



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIIKA SANTALA  
POLTTOKENNO AJONEUVOJEN TEHOLÄHTEENÄ

Kandidaatintyö

Tarkastaja: lehtori RISTO MIKKONEN  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
07. toukokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**MIIKA SANTALA:** Polttokenno pientehoisen järjestelmän teholähteenä  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Kandidaatintyö, 30 sivua  
Kevät 2018  
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat  
Tarkastaja: Risto Mikkonen

Avainsanat: Polttokenno, fuel cell, PEM

Polttokennoja on rakenteeltaan erilaisia riippuen niissä käytetystä elektrolyytistä. Yleisimmin käytössä oleva polttokenno on kiinteäpolymeerielektrodikeno eli PEM. Elektrolyytti vaikuttaa siihen, mitkä ovat kennojen reaktiot ja toimintalämpötilat. Toimintalämpötila määrää myös niiden sopivuuden eri sovellutuksiin.

Rakennettaessa polttokennoa häviövaikutukset pyritään minimoimaan. Aktivointihäviöihin voidaan vaikuttaa erilaisilla keinoilla. Niitä voidaan pienentää käyttämällä parempia katalyyttimateriaaleja ja laajempaa elektrodien aktiivista reaktiopinta-alaa. Ioneja tehokkaammin johtava elektrolyytti ja sähköä johtavat elektrodit pienentävät ohmisia häviöitä. Häviöihin voidaan vaikuttaa myös säätämällä operointiolosuhteita.

Polttokennojärjestelmässä pääkomponentit ovat elektrodit, elektrolyytti ja kennoston virtaus- eli bipolaarilevyt. Merkittävä osa kennon koosta syntyy pääkomponenttien lisäksi erilaisista systeemin oheislaitteista, joista käytetään nimitystä BOP (Balance of Plant). Aivan pienemissä polttokennoissa rakenne on suhteellisen yksinkertainen, mutta suuremmissa tarvitaan esimerkiksi polttoaineen ja ilman kierrättimiä eli pumppuja ja puhaltimia. Kennoston tuottamaa tasasähköä joudutaan usein muokkaamaan, jolloin tarvitaan esimerkiksi jänniteregulaattoria tai DC/DC- muunninta. Suuremmissa CHP-sovelluksissa tarvitaan DC/AC-inverttereitä. Lisäksi ohjaukseen voidaan tarvita sähkömoottoreita.

Puhuttaessa polttokennoista ja energian tuotannosta tulee väistämättä kysymykseen myös vedyn tuotanto elektrolyysillä, sillä elektrolyysi on hyvin tunnettu ja puhdas tapa valmistaa vetyä. Tästä johtuen vedyn tuotantotavat ja vedyn laatu ovat ajankohtaisia tutkimuskohteita polttokennojen rinnalla. Puhuttaessa polttokennoista on oleellista hahmottaa myös muut ympäröivät vetyteknologiat. Vety on potentiaalinen energiavarasto, sillä sen energiasisältö massayksikköä kohti on poikkeuksellisen suuri (ks. polttoaineiden ominaisuuksia, taulukko 3.1), mutta heikkous tulee siinä, että kaasumaisena aineena sen tiheys on kovin pieni ja tällöin varastointi vaatii kohtuuttoman suuren tilan. Vety säilötäänkin kaasumaisena usein suurissa metallitankeissa.

Autoja ja muita liikkuvia laitteita ajatellen selkeästi kiinnostavin ja siksi myös laajasti tutkimustyön alla oleva kennotyyppi on PEM. Sen toimintalämpötila on alle 100°C, ja tehotehoisuus on riittävä, jotta laitteesta ei tule liian kookasta tai painavaa. Parhaat kennot ovat jo sillä tasolla, että ne kykenevät reagoimaan tehontarpeen muutoksiin, eikä akuston kompensoinnille ole valtavaa tarvetta. On kuitenkin muita syitä, jotka hidastavat prosessia, joten akuston käyttö saattaa kuitenkin olla välttämätöntä.

Polttokennosovellutuksia kehitetään myös autoissa käytettäviksi sähkövoiman tuottajiksi. Sähkön tarve autoissa kasvaa teknologian kehityksen myötä, kun koko ajan lisää mekaanishydraulisia apulaitekäyttöjä muutetaan sähkötoimiseksi (ohjaustehostus, jarrut). Lisäksi erilaisten viihde- ja viestintäelektronikan määrä lisääntyy.

Polttokennoauto on kulkuneuvo, joka tuottaa energiaa kennojensa avulla lähtöaineesta, yleensä vedystä. Se on käytännössä lähes sähköauto. Polttokennoauto eroaa perinteisiin sähköautoihin verrattuna siten, että sen tuottama energia syntyy polttokennoissa. Polttokennoautot ovat muuten rakenteeltaan vastaavanlaisia kuin polttomoottoriautot.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	POLTTOKENNO (PEM) .....	3
2.1	Yleinen teoria .....	4
2.2	PEM- kennon toimintaperiaate.....	6
2.3	PEM- kennon rakenne .....	7
2.4	PEM-kennon ominaisuudet .....	9
2.5	Vety-polttokennon ja lämpövoimakoneen vertailu .....	10
2.6	PEM-kennon ominaisuudet .....	11
2.6.1	Vesi ja jäähditys kennossa .....	11
2.6.2	Bipolaarilevyt.....	12
2.6.3	Operoitava paine .....	12
2.7	DMFC-kenno .....	13
3.	VEDYN JA VAIHTOEHTOISTEN LIIKENNEPOLTTOAINEIDEN TARKASTELU .....	15
3.1	Vedyn valmistus .....	15
3.2	Vedyn varastointimenetelmät.....	17
3.3	Vaihtoehtoiset liikennepolttoaineet.....	18
3.4	Polttoaineen tuottaminen biokaasusta .....	19
4.	POLTTOKENNOSOVELLUKSET .....	21
4.1	Yleistä ajoneuvojärjestelmästä.....	21
4.2	Polttokennoauto.....	23
4.3	Muut polttokennosovellukset .....	24
4.4	Ajoneuvotyypin vertailua .....	25
5.	YHTEENVETO .....	27
6.	POHDINTA .....	28
	LÄHTEET.....	29

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

APU	Polttokennoyksikkö
Bipolaarilevyt	Polttokennoston virtauslevyt
BOP (Balance of plants)	Systeemin oheislaitteet
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto
DMFC	Suorametanolikenno. Yksi polttokennotyyppi
Elektrolyysi	Vedyn valmistus sähkökemiallisesti
Hydridi	Vedyn varastointimuoto
MEA	Membraanikalvoista koostuvat liitännät
PEM	Kiinteäpolymeerielektrodikenno. Yksi polttokennotyyppi
Polttokenno	Sähkökemiallinen laite, joka reaktioiden myötä muuntaa kemiallisen energian suoraan sähköksi
Polttokennostack	Yksittäisistä polttokennoista koottu kokonaisuus
Tyhjäkäyntijännite	Mallintamisessa tarvittava suure
$E_0$	Avoimen piirin jännite
$\Delta G$	Gibbsin vapaan energian muutos
$W_{el}$	Sähköinen maksimityö
$\eta$	Hyötysuhde

# 1. JOHDANTO

Polttokenno on jo melko hyvin tunnettu teknologia ja sen avulla voidaan tuottaa sähköä hyvällä hyötysuhteella ja vähäisillä päästöillä olosuhteista riippumatta. Polttokennot toimivat niin kauan kuin niihin syötetään polttoainetta, kuten biokaasua, maakaasua metaanolia, dieseliä tai vetyä. Ensimmäiset polttokennot tulivat 1960-luvulla ja siitä ne ovat kaupallistuneet jo jonkin verran. Niitä käytetään muun muassa ajoneuvojen tehon tuotannossa sekä kotien ja suurten kiinteistöjen perusvoimantuotannossa. Tässä työssä tutkitaan erityisesti sovellusta ajoneuvojen osalta. Polttokennon hyviä puolia ovat käytettävyys ja korkea sähköntuotannon hyötysuhde. Polttokennot ovat kasvava ala, mutta vielä kuitenkin suhteellisen marginaalinen. Uusia mahdollisuuksia ja kehityskohteita etsitään jatkuvasti yritysten ja tutkimuslaitosten johdosta, esimerkiksi Suomessa VTT tekee tutkimusta tällä alalla. [1]

Puhuttaessa polttokennoista ja energian tuotannosta tulee väistämättä kysymykseen myös vedyn tuotanto elektrolyysillä, sillä elektrolyysi on hyvin tunnettu ja puhdas tapa valmistaa vetyä. Siksi on tärkeää ottaa huomioon, kuinka vety on tuotettu ja mikä on vedyn laatu. Nämä ovat tärkeitä tutkimusaiheita polttokennojen rinnalla. Puhuttaessa polttokennoista on oleellista hahmottaa myös muut ympäröivät vetyteknologiat. Polttokennoissa on monia etuja, joita voi saavuttaa vain niiden avulla, kunhan potentiaali saadaan käyttöön. Polttokennot ovat vähäpäästöisiä ja niissä voidaan käyttää monia erilaisia polttoaineita [1] [11]

Polttokennoilla on myös monia muita käyttökohteita, kuten esimerkiksi hajautettu energiantuotanto, kulkuneuvot, autot, työkoneet, kannettavat sähkökäyttöiset pienlaitteet ja muut sovellukset, kuten sotilaskäyttö. Kaikissa kategorioissa tehdään tutkimusta PEM-kennon osalta. Varteenotettavin sovellutus on tällä hetkellä suorametanolikäyttöinen PEM-kenno, siitä lisää osiossa 2.6. [2]

Tässä työssä tutkitaan erityisesti polttokennoa ajoneuvon voimanlähteenä. Ehkäpä suurimman huomion polttokennojen mahdollisista tulevista käyttösovelluksista on saanut sen käyttö autojen ja muiden kulkuneuvojen voimalaitteena. Tähän on ollut vaikuttamassa autoyhtiöiden tiukka kilpailutilanne. Teknologia ei ole vielä siinä pisteessä, että todellinen massatuotanto olisi mahdollinen, mutta laajetessaan se voisi avata uudenlaiset markkinat valmistusteknologialle, ja tätä kautta kustannukset halpenisivat. Polttokennojen hinta on edelleen liian korkea, jos verrataan jo markkinoilla oleviin perinteisiin ratkaisuihin. Karkea arvio polttokennojen kennoston hinnasta on tällä hetkellä noin 1200 \$/kW. Lisäksi elinikä on alhaisella tasolla. Huomioon pitää ottaa myös vedyn jakelu ja

