tarkoitettut polttokennosovellukset. Tällaisia sovelluksia voisivat olla esimerkiksi linja-autot ja taksit. Sataman ulkopuoliset käyttäjät asettavat haasteita tankkausaseman sijoittamiselle. Liikkuminen satama-alueella on tiukasti rajoitettua, eivätkä ulkopuoliset henkilöt saa liikkua sataman alueella. Toisaalta satamalaitteet eivät voi liikkua muualla kuin satama-alueella. Vetytankkausasema on sijoitettava satama-alueen rajalle, jolloin tankkausasemaa voivat käyttää satamalaitteiden lisäksi myös sataman ulkopuoliset toimijat.

Vuosaaren satama soveltuu polttokennosovellusten demonstraatiopaikaksi erittäin hyvin. Se on moderni edelläkävijä mallisatamana, joka huolehtii ympäristönäkökulmista ja puhtaista energiaratkaisuista. Satama on vilkas ja se sijaitsee verrattain lähellä kaupunkia, mikä asettaa toiminnalle korkeat vaatimukset ympäristöystävällisyydestä esimerkiksi melun ja ilman saasteiden suhteen. Polttokennosovellusten korkeat hyötysuhteet myös tehostavat sataman toimintaa ja mahdollistavat energian säästön. Yksi tärkeä tavoite polttokennosovelluksia esittelevälle demonstraatiohankkeelle on tuoda polttokenno - ja vetyteknologia yleiseen tietoisuuteen, lisätä sen tunnettuutta suuren yleisön keskuudessa ja osoittaa yleisölle, loppukäyttäjille ja päätöksentekijöille, että polttokennot ovat puhtaita, tehokkaita ja turvallisia.

9. YHTEENVETO

Maailman energiankulutuksesta lähes 90 % perustuu uusiutumattomien energialähteiden kuten hiilen, öljyn ja maakaasun käyttöön. Myös tulevana vuosikymmeninä fossiililla polttoaineilla katetaan huomattava osa maailman energiankulutuksesta. International Energy Agencyn vuoden 2011 energiakatsauksessa olevien ennusteiden mukaisesti fossiilisten polttoaineiden osuus maailman kokonaisenergiankulutuksesta tulee vuonna 2020 vaihtelevaan välillä 77–80 % ja vuonna 2035 välillä 62–80 %. Liikenne edustaa noin 20 % maailman energiankulutuksesta ja on nykyisin lähes kokonaan riippuvainen öljystä. Liikenteen energiatarpeesta yli 95 % katetaan öljypohjaisilla polttoaineilla.

Energian kokonaiskulutus kasvaa jatkuvasti ja energian tuotanto on voimakkaasti riippuvainen fossiilisista polttoaineista. Tämä yhdistettynä fossiilisiin polttoaineisiin liittyviin ympäristöllisiin, taloudellisiin ja geopoliittisiin tekijöihin aiheuttaa huolta ja kysymyksiä niin energian saannin varmuudesta ja hinnasta kuin energiankäytön vaikutuksista ilmastoon ja ympäristöön. Ihmisten toiminnasta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymisen tiedetään vaikuttavan ilmaston keskilämpötilaan ja lämpötilan nousu on laajalti tunnustettu suurimmaksi maailmanlaajuiseksi ympäristöuhaksi. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt (CO₂) ovat yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasujen lähteistä. Vuodelta 2009 olevan International Energy Agencyn raportin mukaan liikenteen osuus on 23 % energiankäyttöön liittyvistä hiilidioksidipäästöistä.

Nykyiset öljypohjaisten polttoaineiden käyttöön perustuvat liikennejärjestelmät eivät ole kestävä kehityksen periaatteiden mukaisia. Tarvitaan toimia liikenteen aiheuttamien päästöjen vähentämiseksi ja liikennesektorin kehittämiseksi ympäristön kannalta kestävämpään ja vähäpäästöisempään suuntaan. Päämäärän saavuttamiseksi on olemassa erilaisia vaihtoehtoja, joista osa on tekniikkaan ja osa ihmisten tapoihin ja toimintaan liittyviä.