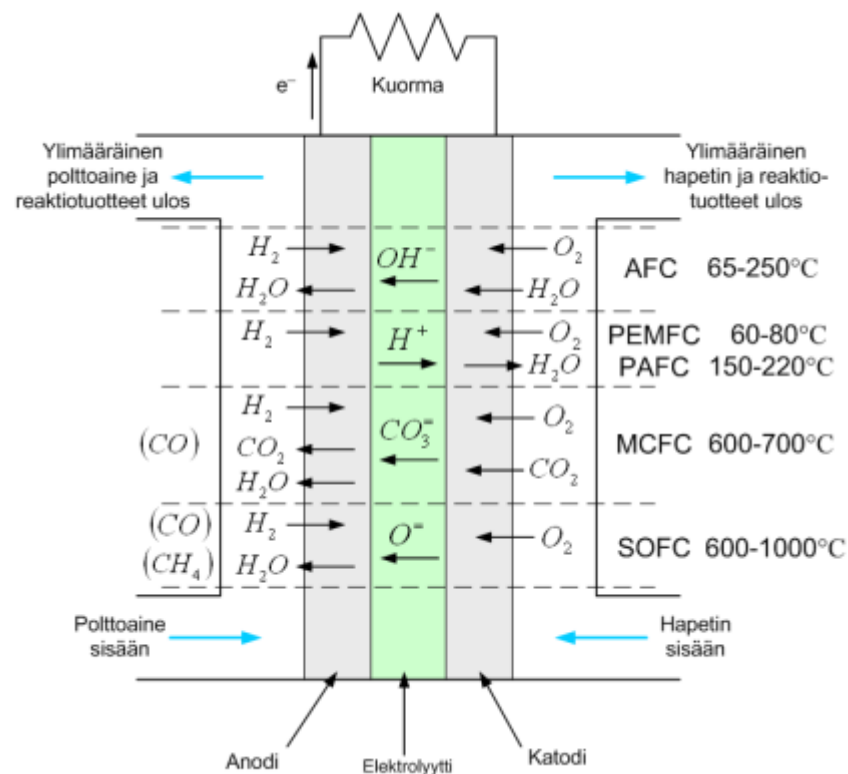
varastointi ajoneuvoissa, jotka ovat avainkysymyksiä, ratkaistaessa toimivaa kokonais-systeemiä. [2] [24]

Fossiilisia polttoaineita on maailmassa rajallisesti ja lisäksi ilmasto lämpenee kohtuuttomalla vauhdilla. Näistä syistä johtuen, tavoitteena on tuottaa energiatehokkaampia ja vähäpäästöisempiä ajoneuvojen teholähteitä. Tällä hetkellä maailmalla ollaan kiinnostuneita liikenteen kehityksestä ja varteenotettavia sovelluskohteita haetaan myös polttokennoista. Teknologia ei olisi täysin uusi vaan siinä voitaisiin hyödyntää olemassa olevia teknologioita eli esimerkiksi sähköisiä energiavarastoja. Esimerkkeinä näistä ovat vauhtipyörä ja superkondensaattorit. [11]

Työ etenee polttokennon yleisestä esittelystä ja käsittelystä vetyteknologiaan ja siitä ajoneuvosovellukseen. Alussa polttokennoa tarkistellaan melko yksityiskohtaisesti, jotta peruskäsitteet ja asian ydin tulee selville. Polttokennoissa keskitytään tarkastelemaan PEM-kennoja. Kun polttokennon toiminta on esitelty, tutkitaan hieman yhtälöitä ja käyriä, joita polttokennon osalta tarvitaan. Liian syvällistä laskentaa ei kuitenkaan ole, sillä työ on tarkoitus pitää kirjallisuuskatsauksena. Tämän jälkeen esitellään, kuinka PEM-kenno toimii ja muita ominaisuuksia ja käsitteitä. Vety liittyy kiinteästi polttokennoihin ja siksi se on esitelty työssä seuraavana. Erityisesti kysymykseen nousee vedyn valmistus ja varastointi. Lisäksi tutkitaan erilaisia liikennepolttoainemahdollisuuksia. Lopuksi tehdään katsaus polttokennon käyttöön ajoneuvossa. Tarkoitus on esitellä pääperiaatteet siitä, kuinka polttokenno ajoneuvossa toimisi. Lisäksi työssä esitellään muita erilaisia polttokennosovelluksia, kuten käyttö työkoneiden voimanlähteenä. Näitä käsitellään kuitenkin periaatteellisella tasolla ja pääpaino onkin ajoneuvokäytön sovellutuksissa.

## 2. POLTTOKENNO (PEM)

Polttokennoja on rakenteeltaan erilaisia riippuen niissä käytetystä elektrolyytistä. Yleisimmin käytössä oleva polttokenno on kiinteäpolymeerielektrodikeno eli PEM. Elektrolyytti vaikuttaa siihen, mitkä ovat kennojen reaktiot ja toimintalämpötilat. Toimintalämpötila määrää myös niiden sopivuuden eri sovellutuksiin. Matalalämpötilaisiin (alle 100 °C) on PEM, ja siksi se on käytetyimpiä kennoja, joista tehdään kuluttajasovelluksia (kantavat sähkönlähteet, autot, pien(CHP)käytöt). Korkealämpötilaisia (650...1000 °C) ovat sulakarbonaatti- (MCFC) ja kiinteäoksidipolttokennot (SOFC), joiden käyttökohteet keskittyvät yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon (CHP) kokoluokassa 50 kW-10 MW. Muita kennostotyypppejä on esimerkiksi alkalipolttokenno (AFC), fosforihappokenno (PAFC) ja mikrobiologinen polttokenno (MFC). PAFC- kennosta esitellään myöhemmässä vaiheessa vertailua PEM –kennon välillä. Tässä työssä keskitytään matalalämpöisiin polttokennosovelluksiin. Polttokennon perinteiset rakenteet, polttokennotyypeissä syntyvät reaktiot sekä yleiset toimintalämpötilat nähdään kuvassa 2.1. [2] [11]



**Kuva 2.1** Polttokennojen perinteiset rakenteet, eri polttokennotyypeissä tapahtuvat reaktiot ja yleiset toimintalämpötilat [11]

Ensimmäinen PEM-kenno kehittäjä oli General Electric 1960. Silloisen kennon elinikä oli 500 h, mikä oli riittävä sen aikaisiin sovelluksiin. Nykyään kennojen käyttöiäksi luetaan kymmeniä tuhansia tunteja.



Myöhemmin 1967 perustettiin Nafion, josta rekisteröitiin tuotemerkki Dupont. Tämä membraanikalvo on edelleen PEM-kennon standardi. Sittemmin sovelluksia ja uusia kennotyyppejä on tullut paljon lisää. Lukuisista sovelluksista huolimatta PEM-kennoille voidaan johtaa kaksi yhtenäistä piirrettä:

- kennossa käytettävä elektrolyytti
- elektrodin rakenne ja katalyytti.

Kennoja on paljon eri tyyppisiä. Se millainen kenno on kyseessä, riippuu paljon siitä, miten seuraavat viisi eri tekijää on ratkaistu kyseisessä mallissa eli

- veden käsittely
- kennon jäähdytysjärjestelmä
- kennojen yhteen liittäminen
- operoitava paine
- käytettävä reagenssi. [2] [4]

## 2.1 Yleinen teoria

Polttokennolle voidaan määrittää erilaisia suureita, kuten avoimen piirin jännite eli tyhjäkäyntijännite sekä hyötysuhde. Molemmat ovat käyttökelpoisia, mutta määrittäminen haastavaa, sillä ne muuttuvat toimintaolosuhteiden mukaan. NTP-olosuhteissa eli normaalipaineessa ja lämpötilassa voidaan kuitenkin määrittää vakioarvot. Vakiolämpötilassa ja –paineessa operoivan polttokennon synnyttämä sähköinen maksimityö ( $W_{el}$ ) saadaan laskettua sähkökemiallisen reaktion Gibbsin vapaan energian muutoksena ( $\Delta G$ )

$$W_{el} = -\Delta G = nFE_0, \quad (2.1)$$

missä  $n$  on reaktiossa mukana olevien elektronien lukumäärä anodille tuotua polttoainemolekyyliä kohti,  $F$  on Faradayn vakio ja  $E_0$  on polttokennon ideaalinen avoimen piirin jännite. Gibbsin vapaan energian muutos on mahdollista esittää myös seuraavasti

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (2.2)$$

missä  $\Delta H$  on entalpian muutos lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden välillä ja  $\Delta S$  entropian muutos lähtöaineiden ja reaktiotuotteiden välillä. Gibbsin vapaan energian muutokselle laskennallinen arvo on 237,34kJ/mol.

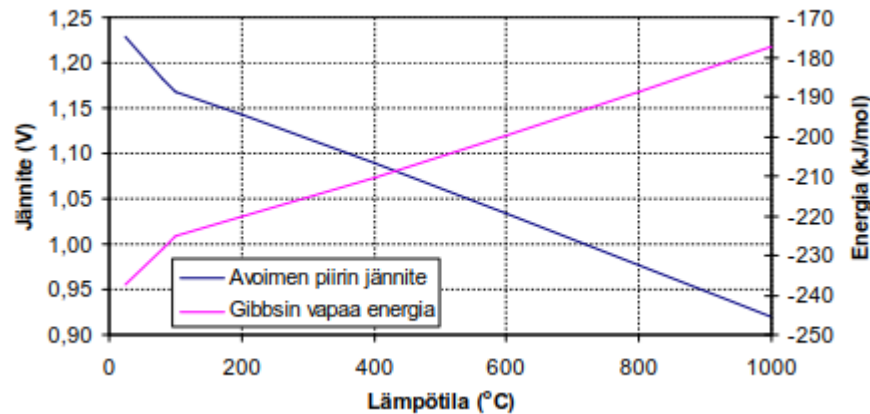
Polttokennon ideaalinen avoimen piirin jännite voidaan ratkaista yhtälöstä 2.1

$$E_0 = \frac{-\Delta G}{nF}. \quad (2.3)$$

Kun Gibbsin vapaan energian muutos pienenee lämpötilan kasvaessa, niin tällöin polttokennon jännite pienenee lämpötilan kasvaessa. Standardiolosuhteissa polttokennon ideaaliseksi avoimen piirin jännitteeksi saadaan

$$E_0 = \frac{237,34 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96487 \text{ As/mol}} \approx 1,23 \text{ V}. \quad (2.4)$$

Vety-happi-polttokennolle saatu teoreettinen tyhjäkäyntijännite ja Gibbsin vapaan energian muutos lämpötilan funktiona vakioaineessa on nähtävissä kuvassa 2.2



**Kuva 2.2** Teoreettinen tyhjäkäyntijännite ja Gibbsin vapaan energian muutos vety-happi-polttokennolle lämpötilan  $T$  funktiona [11]

Yleisesti energiaa muuttavan laitteen hyötysuhde voidaan määrittää ulostuloenergian ja käytetyn sisäänmenoenergian suhteena:

$$\eta = \frac{\text{Käytettävissä oleva ulostuloenergia}}{\text{Käytetty sisäänmenoenergia}}. \quad (2.5)$$

Puhuttaessa polttokennosta ulostuloenergia on tuotettu sähköenergia, ja sisäänmenona on vedyn entalpia eli vedyn korkeampi lämpöarvo (HHV = 286,02 kJ/mol). Tästä maksimi-hyötysuhteelle voidaan laskea

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{286,02 \cdot 10^3 \text{ J/mol}} \approx 0,83. \quad (2.6)$$

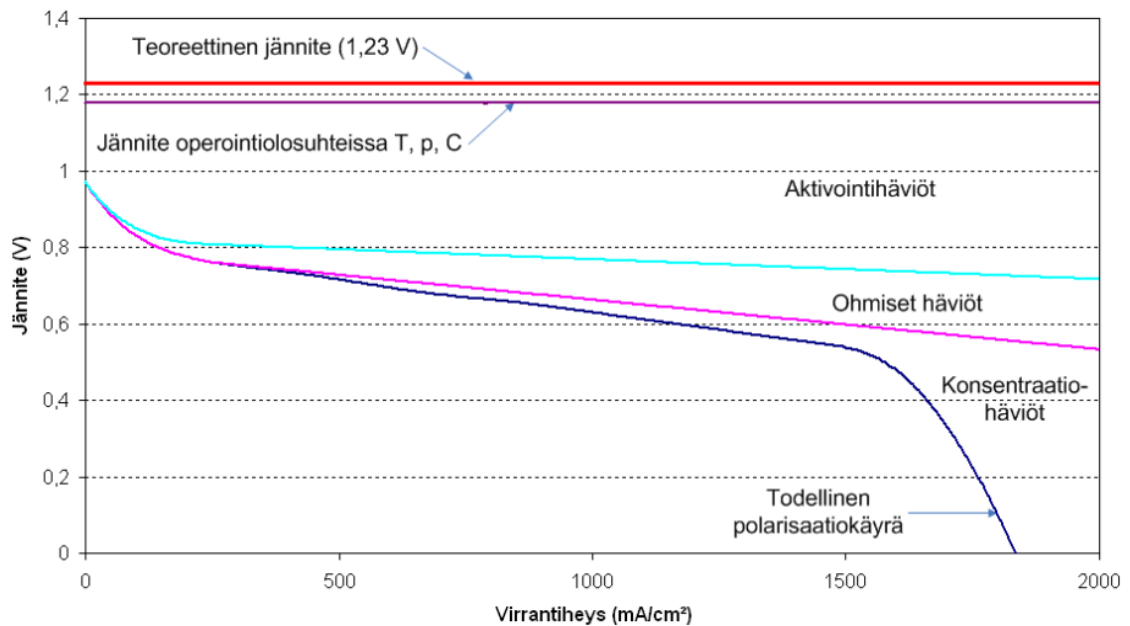
Hyötysuhde ei välttämättä kerro koko totuutta, sillä vety voi olla tuotettu jostakin lähtöaineesta, mikä madaltaa hyötysuhdetta.

Mainittakoon tässä yhteydessä vielä, että todellisuudessa kenno ei pysty tuottamaan edellä laskettuja arvoja vaan todellisuudessa ne ovat alhaisempia. Syy tälle on polttokennossa vaikuttavat irreversiibelit häviöt, joita aiheuttaa neljä eri tekijää:

- aktivointihäviöt
- vuotovirtahäviöt

- ohmiset häviöt ja
- konsentraatiohäviöt

Aktivointihäviöt syntyvät elektrodien pinnalla tapahtuvien reaktioiden hitaudesta. Vuotovirtahäviöt syntyvät, kun polttoaine kulkeutuu suoraan elektrolyytin läpi. Ohmiset häviöt aiheutuvat elektronien kohdatessa vastustusta kulkiessaan piirissä. Konsentraatiohäviöt taas aiheutuvat polttoaineen ja hapettimen konsentraatioiden muutoksista elektrodeilla. Alla on esitetty havainnollistava kuva 2.3, jossa vaikutukset ovat nähtävillä. [7]



**Kuva 2.3** Polttokennossa tapahtuvien eri häviöiden vaikutus jännitteeseen ja laskennallinen polarisaatiokäyrä [11]

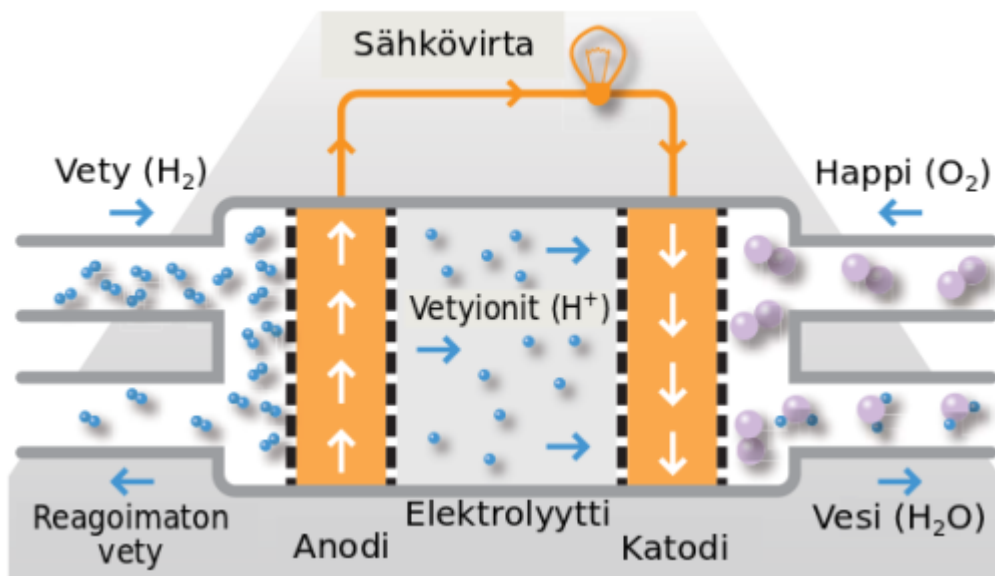
Rakentaessa polttokennoa nämä häviövaikutukset pyritään minimoimaan. Aktivointihäviöihin voidaan vaikuttaa erilaisilla keinoilla ja niitä voidaan pienentää käyttämällä parempia katalyyttimateriaaleja ja laajempaa elektrodien aktiivista pinta-alaa. Ioneja tehokkaammin johtava elektrolyytti ja sähköä johtavat elektrodit pienentävät ohmisia häviöitä. Häviöihin voidaan vaikuttaa myös säätämällä operointiolosuhteita [11] [14]

## 2.2 PEM- kennon toimintaperiaate

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka reaktioiden myötä muuntaa kemiallisen energian suoraan sähköksi. Kenno rakentuu elektrolyytistä, joka on yhteydessä huokoisista materiaaleista rakennettuihin anodiin ja katodiin. Tyypillisesti polttokennossa kaasumainen polttoaine (vety) syötetään jatkuvatoimisesti anodille (negatiivinen elektrodi) ja hapetin (ilmassa oleva happi) syötetään jatkuvatoimisesti katodille (positiivinen elektrodi, jolloin elektrodeilla tapahtuvan sähkökemiallisen reaktion kautta syntyy sähkövirta. Näin ollen voidaan ilmaista, että kennolla tapahtuu vedyn polttaminen.



Reaktiossa vapautuu lämpöä, mutta erityisesti se tuottaa sähköenergiaa. Kuvassa 2.4 on yksinkertainen havaintokuva PEM-kennon rakenteesta. [3]



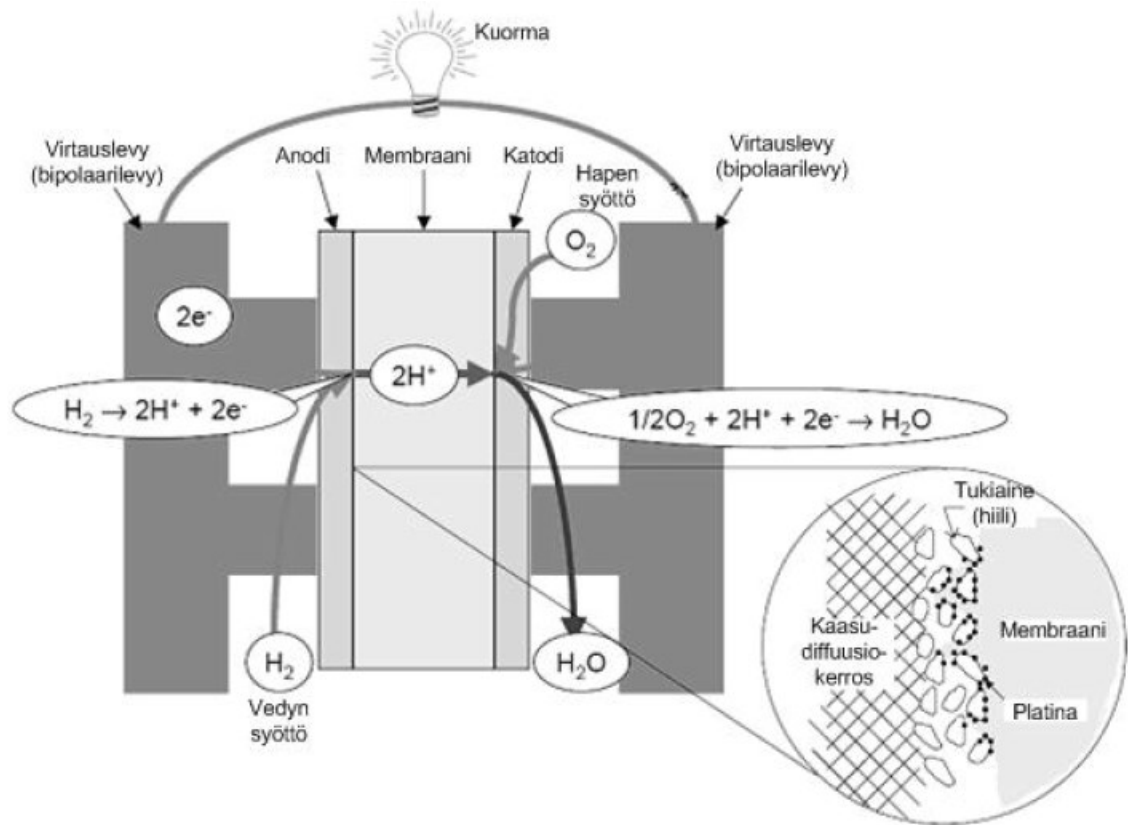
*Kuva 2.4. Yksinkertaisen polttokennon rakenne [12]*

Elektrodeilla syntyviin reaktioihin vaikuttaa se, mikä polttokennotyyppi on käytössä. Kuvassa 2.4 näkyy tyypillinen PEM-kennon reaktio. Osa reaktioista vaatii kiihdyttämistä ja tällöin erityisesti matalan lämpötilan polttokennojen elektrodeilla käytetään yleisesti katalyyttia. Korkeammissa lämpötiloissa tämä ei ole aina välttämätöntä.