Parantamalla ajoneuvojen hyötysuhdetta voidaan vähentää käytettävän polttoaineen ja sitä kautta päästöjen määrää. Vaihtoehtoisten vähähiilisten polttoaineiden käytöllä voidaan pienentää liikenteen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Energiaratkaisut, joiden avulla parhaiten voidaan vähentää liikenteestä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä, ovat vety, sähkö ja biopolttoaineet. Kehittämällä ja helpottamalla uusien, kestävä kehityksen mukaisten liikenneratkaisujen käyttöönottoa ja vaikuttamalla ihmisten asenteisiin voidaan liikenteessä olevien autojen määrää vähentää. Millään edellä mainituista vaihtoehdoista ei yksistään pystytä ratkaisemaan liikenteen aiheuttamia ympäristöongelmia, vaan kaikkia mahdollisia vaihtoehtoja tarvitaan.

Vety on kiinnostava tulevaisuuden energiavaihtoehto, joka parhaimmillaan voi tarjota ratkaisun moniin nykyisen energijärjestelmän ongelmiin. Vetytalous ja vedyn käyttö erikoisesti liikkuvissa polttokennosovelluksissa esimerkiksi ajoneuvoissa on nostettu yhdeksi mahdollisuudeksi, kun pyritään rajoittamaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvia haitallisia kasvihuonekaasu- ja hiukkaspäästöjä. Polttokennoajoneuvojen käytöstä ei aiheudu lainkaan päästöjä, sillä polttokenno muuntaa vedyn suoraan sähköksi ja lämmöksi.

Fossiilisista primäärienergiälähteistä (öljy, kivihiili ja maakaasu) poiketen vetyä ei kuitenkaan voida pitää energian lähteenä, sillä vety ei esiinny luonnossa puhtaana aineena, vaan on aina sitoutuneena kemiallisissa yhdisteissä kuten erilaisissa hiilivedyissä ja vedessä. Vedyn käytön edellytyksenä on aina vedyn valmistus, mikä vaatii energiaa. Kaikki vedyn tuotantovaihtoehdot ja tuotannossa käytettävät energiamuodot eivät ole hiilidioksidipäästöiltään pieniä. Käytetystä raaka-aineesta, tuotantoprosessista ja tuotantoon käytetyn energian alkuperästä riippuu tuotetun vedyn hiilidioksidineutraalius.

Jotta vedyn käyttö liikenteen energialähteenä olisi mahdollista ja voisi yleistyä, markkinoille tarvitaan vetyä käyttäviä ajoneuvoja ja niiden tarpeisiin soveltuva vetyinfrastrukturi. Tällä tarkoitetaan vedyn tuotantoa liikennekäyttöön, sekä vedyn jakelun ja tankkausmahdollisuuksien järjestämistä siten, että se mahdollistaa ajoneuvojen käytön. Lisäksi on kyettävä herättämään kuluttajien kiinnostus ostaa ja käyttää polttokennoajoneuvoja. Jos vetyä käyttäviä autoja ei ole markkinoilla, ei kiinnostus toimivan vetyinfrastruktuurin rakentamiseen ole kovin suuri, eikä ilman infrastruktuuria kannata kehittää, myydä tai osta laitteita esimerkiksi autoja, jotka toimiakseen tarvitsevat vetyä. Autonvalmistajat eri puolilla maailmaa ovat osoittaneet kiinnostusta vetykäyttöisiin polttokennoajoneuvoihin. Vuonna 2009 johtavat autovalmistajat tekivät yhteisen aiesopimuksen polttokennoajoneuvojen kehittämisestä ja markkinoille saattamisesta. Autonvalmistajat ovat esittäneet tavoitteenaan, että polttokennoajoneuvot tulisivat kaupalliseen tuotantoon vuonna 2015 ja yleistyisivät voimakkaammin vuosina 2020–2030.

Maakaasun höyryreformointi, kivihiilen kaasutus ja veden elektrolyysi ovat vedyn valmistustapoina teollisen mittakaavan käytössä ympäri maailmaa. Maakaasun höyryreformointi on eniten käytetty ja tällä hetkellä myös taloudellisesti edullisin tapa tuottaa vetyä. Lisäksi sen tuottamat hiilidioksidipäästöt ovat fossiilisia raaka-aineita hyödyntävistä vedynvalmistustavoista pienimmät. Merkittävä vedynlähde on myös tiettyjen kemianteollisuuden prosessien sivutuotteena muodostuva vety.