Koska yhden kennon jännite on tyypillisesti vain noin 0,7 V, niitä pitää kytkeä yhteen suuri määrä riittävän korkean jännitetason ja tehotiheyden saavuttamiseksi. Pientehoisessa järjestelmässä, jota tässä työssä tutkitaan, tarvitaan muutamasta kennosta kymmeneen, ellei jopa satoihin kennoihin. [4]

### 2.3 PEM- kennon rakenne

Kiinteäpolymeerikkenno on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen, elektrolyyttinä toimii kiinteä polymeeri, mikä kuljettaa hyvin protoneja, kuten kuvassa 2.4 positiivisia ionivaroja. Kennossa ainoa neste on vesi, jolloin korroosiota ilmenee vain vähän. Kuten edellä jo mainittiin, niin tyypillisesti kennon käyttölämpötila on alhainen, alle 120 °C. Järjestelmää on kuvattu alla kuvassa 2.5.



**Kuva 2.5.** PEMFC:n perusrakenne ja toimintaperiaate [11]

Kuvassa 2.5 kiinteäpolymeerielektrodikennon anodilla vety synnyttää  $H^+$  ioneja vapauttaen samalla elektroneja



Tässä reaktiossa vapautuu energiaa. Katodilla happi reagoi elektrolyytin kautta siirtyvien  $H^+$  ionien ja ulkoisen kuorman kautta kulkeutuneiden elektronien kautta muodostaen vettä.



Kennossa elektrolyytti päästää lävitseen vain  $H^+$  ionit, ei elektroneja. Puhuttaessa PEM-kennosta, vedyn tulee olla melko puhdasta. Lisäksi katalyyttinä reaktiota kiihdyttämään käytetään platinaa.

Polttokennojärjestelmässä pääkomponentit ovat siis elektrodit, elektrolyytti ja kennoston virtaus- eli bipolaarilevyt. Bipolaarilevy johtaa sähköä perättäisten yksittäisten kennojen välillä. Levyjen kautta reagenssikaasut johtuvat elektrodeille ja lämpö johtuu pois elektrodeilta. Merkittävä osa kennon koosta syntyy pääkomponenttien lisäksi erilaisista systeemin oheislaitteista, joista käytetään nimitystä BOP (Balance of Plant). Aivan pienemissä polttokennoissa rakenne on suhteellisen yksinkertainen, mutta suuremmissa tar-

vitaan esimerkiksi polttoaineen ja ilman kierrättimiä eli pumppuja ja puhaltimia. Kennoston tuottamaa tasasähköä joudutaan usein muokkaamaan, jolloin tarvitaan esimerkiksi jänniteregulaattoria tai DC/DC- muunninta. Suuremmissa CHP-sovelluksissa tarvitaan DC/AC-inverttereitä. Lisäksi ohjaukseen voidaan tarvita sähkömoottoreita. [5]

PEM-tyyppisten polttokennojen peruspolttoaine on siis vety. Mikäli vetykaasua ei ole saatavilla, tarvitaan erillinen ns. reformeriyksikkö, joka huolehtii vetykaasun tuotosta. Sen polttoaineena voi toimia jokin nestemäinen polttoaine, kuten metanoli tai hiilivetyseos. Myös maakaasu on polttokennökäytössä mahdollinen, ja se onkin tärkein polttoaine kiinteissä sovelluksissa. Maakaasua tässä ei kuitenkaan tarkastella sen syvemmin, sillä se liittyy enemmän korkealämpötilanpolttokennoihin. PEM- kennoissa harvoin käytetään maakaasua. Anodille syötetään joko vetyä  $H_2$  tai hiilimonoksidia CO [2]

## 2.4 PEM-kennon ominaisuudet

Seuraavassa taulukossa on esitelty vertailun vuoksi hieman PEM- ja PAFC-kennon ominaisuuksia. PAFC- eli fosforihappopolttokennossa on fosforihappoelektrolyytti. Yleisesti ottaen PAFC soveltuu korkeamman lämpötilan sovellutuksiin. Molemmat kennot toimivat vetykaasulla. PEM- kennolle myös metanoli olisi periaatteessa mahdollinen, mutta tällaisten ns. 'suorametanoli- kennojen' heikkous on ainakin toistaiseksi paljon nykyisiä vetykennoja huonompi virran- ja tehon tiheys.

**Taulukko 2.1.** Kahden polttokennotyyppin vertailua [2]

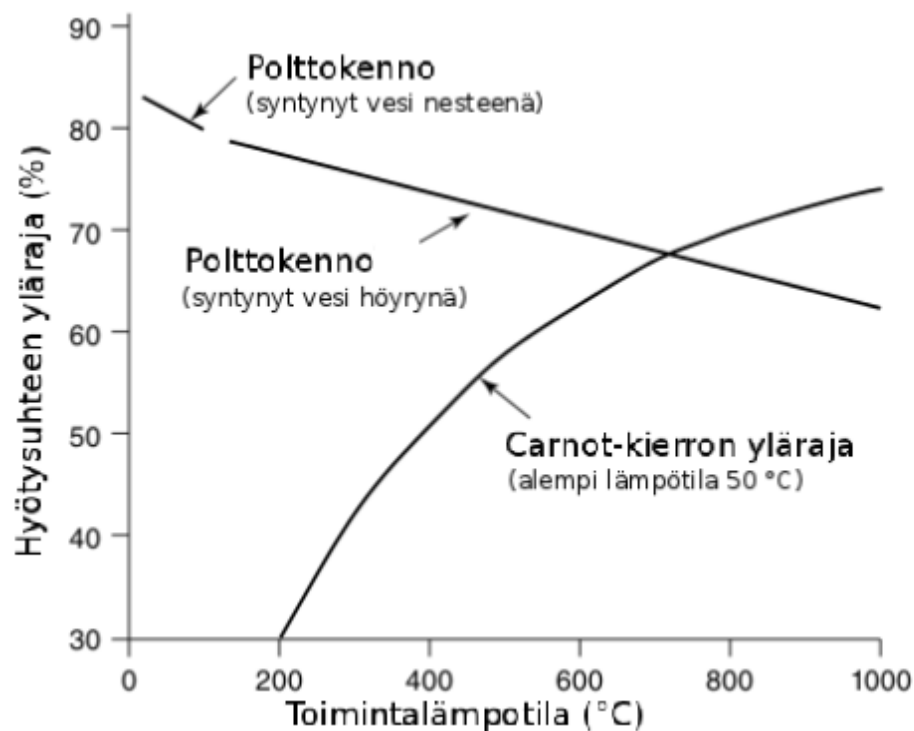
Kennotyyppi	PEM	PAFC
Varauksen kantaja	Protoni $H^+$	Protoni $H^+$
Toimintalämpötila [ $^{\circ}C$ ]	70-80	200-220
Katalyytit	Platina	Platina
Rikinsieto ( $H_2$ ja COS)	?	<50 ppm
Virrantiheys	Suuri	Keskisuuri
Tyypillinen sovellusalue	Sähköntuotanto, pienmitta- kaavan kannettavat laitteet, ajoneuvot	Sähköntuotanto, suuret ajoneuvot
Edut	Matala lämpötila, nopea käynnistys, kiinteä elektro- lyytti	Hyvä energiatalous (yhdis- tetyssä sähkö-lämpötuot- annossa, ei herkkä epä- puhtauksille

Yleisesti voidaan todeta, että polttokennoilla etuja tuotannossa ovat järjestelmän korkea hyötysuhde, yksinkertainen rakenne, pienet emissiot ja hiljainen käyttö. Toistaiseksi kaupallisuuden esteenä nähdään olevan hinta, kehittymätön teknologia, vedyn infrastruktuuri ja käyttöikä. [2]

PEM- kenno toimii matalissa lämpötiloissa, joten se käynnistyy nopeasti. Muita etuja kennolla on, että sen kalvot ovat ohuet, jolloin se on kompakti. Lisäksi siinä ei ole korroosiota aiheuttavia nesteitä ja se voi toimia kaikissa asennoissa. [11]

## 2.5 Vety-polttokennon ja lämpövoimakoneen vertailu

Polttokennolla on erittäin hyvä hyötysuhde verrattaessa lämpövoimakoneeseen (Carnot-kierto). Kuvassa 3.1 on esitetty polttokennojen ja Carnot-kierron teoreettiset maksimi-hyötysuhteet. Kuvasta voidaan nähdä, että polttokennon hyötysuhde ylittää Carnot-kierron hyötysuhteen laajalla alueella, erityisesti matalilla toimintalämpötiloilla.



**Kuva 3.1** Polttokennon ja Carnot-kierron teoreettiset hyötysuhteet [11]

Huomataan, että polttokennoilla on selkeä etu, sillä sen maksimihiötysuhteet saavutetaan jo matalilla lämpöasteilla. Lisäksi hyötysuhde on hyvä myös osakuormitusasteella. Lämpövoimakoneilla maksimiteho saavutetaan vasta korkeissa lämpötiloissa. Käyttämällä vetyä polttoaineena on mahdollista saavuttaa polttokennosta saatavat hyödyt eli päästötömyys ja melun väheneminen. Käyttämällä vetyä reaktiot tapahtuvat puhtaasti anodilla ja katodilla, mikä on täysin äänetön prosessi.

## 2.6 PEM-kennon ominaisuudet

Elektrolyytti on ioneja läpäisevä polymeeri. Molemmilla puolilla elektrolyyttiä on rakenteellisesti kiinni katalyytin sisältävä elektrodi. Tämä anodi-elektrolyytti-katodi- liitännä on yksi kokonaisuus ja se on hyvin ohut. Nämä membraanikalvoista koostuvat liitännät, joita kutsutaan nimellä MEA (Membrane Electrode Assemblies), saadaan liittymään toisiinsa käyttämällä bibolaarilevyjä. Käytetty liikkuva ioni polymeerissä on  $H^+$  ioni tai protoni ja sen toimintaperiaate on esitetty omassa luvussaan tässä työssä. Elektrolyytin toiminnassa yksi tärkeä tehtävä on veden kuljettaminen, jotta se ei alkaisi tulla.

Polttokennon polymeerielektrolyytissä on oltava oikea kosteuspitoisuus. Protonin johtavuus on suoraan verrannollinen veden pitoisuuteen. Veden suhteen elektrolyytti vaati tasapainoa, sillä liika vesi muun muassa tukkii kaasudiffuusiota varten olevat kanavat. Koska membraanielektrolyytti on niin ohut, vesi voi diffusoitua katodilta anodille, jolloin elektrolyytillä on hyvä vesitasapaino.

Veden pitoisuuteen liittyy kuitenkin tiettyjä ongelmia. Yksi on, että liikkuvat  $H^+$  ionit vetävät vesimolekyylejä puoleensa. Toinen heikkous on ilman kuivattava vaikutus. Yksi ratkaisu tähän on ilman ja vedyn kosteuttaminen ennen kuin ne saapuvat elektrolyyttiin. Lisäksi vesitasapainon on oltava oikea koko kennossa, mikä on haastavaa. [4]

### 2.6.1 Vesi ja jäähdytys kennossa

Veden poistamiseen kennosta käytetään ilmaa. Ilmaa syötetään hieman tasapainoa vaativaa syöttönopeutta suuremmalla nopeudella, jotta happitaso olisi riittävä. Kennon kuivuminen ei ole lineaarista suhteessa lämpötilaan ja tästä johtuen tarvitaan sellaisia suureita kuin suhteellinen kosteus, veden pitoisuus, kylläinen höyrynpaine. Valitsemalla sopivat operoitavat lämpötilat ja ilman virtausasteet, PEM-kennoa on mahdollista käyttää ilman että se kuivuu tai vaatii lisäkosteutta. Kuitenkin jos PEM- kennon operaatiolämpötila on yli 60C, on ylimääräinen kosteus tarpeellinen. [4]

Polttokennon hyötysuhde on 50 % luokkaa. Tämä tarkoittaa, että osa energiasta muuttuu lämmöksi. Kennon reaktantti-ilma ja jäähdytysilma on pidettävä erillään. Jos ilma olisi yksi ja sama, voidaan laskennallisesti määrittää, että ulostuleva ilman kosteus olisi 26% (jossakin tapauksessa), mikä tarkoittaa, että ilma olisi kuivempaa kuin Saharan aavikolla. Näin ollen erillinen jäähdytysjärjestelmä on tarpeellinen. Myös vesijäähdytys on polttokennolle mahdollinen, kuten se yleisesti on mahdollinen kaikille moottoreille. Ilmajäähdytys on yksinkertaisempi, mutta sillä on vaikeampi tuottaa tasaista jäähdytystä koko alueelle. Vesijäähdytys toimii vastaavanlaisesti kuin ilmajäähdytys, mutta siinä pumpataan ilman sijasta vesi jäähdytyskanaviin. [4]



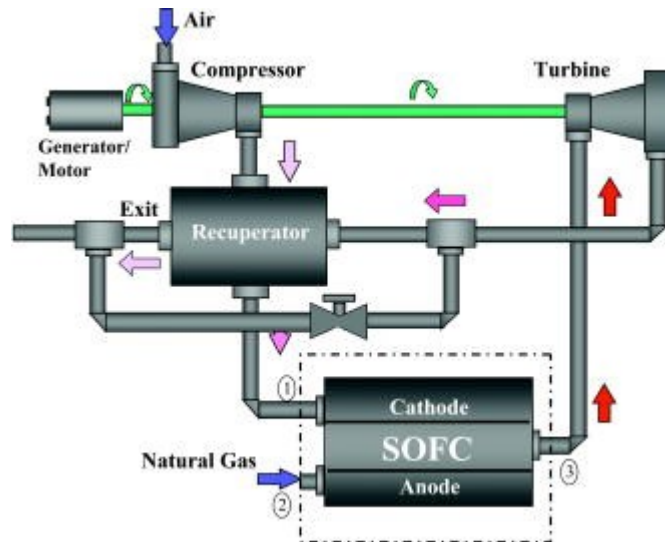
## 2.6.2 Bipolaarilevyt

Useimmat PEM-kennot on koottu monista kennoista sarjaan bipolaarilevyjen avulla. Kennojen kalvot ovat tyypillisesti hyvin ohuita, jolloin suurin osa massasta (80%) tulee bipolaarilevyjen painosta. Lisäksi hinta koostuu suurelta osin näistä levyistä. Reagoivat aineet johdetaan kalvoille levyjen kanavien kautta, ja nämä kanavat voivat olla malliltaan hyvin erityyppisiä. Muodoilla on erilaisia ominaisuuksia, esimerkiksi serpentiinimallin hankaluus on lukuisat käännökset, jolloin reagoiva aine ei pääse virtaamaan vapaasti.

Bipolaarilevyjen pitää lisäksi täyttää seuraavat ehdot: Sähkönjohtavuus on oltava suurempi kuin  $10 \text{ S cm}^{-1}$ , Lämmönjohtavuus pitää olla  $20 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  normaaleille jäähdytysnesteille tai  $100 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , jos lämpö poistuu vain reunoilta, kaasun läpäisevyys on oltava alle  $10^{-7} \text{ mBar L s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ , sen on oltava korroosiosuojattu hapolta, hapelta, vedyltä, lämmöltä ja kosteudelta, sen on oltava jäykkä taivutusjäykkyys suurempi kuin  $25 \text{ Mpa}$  ja hinnan oltava mahdollisimman alhainen, koska kustannukset syntyvät siitä. Lisäksi bipolaarilevyjen on oltava mahdollisimman ohuita, kevyitä ja tuotannon jaksoaika oltava lyhyt. [4]

## 2.6.3 Operoitava paine

Operoitavalla ilmanpaineella on merkitystä kennon toiminnalle. Pienimmissä PEM-kennoissa operoidaan normaalipaineessa, mutta suuremmat kennot vaativat korkeamman ilmanpaineen. Paineen nostaminen johtuu tehon tuottamisesta, korkeammassa paineessa saadaan enemmän tehoa ulos ja toiminta-aste paranee. Tavoite on, että paineentuottovälineet maksavat vähemmän kuin moottorin koon kasvattaminen. Kuvassa 2.3 on esitetty SOFC-kennon ilmapaineistettu järjestelmä. PEM- kennon toiminta on lähes vastaava, mutta syötettävä maakaasu vaatisi reformeriyksikön. Kaavakuvan mukaan nähdään, että vain ilma vaatii paineistuksen. Polttoainetta voidaan hyödyntää, jos se on maakaasua tai korkeapaineista vetyä.



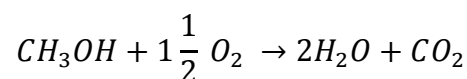
*Kuva 2.3. SOFC-kennon paineistettu järjestelmä. [10]*

Paineistetun järjestelmän aiheuttamalle teholle voidaan tarvittaessa laskea häviöt. Reagoivan aineen osalta ongelmia paineistuksessa aiheuttaa kostutus. Jos ilma on kuumaa ja vaatii jäähdystä, kostutus on helpommin hallittavissa kuin muissa olosuhteissa. Korkeassa paineessa sopiva kosteus on helpommin saavutettavissa. Todettakoon vielä, että kostutusta on hyvin vaikea järjestää yli 80°C lämpötilassa, ellei paine ole yli 2 baaria. [4]

## 2.7 DMFC-kennon

Tälle suorametanolikennolle ominaista on metanolin suorasyöttö polttoaineena, jossa metanoli toimii vedyn kantajana. Metanolin osalta kaikkia ongelmia ei ole vielä ratkaistu, mutta siinä on potentiaalia toimia vedyn tuottajana. Metanoli itsessään on hyvin saatavilla oleva ja halpa nestemäinen polttoaine. Suorametanoli järjestelmällä on korkea nettoenergiatiheys (metanolin energiatiheys on 19.7MJ/kg, joka on noin puolet bensiinin energiatiheyttä pienempi), mikä on kyseisen järjestelmän suurimpia hyötyjä. Järjestelmä on myös helppokäyttöinen ja helposti uudelleen täytettävä. Prosessille ominainen ongelma on polttoaineen hidaskäyttö anodilla. Toinen ominainen ongelma on polttoaineen sekoittuminen elektrolyytissä. Nämä kaksi ongelmaa ovat esteitä suorametanolikennon yleistymisessä kannettavissa laitteissa. Kennon jännitteeksi voidaan laskea 1,2 V häviöttömässä tapauksessa, mikä on hieman korkeampi kuin muissa kennoissa. Huomattavaa kuitenkin on, että suorametanolikennon häviöt ovat suuremmat kuin muissa kennoissa.

Suorametanolikennossa tapahtuvalle reaktiolle voidaan kirjoittaa yhtälö



Yhtälöstä huomataan, että kun anodille syötetään polttoainetta, tarvitaan reaktioon myös vettä. Näin ollen tarvittava aine onkin veden ja metanolin sekoitus. Tarkemmin ottaen

vesi lisätään metanolin joukkoon kennossa. Katodi reaktiot taas ovat samat kuin yleisesti vetykennolla.

Suorametanolikennossa ongelmia tuottaa siis polttoaineen sekoittuminen veteen. Tällöin se jatkaa kulkuaan katodille ja reagoi ilman kanssa. Katodille kulkeutuva polttoaine menee siis hukkaan ja samalla kennon jännitetaso laskee. Kyseistä ilmiötä ehkäisemään on kehitetty neljä tapaa, joita ovat

- anodin katalyytti on mahdollisimman aktiivinen
- polttoaineen virta anodille on säädely
- käytössä on paksummat elektrolyytit, kuten PEM-kennossa
- myös elektrolyytin koostumuksella on vaikutusta.