Vetyä tuottavan laitoksen koko ja sijainti vaikuttavat tuotetun vedyn varastointi- ja kuljetustarpeeseen. Tuotantomäärät suurissa keskitetyissä laitoksissa voivat olla hyvin suuria ja tuotanto on tehokasta, mutta vedyn varastoinnin ja kuljetuksen tarve kasvaa. Kapasiteetiltaan pienemmissä lähellä käyttöpaikkaa (esimerkiksi tankkausasemaa) olevissa tuotantolaitoksissa selvittää pienemmillä varastointi- ja kuljetuskustannuksilla, mutta hävitään tuotannon tehokkuudessa ja määrässä. Vetyä voidaan käyttää myös energiavarastona tasaamaan kulutuksen ja tuotannon epätasapainoa esimerkiksi tuulienergiaa tai aurinkoenergiaa hyödynnettäessä.

Vedyn siirto ja jakelu tuotantopaikalta käyttökohteeseen esim. tankkausasemalle voi tapahtua joko putkikuljetuksena tai säiliökuljetuksena. Säiliöissä vety voidaan kuljettaa joko kaasumaisena tai nesteytettynä. Putkikuljetus soveltuu parhaiten tilanteisiin, joissa on tarve siirtää suuria vetymääriä pitkiä matkoja. Nesteytetyn vedyn säiliökuljetus soveltuu pitkille siirtomatkoille, kun määrät ovat kohtalaisia (sellaisia, että putkikuljetus ei ole kannattava tai mahdollinen vaihtoehto). Paineistettuna kaasuna tapahtuva kuljetus soveltuu käytettäväksi, kun siirrettävän vedyn määrä on suhteellisen pieni ja siirtomatka lyhyt. Kaasumaisen vedyn kuljetus tulee olemaan merkittävässä roolissa vedyn energia-käytön alkuvaiheessa.

Vedyn tankkausmahdollisuuksien järjestäminen ja tankkausverkoston luominen ovat tärkeitä vetyinfrastruktuurin kehittämiskohteita polttokennoajoneuvojen yleistymisen kannalta. Ilman toimivaa ja käyttäjien tarpeita vastaavaa riittävää tiheää tankkausverkostoa eivät polttokennoajoneuvot voi yleistyä. Tankkausasemaverkoston luominen ei tapahdu hetkessä. Ajoneuvojen demonstraatiovaiheessa ja markkinoille tulon alkuvaiheissa ei tankkausasemaverkoston tiheys voi olla kattavuudeltaan lähelläkään sitä, mihin on totuttu perinteisten polttoaineiden jakelun osalta.

Vety voidaan tankata ajoneuvoon joko kaasumaisena tai nestemäisenä. Tankattavan vedyn olomuoto vaikuttaa suuresti tankkausaseman teknisiin ratkaisuihin ja sille asetettuihin vaatimuksiin. Kaasumainen vety täytyy tankkausta varten paineistaa korkeaan paineeseen, jotta ajoneuvon tankkaus onnistuu nopeasti ja tankkiin saadaan halutun käyttösaatteen varmistava määrä energiaa vedyn muodossa. Nestemäisen vedyn tankkauksen suurimpana haasteena on tarvittavan matalan lämpötilan ylläpitäminen ja varmistaminen. Lähes kaikki nykyisistä polttokennoajoneuvoista tankkaavat kaasumaista vetyä.

Vedyn käytön ja vetytankkausasemien turvallisuus on edellytys vedyn energia- ja liikennekäytön yleistymiselle. Tankkausasemien turvallisuus pyritään mahdollisimman hyvin varmistamaan niiden suunnittelua, sijoittamista, rakentamista, käyttöä ja kunnossapitoa koskevilla säädöksillä ja ohjeilla. Käyttöön otettavan vetytankkausaseman on täytettävä lainsäädännössä ja viranomaisohjeissa asetetut vaatimukset. Näiden lisäksi on myös tiettyjä standardeja ja muita ohjeita, joiden noudattaminen on joko pakollista tai suositeltavaa. Teknisillä määräyksillä ja vapaaehtoisilla standardeilla pyritään varmistamaan tuotteiden turvallisuus, laatu ja tekninen yhteensopivuus.