Sekoittumisen vähentymiseksi on myös käynnissä tutkimuksia uusien tekniikoiden käytöstä.

Vain noin 2% metanolista käytetään suoraan polttoaineena. Metanolia voidaan tuottaa helposti erilaisista hiilivety-yhdisteistä. Metanoli on helposti syttyvä ja palava aine ja siksi sen käsittely vaatii varovaisuutta ja tarkkuutta. Lisäksi se on myrkyllistä sekä nestemäisenä että höyrynä. Metanolin säilytys vaatii huolellisuutta, sillä se on hyvin herkkä reagoimaan veden kanssa. [4]

### 3. VEDYN JA VAIHTOEHTOISTEN LIIKENNE- POLTTOAINEIDEN TARKASTELU

Puhuttaessa polttokennoista ja energiantuotannosta tulee kysymykseen myös vedyn tuotanto elektrolyysillä. Tämän vuoksi vedyn tuotantotavat ja vedyn laatu ovat ajankohtaisia tutkimuskohteita polttokennojen rinnalla. Puhuttaessa polttokennoista on oleellista hahmottaa myös muut ympäröivät vetyteknologiat. Toisaalta niin sanottu vetytalous, jota on totuttu pitämään polttokennoteknologian käyttöönoton oleellisena osana, ei ehkä olekaan itsestään selvä kehityspolku. Varsinkin maakaasua suoraan hyödyntävien korkealämpöisten kennotyyppien kehittyminen ja piensovelluksiin kaavailtu suorametanoliksenno ohittavat kokonaan tarpeen vetypolttoaineesta. Tällöin pystyttäisiin hyödyntämään muita polttoaineita kuin vetyä. Siitäkin huolimatta on hyvä tarkastella vetytaloutta. [1][2]

Tässä luvussa tutkitaan, millä tavalla vetyä käytetään osana vetytaloutta. Jotta vetyä voidaan käyttää laajamittaisesti hyväksi liikennepolttoaineena, pitää sitä voida tuottaa ympäristölle edukkaalla tavalla. Vedyn ympäristöystävällisyyteen ja päästöttömyyteen vaikuttaa raaka-aineen valmistus ja valmistukseen käytetyn energian alkuperä. Joissakin teollisuuden prosesseissa, esimerkiksi kemianteollisuudessa vetyä syntyy sivutuotteena, jota on mahdollista hyödyntää.

Polttokennoautoissa pitää ottaa huomioon myös vedyn jakeluverkosto. Sen luominen on osaltaan edellytys vetypolttoaineella toimivien autojen yleistymiselle. Jotta ihmiset ostavat vedyllä toimivia autoja, pitää verkoston olla riittävän kattava. Vedyn käytössä on otettava huomioon myös sen turvallisuus. Esimerkiksi tankkauksen pitää tapahtua kuluttajilta turvallisesti. [12]

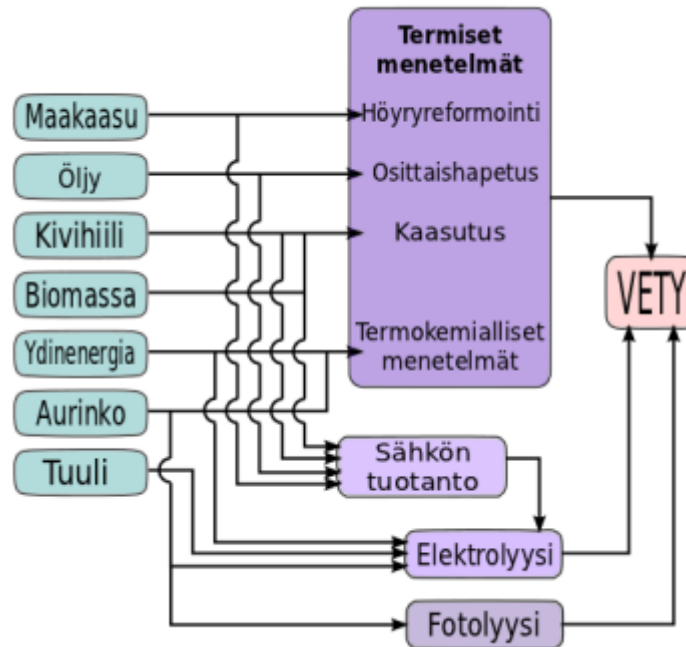
Tulevaisuuden visiona voidaan pitää tilannetta, jossa vedyllä pystytään tuottamaan liikenteessä tarvittava polttoaine niin, että energian alkuperä olisi uusiutuvista energianlähteistä, kuten tuuli- ja aurinkovoimasta. Näin voitaisiin saavuttaa tehokas ja ympäristöystävällinen liikenteen energiajärjestelmä. [12]

#### 3.1 Vedyn valmistus

Vetyatomeja on maailmankaikkeudessa kaikkialla. Siitä huolimatta vetyä ei esiinny vapaana, vaan se on aina kiinnittynyt johonkin toiseen atomiin. Näin ollen vetyä pitää aina valmistaa jollakin menetelmällä, ja tähän tarvitaan väistämättä energiaa. Vety ei siis ole polttoaine tai energianlähde, vaan energian kantaja.

Vetyä valmistaessa voidaan hyödyntää joko primäärienergiaa (maakaasua, raakaöljyä, hiiltä) tai sekundääristä energiaa (sähkö, metanoli). Vedyssä ilmenee lähes aina epäpuhauksia sen tuotantotavasta riippuen. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikkia aineissa ilmeneviä

epäpuhtauksia ei saada poistettua. Ainoa keino tuottaa vetyä täysin puhtaasti on ei-fossili-  
 lisista polttoaineista, kuten ydinvoimasta tai uusiutuvista energianlähteistä, kuten au-  
 rinko- ja tuulivoimasta. Kuvassa 3.1 on esitetty kaavio, miten vetyä voidaan tuottaa eri  
 lähteistä.



**Kuva 3.1** Vedyn tuotantoteknologioita ja mahdollisia raaka-aineita [14]

Maailmalla tuotetaan paljon vetyä. Valmistustapoja on monia, mutta suurin osa markki-  
 noilla olevasta vedystä tuotetaan maakaasusta höyryreformerilla. Yksi vedyn käytön  
 suurkuluttajista markkinoilla on petrokemian teollisuus, joka suorittaa niin kutsuttua ve-  
 tykrakkausta eli lisää vetyä nestemäisiin öljyjalosteisiin parantaen niiden ominaisuuksia.  
 Vetyä syntyy myös sivutuotteena erilaisissa valmistusprosesseissa, kuten PVC -muovien  
 valmistuksessa.

Vedyn valmistuksessa sähkökemiallinen reaktio, elektrolyysi, edustaa toistaiseksi vain  
 murto-osaa (noin 5 %) vedyn valmistuksesta. Suunnitelmat uusituvan energian lisäämi-  
 sestä saattavat kuitenkin lisätä tämän menetelmän käyttöä. Termokemialliset menetelmät  
 ovat yleisesti tutkimuskohteena vetytutkimuksessa, mutta niiden lisäksi tutkitaan myös  
 fysikaalis-kemiallisia menetelmiä, minkä tavoitteena on löytää menetelmiä vedyn erotta-  
 miseksi sopivasta lähtöaineesta. Bioteknologian saralla on myös menossa tutkimuksia,  
 joissa vedyn valmistuksessa hyödynnetään täysin biologista prosessia, jossa bakteerit  
 tuottavat vetyä. Tämä lisäisi paikallisessa tuotannossa jätevesien ja talousjätteiden käyt-  
 töä. Tämän lisäksi erilaisia paineistettuja elektrolyyttisiä laitteistoja on testattu esimer-  
 kiksi bussivarikon vetytuottoon.

### 3.2 Vedyn varastointimenetelmät

Kuten kuvassa 3.1 nähtiin, niin polttokenno toimii hyvällä hyötysuhteella ja siksi se on niin tavoiteltu polttoaineena muun muassa polttokennoteknologiassa. Liikkuvista eli mobiilisovelluksista, kuten kannettavista laitteista ja työkoneista, on otettava huomioon erilaisia tekijöitä koskien vedyn varastointia. Vety on herkkä alkuaine, joka reagoi helposti ympäristön kanssa. Näin ollen yhtenä haasteena on saada varastoitua sitä jokseenkin järkevässä ja käytettävässä muodossa. Erityisesti pienissä laitteissa hankaluutena on niiden kokoluokka ja vetylaitteiston sovittaminen niin, ettei järjestelmän käytettävyys liikaa kärsisi. Varastointi on hankalaa ja vie paljon tilaa, jolloin laitteen käytettävyys helposti kärsii. Luonnostaan vety on siis kaasumaisessa olomuodossa ja siksi sen varastointi voi olla mutkikasta.

Periaatteessa vetyä voidaan varastoida ainakin kolmella pääteknikalla:

- paineistettuna kaasuna (paine noin 35 MPa)
- nesteytettynä (lämpötila -253 °C)
- metallihydrideinä.

Vety on potentiaalinen energiavarasto, sillä sen energiasisältö massayksikköä kohti on poikkeuksellisen suuri (katso taulukko 3.1), mutta heikkous on siinä, että kaasumaisena aineena sen tiheys on kovin pieni ja tällöin varastointi vaatii kohtuuttoman suuren tilan. Vety säilötäänkin kaasumaisena usein suurissa metallitankeissa. Haastava varastointi aiheuttaa sen, että polttokennotekniikan hyötysuhde jää helposti alle sen mitä se on polttomoottoritekniikalla.

Kun tarkastellaan vedyn ominaisuuksia, niin näyttää siltä, että nesteytys olisi paino- ja tilavaatimuksiltaan parempi vaihtoehto kuin paineistettu kaasu. Vedyn ominaisuutena on, että sillä on matala nesteytyslämpötila, mikä tekee siitä vaikean nesteytettävän. Säiliöissä tarvitaan tehokkaat eristeet, mutta silti jäähdytyksen ylläpidon energiantarve on suuri. Vety on myös syttymisherkkää, jolloin pitää ottaa huomioon myös räjähdysalttius. Varastoinnissa tapahtuu ylivuotoa eli kiehumaa, joka on yleensä 3 % luokkaa nestetilavuudesta vuorokaudessa.