Vetytankkauksen järjestämisen edelläkävijä Suomessa on kaasuja toimittava Oy Woikoski Ab, jolla on pitkäaikainen kokemus vedyn valmistuksesta, talteenotosta ja toimittamisesta. Yritys on mukana Teknologian ja innovaatioiden tutkimuskeskuksen (Tekes) Polttokennot-ohjelmaan kuuluvassa Demo2013 -hankkeessa tarvittavan vedyn toimittajana ja tankkausmahdollisuuden järjestäjänä. Talvella 2012 Woikoski hankki kokemusta vedyn tankkauksesta toimittamalla tanskalaisen H2Logicin vetytankkausaseman ja sen tarvitseman vedyn Rovaniemellä sijaitsevan Arctic Driving Centerin käyttöön. Osallistumalla polttokennosovelluksiin ja vetytankkaukseen keskittyviin hankkeisiin Woikoski haluaa olla mukana kehittämässä vedyn liikennekäytön vaatimaa

jakeluinfrastruktuuria ja samalla jatkaa perinteitään vedyn toimittajana. Woikosken tavoitteena on tulevaisuudessa pystyä tarjoamaan vedyn tuotantoon, jakeluun, varastointiin ja tankkaukseen kuuluvat palvelut.

Vetyyn perustuvalla liikenteen energijärjestelmällä ja vetyä käyttävien polttokenoajoneuvojen yleistymisellä on selkeät etunsa, mutta myös haasteensa. Merkittävimpänä etuna on mahdollisuus luoda ympäristönäkökohdat huomioon ottava ja kestävän kehityksen periaatteiden mukainen liikenteen energijärjestelmä. Vedyn liikennekäyttöön ja myös laajempaan energiakäyttöön perustuvan järjestelmän ja siihen kuuluvan infrastruktuurin, tekniikan, laitteistojen jne. kehittäminen ja saattaminen taloudellisesti kannattavalle tasolle vaativat kuitenkin vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä, demonstraatiohankkeita, suuria investointeja sekä poliittista ja yhteiskunnallista tahtoa. Vain näiden kaikkien yhteisvaikutuksella voidaan luoda edellytykset vedyn käyttöön perustuvalla energijärjestelmälle ja sen yleistymiselle.

LÄHTEET

1. World Energy Outlook 2011. Ranska 2011, International Energy Agency, IEA. 659 p.
2. International Energy Outlook 2011 [WWW]. Energy Information Administration, EIA. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa: [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2011).pdf).
3. Ball, M. & Wietschel, M. (Edit.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. New York 2009, Cambridge University Press. 646 p.
4. Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Maailmanlaajuisen ilmastomuutoksen rajoittaminen kahteen celsiusasteeseen, toimet vuoteen 2020 ja sen jälkeen KOM/2007/2 (10.1.2007) [WWW]. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0002:FIN:FI:PDF>.
5. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta (23.4.2009) . [WWW]. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:fi:PDF>.
6. Euroopan parlamentin ja neuvoston päätös Nro 406/2009/EY jäsenvaltioiden pyrkimyksistä vähentää kasvihuonekaasupäästöjään yhteisön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämissitoumusten täyttämiseksi vuoteen 2020 mennessä (23.4.2009) [WWW]. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:FI:PDF>.
7. Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Euroopan unionin päästökauppa [WWW]. [Viitattu 8.3.2012]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi>.
8. Winter, C-J. Hydrogen energy – Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change. International Journal of Hydrogen Energy 34(2009)14, pp. S1-S52.
9. Hydrogen Posture Plan And Integrated Research, Development and Demonstration Plan, United States Department of Energy & United States Department of Transportation [WWW]. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan_dec06.pdf.
10. Letter of understanding on the Development and Market Introduction of Fuel Cell Vehicles [WWW]. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa: http://www.cleancaroptions.com/Auto_OEM_letter_on_FCEVs.pdf

11. Kaikki ilmastonmuutoksesta, kasvihuonekaasut [WWW]. [Viitattu 11.3.2012].
Saatavissa:
<http://www.ilmasto.org/ilmastonmuutos/perusteet/kasvihuonekaasut.html>
12. Key Word Energy Statistics. Ranska 2011, International Energy Agency, IEA. 80 p.
13. Ball, M. Why hydrogen? In: Ball, M. & Wietschel, M. (ed.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. New York, USA 2009/2010 (Paperback), Cambridge University Press. pp. 8-45.
14. L'eon, A. Introduction. In: L'eon, A. (ed.). Hydrogen Technology – Mobile and Portable Applications. Berliini, Saksa 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 1-7.
15. A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis – The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles [WWW]. [Viitattu 27.12.2011]. Saatavissa:
http://www.iphe.net/docs/Resources/Power_trains_for_Europe.pdf.
16. Nylund, N-O., Aakko-Saksa, P. Liikenteen polttoainevaihtoehdot. Kehitystilanne-raportti. Laaja versio. Espoo 2007, VTT. 124 s. + 3 liit.
17. CO₂ Emissions from fuel combustion – Highlights. Ranska 2011, International Energy Agency, IEA. 134 p.
18. Ball, M., Wietschel, M. The future of hydrogen - opportunities and challenges. International Journal of Hydrogen Energy 34(2009)2, pp. 615-627.
19. Suomen kasvihuonekaasupäästöt. Tilastokeskuksen katsauksia 2011/1 [WWW]. [Viitattu 19.12.2011]. Saatavissa:
http://www.stat.fi/tup/khkinv/suominir_2011.pdf
20. Kircher, O., Braess, H. Challenges and Requirements for Car Industry. In: L'eon, A. (ed.). Hydrogen Technology – Mobile and Portable Applications. Berliini, Saksa 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 187-205.
21. Transport, energy and CO₂, Moving toward sustainability. Pariisi 2009. International Energy Agency, IEA. 414 p.
22. Tabata, Y. Choice of Automotive Fuel Type in a Long Term in a Long Term. New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), JARI China Round Table 2005 Automobile and Energy Issues in China, Beijing, Oct. 22, 2005.
23. Motiva Oy [WWW]. [Viitattu 15.11.2011]. Saatavissa:
http://www.motiva.fi/liikenne/polttoaineet_ja_ajoneuvotekniikka/polttoaineet.

24. Grönholm, T. Autoalan kestävä kehityksen tulevaisuuden näkymät. Suomen ympäristöopisto SYKLI 8/10 [WWW]. [Viitattu 5.1.2012] Saatavissa: <http://draivi.sykli.fi/upload/media-4d41d4642a940.pdf>.
25. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. WELL-to-WHEELS Report Version 2c, March 2007 [WWW]. [Viitattu 5.1.2012]. Saatavissa: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>.
26. Weindorf, W., Bungel, U. Energy-chain analysis of hydrogen and its competing alternative fuels for transport. In: Ball, M. & Wietschel, M. (ed.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. New York, USA 2009/2010 (Paperback), Cambridge University Press. pp. 199-253.
27. Nylund, N-O., Aakko-Saksa, P. & Sipilä, K. Status and outlook for biofuels, other alternative fuels and new vehicles. Espoo 2008, VTT Research Notes 2426. 161 s. + liit.6 s.
28. International association for hydrogen energy. [WWW] [Viitattu 5.1.2012]. Saatavissa: <http://www.iahe.org/>.
29. Hart, D. Hydrogen, end uses and economics. In: Cleveland, C.J., (ed.) Encyclopedia of Energy. Vol 3. California, USA, 2004. Elsevier. pp. 231-239.
30. Nguyen, T., Ward, J. Well-to-wheels greenhouse gas emissions and petroleum use for mid-size light-duty vehicles. Department of energy program record (Offices of vehicle technologies and fuel cell technologies). [WWW]. [Viitattu 10.1.2012]. Saatavissa: http://hydrogen.energy.gov/pdfs/10001_well_to_wheels_gge_petroleum_use.pdf.
31. Marscheider-Weidemann, F., Schirrmeister, E., Roser, A. Key role of fuel cells. In: Ball, M. & Wietschel, M. (ed.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. New York, USA 2009/2010(Paperback), Cambridge University Press. pp. 348-384.
32. Larminie, James, Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained, 2nd edition. Chichester, England, 2003. John Wiley & Sons Ltd. 418 p.
33. Materials for Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells [WWW]. [Viitattu 20.2.2012] Saatavissa: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/renewable-alternative-energy/pem-fuel-cells.html>.
34. Wietschel, M., Ball, M., Seydel, P., Hydrogen today. In: Ball, M. & Wietschel, M. (ed.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. New York, USA 2009/2010 (Paperback), Cambridge University Press. pp. 254-270.
35. FuelCellToday [WWW]. Technologies, PEMFC. [Viitattu 17.2.2012]. Saatavissa: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/technologies/pemfc>