**Taulukko 3.1** Polttoaineiden ominaisuuksia [2]

Suure	Vety	Meta- noli	Maa- kaasu	Ben- siini
Alempi lämpöarvo (MJ/Kg)	120	20	50	43
Tiheys (NTP, Kg/m <sup>3</sup> )	0,09	780	0,72	750

Sulamispiste (°C)	-262	-98		
Kiehumispiste (°C)	-253	65	-258,7	27-225
Itsesytyyslämpötila (°C)	585	385	540	228-501
Palamiskelpoisen seoksen rajat ilmassa (til-%)	4-75	6,0-36,5	5,3-15	1,0-7,6
Minimi sytytysenergia (μJ)	20		290	240

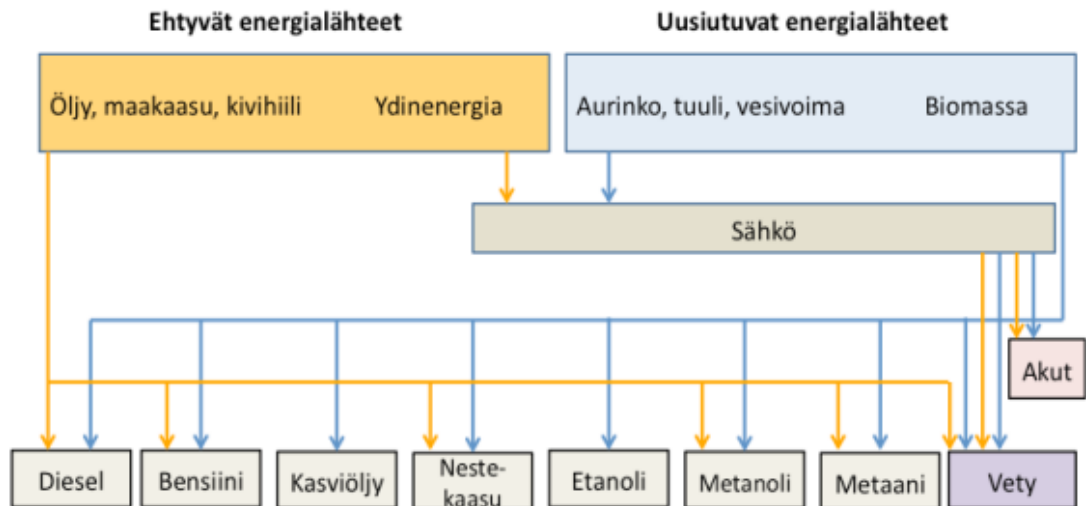
Kun vetyä varastoidaan ajoneuvoissa, yhtenä tulokulmana täytyy pitää varastoinnin turvallisuutta. Näin ollen kaasumainen tai nesteytetty vety ei välttämättä olekaan paras ja turvallisin vaihtoehto vaan vaihtoehdoksi nousee vedyn sitominen metallihydrideihin. Tällä tavalla järjestelmän painetaso jäisi kohtuullisen alas, noin 5 bar:iin. Vielä kuitenkin metallihydridin tekniikka ei ole sillä tasolla, että sitä voisi laajamittaisesti hyödyntää, sillä sen hinta on edelleen korkea. Lisäksi yhdisteeseen saadaan varastoitua vain pieniä määriä vetyä, noin 2-4%, jolloin vedyn hyödynnettävyys kärsii. Myös vedyn sitominen hydridiin vaatii melko paljon energiaa, joten kehitettävää tällä saralla on vielä jäljellä. Hydridejä käytetään nykyään pientehosovelluksissa. [2]

### 3.3 Vaihtoehtoiset liikennepolttoaineet

Liikenteessä käytettävillä vaihtoehtoisilla polttoaineilla tarkoitetaan muita kuin öljypohjaisia polttoaineita. Jaottelu voidaan tehdä esimerkiksi seuraavasti:

- nestemäiset vaihtoehtoiset polttoaineet, kuten synteettiset polttonesteet ja biopolttoaineet
- kaasumaiset vaihtoehtoiset polttoaineet, kuten maakaasu, nestekaasu ja vety
- sähkö.

Lisäksi jaottelussa voidaan hyödyntää tietoa siitä, onko kyseessä uusiutuva energia vai ei. Kuvassa 3.2 on esitetty vastaavanlainen jaottelu.



*Kuva 3.2 Vaihtoehtoisten polttoaineiden jaottelu [12]*

Vaihtoehtoisia polttoaineita voidaan jaotella myös sen mukaan, kuinka hyvin kestävä kehityksen periaatteet toteutuvat. Tässä suhteessa polttoaineissa on eroja. Maakaasu ei kuulu uusiutuviin energialähteisiin, mutta ympäristön ja riittävyyden kannalta se on silti parempi vaihtoehto kuin öljytuotteet. Biopolttoaineiden osalta mielipiteitä on jakanut sen tuotantotapa, sillä se vie tilaa viljelyskasveilta, jotka on tarkoitettu elintarvikekäyttöön.

Vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden osuus tieliikenteessä on edelleen maailmanlaajuisesti arvioiden kohtuullisen pieni. Kuvassa 3.1 on nähtävillä kaikki nämä polttoaineet. Kun kaikki vaihtoehtoiset polttoaineet lasketaan yhteen, arvioksi niiden osuudesta saadaan noin 3,5% ja biopolttoaineiden osuudeksi noin 1,5% [s.10, 12]

### 3.4 Polttoaineen tuottaminen biokaasusta

Biokaasua syntyy, kun orgaaninen aine hajoaa hapettomassa tilassa. Sen valmistus tapahtuu esimerkiksi biokaasureaktoreilla tai keräämällä kaatopaikalta kaasukeräimien avulla. Kun orgaaninen aine hajoaa hapettomassa tilassa, syntyy biokaasua. Biokaasusta metaania ( $\text{CH}_4$ ) on noin 55-65% ja hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ) on noin 35-45%. Biokaasussa voi olla myös muita aineita, kuten rikkivetyä. Biokaasua voidaan käyttää muun muassa liikennepolttoaineena. Biokaasun mädättämisprosessissa tapahtuvaa pilkkoutumista kutsutaan hydrolyysiksi. Tämän jälkeen prosessissa tapahtuu happokäyminen. Lopuksi tuotteesta jää vielä mädätysjäänös, jota voidaan käyttää esimerkiksi lannoitteena.

Biokaasu on varteenotettava polttoaine, sillä se on uusiutuva energianlähde. Biokaasun jalostuttua biometaaniksi, voidaan sillä korvata fossiilisia polttoaineita. Biokaasun katsotaan olevan hiilineutraali polttoaine uusiutuvuutensa ansiosta. Biometaania voidaan käyttää suoraan omalla moottorilla tai polttokennon raaka-aineena. Päästöt tällä polttoaineella ovat vähäiset ja sen aiheuttama meluhaitta on huomattavasti vähäisempi kuin nestemäisillä aineilla. [11]



Biokaasua voidaan tuottaa kaikesta kotitalous- ja maatalousjätteestä. Biokaasulla on suuri energiasisältö ja se on merkittävä uusiutuva polttoaine. Biokaasua voidaan käyttää yhdellä seuraavista tavoista:

- Suora palaminen
- Muuntaminen biokaasuksi pyrolyysillä, nesteen kaasuttaminen tai anaerobinen sulattaminen
- Muuntaminen etanoliksi käymisen avulla
- Muuntaminen synteetikaasuksi termokemiallisesti, josta edelleen muuntaminen metanoliksi tai ammoniakiksi
- Muuntaminen nestemäiseksi hiilivedyksi hydraamalla.

Biokaasut ovat käyttökelpoisia joissakin polttokennojärjestelmissä, kuten kiinteäoksidipolttokennoissa eli SOFC, koska suurimmalla osalla biokaasuista on alhainen lämpöarvo, johtuen suhteellisen korkeista hiilioksidin ja typen arvoista. Lisäksi nestemäiset bionesteet ovat hyvin soveltuvia joihinkin polttokennosysteemeihin. [5]

## 4. POLTTOKENNOSOVELLUKSET

Tässä osiossa tarkastellaan erilaisia polttokennosovelluksia. Suurimman huomion erilaisista käyttökohteista on saanut polttokennojen käyttö ajoneuvoissa ja erilaisissa työkohteissa voimanlähteenä. Lisäksi on olemassa erilaisia kannettavia sovelluksia, joita tarkastellaan omassa osiossaan. Käytännössä polttokennoja voidaan soveltaa lähes kaikkiin tehoa vaativiin kohteisiin. Voidaan sanoa, että käytettävyys polttokennoilla on hyvin laaja, vaikka monet sovellukset ovat edelleen kehitysasteella.

### 4.1 Yleistä ajoneuvojärjestelmästä

Polttokennoautot ovat erittäin hyviä hyötysuhteeltaan, huomattavasti suorituskykyisempiä kuin nykyiset keskiarvon polttomoottoriautot. Polttokennon käytöstä ajoneuvoissa mainittakoon muutamia etuja, joita ovat

- sen kantama ja tankkausajat ovat verrattavissa tavallisiin autoihin
- polttoaine voidaan tuottaa monella eri tapaa
- sen voimansiirto ei aiheuta käytännössä ollenkaan tärinää.

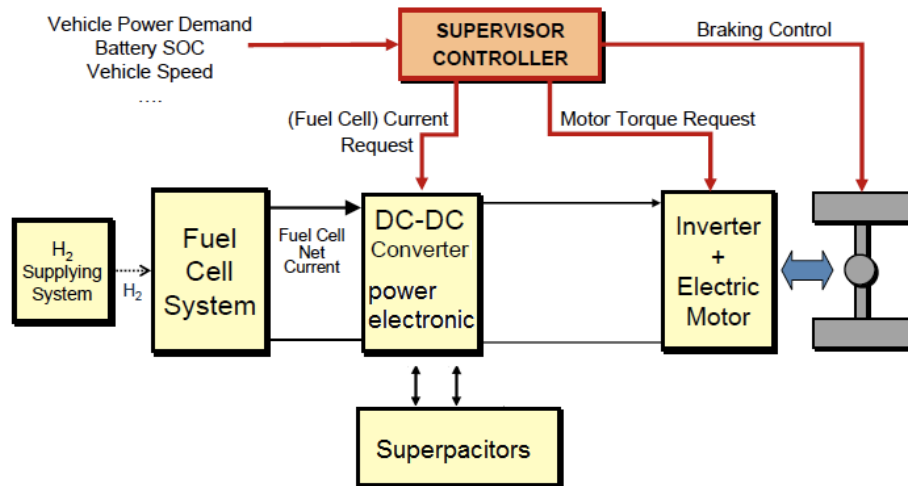
Polttokennoautot tarvitsevat tankkauspisteitä, mutta toistaiseksi verkosto ei ole kovin kattava. Tavoite on, että Yhdysvalloissa olisi 44 tankkauspistettä vuoteen 2017 mennessä. Euroopassa tankkauspisteitä muutamia kymmeniä ja Hydrogen Mobility Europe on kasvattamassa määrää. Japanissa taas 2016 vuonna tankkauspisteitä oli 80, mutta sielläkin niiden lukumäärää ollaan nostamassa.