36. Fuel Cell Europe [WWW]. [Viitattu 17.2.2012]. Saatavissa: <http://www.fuelcelleurope.org/index.php?m=7&sm=44>.
37. The fuel cell today industry review 2011 [WWW]. [Viitattu 17.2.2012]. Saatavissa: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/industry-review>.
38. Fuel cell technologies market report 2010 [WWW]. US Department of Energy. [Viitattu 18.2.2012]. Saatavissa: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/2010_market_report.pdf.
39. James, B.D, Kalinoski, J., Baum, K. Manufacturing cost analysis of fuel cell systems [WWW]. 2011 DOE H2 Program AMR Presentation. [Viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review11/fc018_james_2011_o.pdf
40. Corbo, P., Migliardini, F., Veneri, O. Hydrogen fuel cells for road vehicles. Lontoo, 2011. Springer-Verlag Lontoo. 245 p.
41. California Fuel Cell Partnership. Driving for the future, how it works [WWW]. [Viitattu 17.2.2012]. Saatavissa: www.fuelcellpartnership.org.
42. Green Car Congress [WWW]. [Viitattu 17.2.2012]. Saatavissa: <http://www.greencarcongress.com/2009/09/automakers-fcv-20090909.html>.
43. Safarianova, S., Noembrini, F., Boulouchos, K., Dietrich, P. Technology opportunities and strategies towards climate friendly transport (TOSCA) Deliverable D1 (WP1 report) Techno-Economic Analysis of Low GHG Emission passenger Cars [WWW]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: http://www.toscaproject.org/FinalReports/TOSCA_WP1_Car.pdf.
44. Hocevar, S. Summers, W. Hydrogen Production. In: L'eon, A. (ed.). Hydrogen Technology – Mobile and Portable Applications. Berliini, Saksa 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 15-79.
45. Ball, M., Weindorf, W. & Bünger, U. Hydrogen production In: Ball, M. & Wietzel, M. (ed.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. Paperback. New York, USA 2009/2010. Cambridge University Press. pp. 277-308.
46. Al-Hallaj, S., Kiszynski, K. Hybrid hydrogen systems. Lontoo 2011. Springer-Verlag Lontoo. 133 p.
47. Tuhkanen, S., Koljonen, T., Marjaniemi, M., Ohlström, M. & Poteri, A. Vetytalous ja sen soveltuvuus Suomeen. Espoo 2001, VTT Energian raportteja 6/2001. 70 s.
48. Jumppanen, P. Vety energiantuotannossa. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 42, Nro 4, 2009, s.218–234.
49. Hydrogen Production and Storage – R&D Priorities and Gaps. International Energy Agency, IEA. 2006.

50. Maisonnier, G., Perrin, J., Steinberger-Wilckens, R., Trumper, S. C. European Hydrogen Infrastructure Atlas and Industrial Excess Hydrogen Analysis. Part II: Industrial surplus hydrogen markets and production. Roads2HyCom –project deliverable 2.1 and 2.1a. Project document number R2H2006PU.1. [WWW]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: www.roads2hy.com.
51. Hydrogen and Fuel Cells as Strong Partners of Renewable Energy Systems [WWW]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: http://www.lbst.de/ressources/docs2009/eha_study_h2re_en.pdf
52. Fuel Cells and Hydrogen in Finland 2012. [WWW] Fuel Cell Today. 28.2 2012. [Viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/surveys/2012/fuel-cells-and-hydrogen-in-finland>
53. Cuni, A., Weber, M., Guerrini, O., Steinberger-Wilckens, R., Trumper, S. C. Linking distributed European hydrogen production sources. Part I. Distribution issues. Roads2HyCom deliverable 2.3. Project document number R2H2013PU [WWW]. [Viitattu 20.2.2012.] Saatavissa: www.roads2hy.com.
54. Perrin, J., Steinberger-Wilckens, R., Trumper, S. C. European Hydrogen Infrastructure Atlas and Industrial Excess Hydrogen Analysis. Part III: Industrial distribution infrastructure. Roads2HyCom deliverable 2.1 and 2.1a. Project document number R2H2007PU.1. [WWW]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: www.roads2hy.com.
55. Handbook for hydrogen refuelling station approval. HyApproval deliverable 2.2, version 2.1 (4.6.2008) [WWW]. [Viitattu 20..2012]. Saatavissa: http://www.hyapproval.org/Publications/The_Handbook/HyApproval_Final_Handbook.pdf.
56. Ball, M., Weindorf, W. & Bünger, U. Hydrogen distribution In: Ball, M. & Wietzel, M. (ed.). The Hydrogen Economy – Opportunities and Challenges. New York, USA 2009/2010 (Paperback), Cambridge University Press. pp. 322-347.
57. Suomen pankki, valuuttakurssit [WWW]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: <http://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/valuuttakurssit/Pages/default.aspx>.
58. Balat, M., Kirtay, E. Major technical barriers to a "Hydrogen Economy". Energy Sources, part A 32:863-876, 2010.
59. Raine, D., Williams, R., Strom, H., Maisonnier, G., Vinot, S., Linnemann, J., Trumper, S. Analysis of the current hydrogen cost structure. Roads2HyCom deliverable D2.4. Project document number R2H2019PU.1 [WWW]. [Viitattu 20.2.2012]. Saatavissa: www.roads2hy.com.
60. Yang, C. Ogden, J. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. International Journal of Hydrogen Energy 32(2007) pp. 268-286.

61. Platinum Price [WWW]. [Viitattu 11.3.2012]. Saatavissa: <http://platinumprice.org/index.html>.
62. EU:n HyFacts projektin kotisivu [WWW]. [Viitattu 1.3.2012]. Saatavissa: <http://hyfacts.eu/index.php>
63. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavien aineiden turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet) [WWW]. [Viitattu 1.3.2012]. Saatavissa: OVA-ohje<http://www.ttl.fi/ova/vety.html>.
64. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Fuel cells technologies programme, Safety Codes and Standards [WWW]. [Viitattu 1.3.2012]. Saatavissa: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_safety.pdf.
65. Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen, Doc 06/02/E. [WWW] European industrial gases association. 2002. [Viitattu 1.3.2012]. Saatavissa: http://h2bestpractices.org/docs/Doc6_02SafetyLiquidHydrogen.pdf.
66. H2Incident Reporting and Lessons Learned [WWW]. [Viitattu 5.3.2012]. Saatavissa: <http://www.h2incidents.org/>.
67. Hydrogen fuel cars & Vehicles, Spin on Hydrogen Fueling Station Explosion and Fire [WWW]. [Viitattu 5.3.2012]. Saatavissa: <http://www.hydrogencarsnow.com/blog2/index.php/hydrogen-safety/spin-on-hydrogen-fueling-station-explosion-and-fire/>
68. Hydrogen Fuel Cars Now [WWW]. [Viitattu 5.3.2012]. Saatavissa: <http://www.hydrogencarsnow.com/hydrogen-fuel-stations.htm>.
69. Nissilä, M. Demonstration of fuel cell applications at Vuosaari Harbour - review of legislation requirements. Research report: VTT-R-04164-11. Tampere 2011, VTT. 10s. [Viitattu 18.2.2012]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/VTT-R-04164-11.pdf>.
70. FINLEX ® - Valtion säädöstietopankki [WWW]. [Viitattu 18.2.2012]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/>.
71. ATEX Räjähdyksivaarallisten tilojen turvallisuus [WWW]. Helsinki, Turvatekniikan keskus, Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. [Viitattu 15.3.2012]. Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/vaaralliset_aineet/esitteet_ja_oppaat/Atex_opas_2009.pdf.
72. Ulkoasiainministeriö. Kauppapolitiikka, tekniset määräykset ja standardit [WWW]. [Viitattu 18.2.2012]. Saatavissa: <http://www.formin.fi/public/default.aspx?nodeid=15299&contentlan=1&culture=fi-FI>.

73. Suunnitteluohje maa- ja biokaasun tankkausasemille [WWW]. [Viitattu 1.3.2012]. Saatavissa:
http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/oppaat/Maakaasu_tankkausasemaohje.pdf.
74. Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A., Aatos, S. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) Teknologia katsaus. Espoo 2011, VTT Working Papers 161. 103 s. + liitt. 6 s.
75. Klell, M. Storage of Hydrogen in the Pure Form. In: Hirscher, M. (ed.). Handbook of Hydrogen Storage. Germany, 2010, Wiley-VCH. pp. 1-37.
76. More than 5 200 Hydrogen Fueling Stations to be Operational by 2020 [WWW]. Pike Research. 19.7.2011. [Viitattu 2.4.2012]. Saatavissa:
<http://www.pikeresearch.com/newsroom/more-than-5200-hydrogen-fueling-stations-to-be-operational-by-2020>.
77. Fuel Cell Vehicle Sales to Cross the 1 Million Mark in 2020 [WWW]. Pike Research. 19.4.2011. [Viitattu 2.4.2012]. Saatavissa:
<http://www.pikeresearch.com/newsroom/fuel-cell-vehicle-sales-to-cross-the-1-million-mark-in-2020>.
78. King, D. 2020 Fuel-Cell Vehicle Sales Forecast Reduced [WWW]. Auto Observer. 11.10.2011. [Viitattu 2.4.2012]. Saatavissa:
<http://www.autoobserver.com/2011/10/2020-fuel-cell-vehicle-sales-forecast-reduced.html>.
79. Hydrogen Fuel Cars Now [WWW]. [Viitattu 5.4.2012]. Saatavissa:
<http://www.hydrogencarsnow.com/eu-hydrogen-highway.htm>
80. Europe, Asia plan hydrogen highways- US should take note [WWW]. [Viitattu 5.4.2012]. Saatavissa: <http://fchea.posterous.com/europe-asia-plan-hydrogen-highways-us-should>.
81. Breitung, W. Safety Analysis of Hydrogen Vehicles and Infrastructure. In: L'eon, A. (ed.). Hydrogen Technology – Mobile and Portable Applications. Berliini, Saksa 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 335-375.
82. Pschorr-Schoberer, E. Dipl.-Physikerin. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Germany. Sähköpostitiedonanto 9.3.2012.
83. Pike Research: over 5,200 hydrogen fuelling stations by 2020 [WWW]. The Hydrogen Journal, Fuel Cells, 2.8. 2011. [Viitattu 2.4.2012] Saatavissa:
<http://www.thehydrogenjournal.com/displaynews.php?NewsID=672&PHPSESSID=u7bpa9drfo2ls7dc6se4veeso3>

84. Linde and Daimler press ahead with development of infrastructure for fuel-cell vehicles [WWW]. The Linde Group, 1.6.2011. [Viitattu 2.4.2012]. Saatavissa: http://www.the-linde-group.com/en/news_and_media/press_releases/news_2011_06_01.html.
85. Europe's Largest Hydrogen Refueling Station Opens in Hamburg [WWW]. HY-TEC, 28.2.2012. [Viitattu 2.4.2012]. Saatavissa: <http://hy-tec.eu/2012/h2-refueling/europes-largest-hydrogen-refuelling-station-opens-in-hamburg/>
86. H2 Stations [WWW]. The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership. [Viitattu 2.4.2012]. Saatavissa: <http://www.scandinavianhydrogen.org>.
87. Ojapalo, A. Demo2013 kokeilualustahanke esittely [WWW]. Maaliskuu 2012. [Viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/ohjelmat/polttokennot>.
88. Hydrogen and Fuel Cells Program, Systems Integration [WWW]. U.S. Department of Energy. [Viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: http://www.hydrogen.energy.gov/systems_integration.html