Teknologia ajoneuvoissa ei ole sinällään uutta, sillä polttokennoautot vastaavat hyvin pitkälti sähköautoja, joita on tuotettu jo pidemmän aikaa. Polttokennoajoneuvoissa on potentiaalia, jos ratkaistaan kolme asiaa, jotka ovat

- vedyn käsittelyn turvallisuus
- riittävä jakeluverkosto
- uusiutuva energiantuotanto. [20]

Autoja ja muita liikkuvia laitteita ajatellen selkeästi kiinnostavin ja siksi myös laajasti tutkimustyön alla oleva kennotyyppi on PEM. Sen toimintalämpötila on alle 100°C, ja tehotiheys on riittävä, jotta laitteesta ei tule liian kookasta tai painavaa. Parhaat kennot ovat jo sillä tasolla, että ne kykenevät reagoimaan tehontarpeen muutoksiin, eikä akuston kompensoinnille ole valtavaa tarvetta. On kuitenkin muita syitä, jotka hidastavat prosessia, joten akuston käyttö saattaa kuitenkin olla välttämätöntä.

Kun polttoaineyksikköön lisätään tarvittavat alajärjestelmät, saadaan kuvan 5.1 mukainen auton voimantuottoa kuvaava kaaviokuva. Kaaviokuvassa on nähtävillä kaikki tarvittavat elementit polttokennoauton toiminnalle. Systeemiin sisältyy vetyvarasto, polttokennojärjestelmä, tehoelektronikka, akusto tai superkondensaattori, muuntajat ja sähkölaitteet sekä valvontajärjestelmä. Tarvittavat järjestelmät esitellään paremmin seuraavassa luvussa



**Kuva 5.1.** Voimantuottoa ja -siirtoa kuvaava järjestelmä [6]

Polttokennomoottorien kehittämisessä yksi johtavia yhtiöitä on kanadalainen Ballard Power Systems, joka on erityisesti autokäyttöön soveltuvien PEM- kennojen tekniikan kehittämisen selkeä johtaja. Henkilöautojen osalta merkittäviä polttokennoteknologian osajia taas ovat esimerkiksi DaimlerChrysler, Ford, Opel, Toyota, Honda ja GM. Kiinnostusta autovalmistajien puolelta polttokennoautoihin on riittänyt, mutta vielä ei täysimittainen panostaminen teknologiaan ole alkanut. Vuonna 2009 johtavat autovalmistajat Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Honda Motor Co., Ltd., Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, the Alliance Renault SA and Nissan Motor Corporation and Toyota Motor Corporation tekivät yhteisen aiesopimuksen siitä, kuinka polttokennoautoja tulevaisuudessa kehitetään ja saatetaan markkinoille. Ennakointiin, että vuodesta 2015 lähtien niiden määrä olisi huomattava, mikä ei varsinaisesti kuitenkaan ole tapahtunut. Tälle syytä on esitetty jo aiemmin tässä työssä, mutta käytännössä kilpailukykyä ei ole saatu riittävälle tasolle. [13] [18]

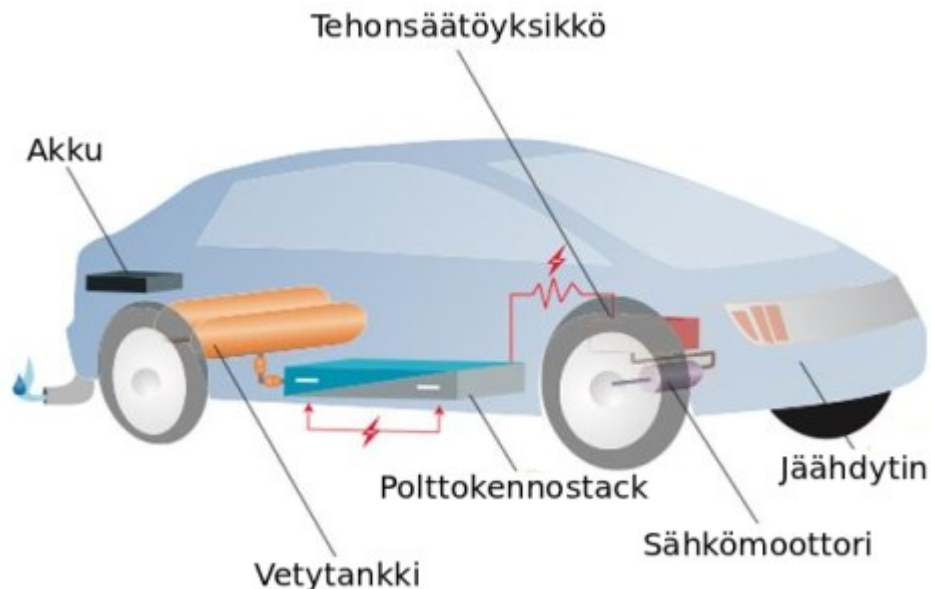
Polttokennosovellutuksia kehitetään myös autoissa sähköenergian tuottajiksi. Sähkön tarve autoissa kasvaa teknologian kehityksen myötä, kun koko ajan lisää mekaanishydraulisia apulaitekäyttöjä muutetaan sähkötoimisiksi (ohjaustehostus, jarrut). Lisäksi erilaisten viihde- ja viestintäelektronikan määrä lisääntyy. Näin ollen sähkön tuotto polttoaineen avulla alkaa olla kallis prosessi. Ratkaisua on haettu yhdistämällä latausgeneraattori ja starttimoottori yhdeksi toimilaitteeksi, ja nostamalla jännitetaso 42 volttiin. Toinen

ratkaisumalli on varustaa auto polttokennoyksiköllä (APU), joka huolehtii sähkön tuotannosta. Tällöin sähköä voidaan tuottaa jatkuvatoimisesti. [9] [13]

Polttokennoajoneuvoissa etuja on saavutettavissa käyttämällä sähkönvarastointiin soveltuvia laitteita. Sähköä voidaan varastoida esimerkiksi akkuihin tai kuten kuvassa 5.1 superkondensaattoreihin. Akut ja kondensaattorit toimivat ikään kuin varatehonlähteenä tilanteissa, joissa tehon kulutus on suuri, kuten kiihdytyksessä. [13]

## 4.2 Polttokennoauto

Polttokennoauto on kulkuneuvo, joka tuottaa energiaa kennojensa avulla lähtöaineesta, yleensä vedystä. Se on käytännössä sähköauto. Polttokennoauto eroaa perinteisiin sähköautoihin verrattuna siten, että sen tuottama energia syntyy polttokennoissa. Polttokennoautot ovat muuten rakenteeltaan vastaavanlaisia kuin polttomoottoriautot. Polttokennoautoa voidaan kuvata seuraavien kuvan 4.1 mukaisten pääjärjestelmien avulla.



**Kuva 4.1.** Polttokennoauton pääjärjestelmät [12]

Polttokennoajoneuvon, joka käyttää vetyä polttoaineekseen, pääkomponentit ovat vetytankit, polttokennostack, tehonsäätöyksikkö, akku ja sähkömoottori. Tankeissa oleva vety on varastoitu joko nesteinä tai kaasuna. Hydridit ovat yksi vaihtoehto myös, mutta niitä vielä harvemmin on. Nykypäivän malleista suurin osa varastoi vedyn kaasumaisessa muodossa. Kaasumainen olomuoto vaatii korkean paineen ja tällä hetkellä maksimiarvo on luokkaa 700 bar.

Ajoneuvon toiminta lähtee liikkeelle ajoneuvon vetytankista, josta vety kulkeutuu polttokennoon. Siellä se reagoi yhdessä ilmassa olevan hapen kanssa, jolloin saadaan tarvittava sähköenergia. Sähkö, joka tuotetaan kennoissa, johdetaan tehonsäätöyksikölle. Siitä

eteenpäin kyseinen yksikkö jakaa eri laitteille tarvitsemansa määrän sähköä. Suurin osa sähköstä kuluu auton sähkömoottoreissa, joilla tuotetaan liike-energiaa. [17]

Autokäyttöissä polttokennolla on oivat laajenemismahdollisuudet, ja sovellutuksia on jo markkinoilla. Polttomoottoriin nähden keskeisin etu polttokennolla on sen vähäiset ympäristöpäästöt mukaan lukien melu. Suorassa vetykäytössä ajon aikana ei synny muuta kuin vesihöyryä, mutta käytettäessä polttoainemuuntimia syntyy jonkun verran myös haitallisia kaasuja. Jotta autot saadaan kestävänn mallin mukaiseksi, pitää polttoaineen eli vedyn syntyä uusiutuvilla energianlähteillä, jolloin nykyiset reformerit jäisivät väliaikaisiksi.

Polttokennosovelluksia kehitetään myös vara- ja lisävoimanlähteeksi (APU) ajoneuvo-käyttöön. Tällöin kyseeseen tulevat etenkin PEM- mutta myös kiinteäoksidikennot. Polttokenno-APU tarjoaisi hyvän vaihtoehdon nykyisille vaihtovirtageneraattoreille, muun muassa hyötysuhteesta saataisiin parempi. [2]

### 4.3 Muut polttokennosovellukset

Polttokennot ovat kätevä voimantuoton lähde ja siksi sitä pyritään tuomaan vaihtoehdoksi erilaisiin voimankäytön tarpeisiin. Selkeästi tarvetta löytyy työkoneiden puolella, mutta sitä voisi soveltaa myös erilaisiin vara- ja lisävoimanlähteisiin. Kaivosteollisuudessa on hyödynnetty polttokennoteknologiaa jo jonkin verran. Autojen lisäksi polttokennoja on suunniteltu esimerkiksi suurempiin ajoneuvoihin, kuten busseihin. Polttokennoilla on laaja käytettävyyys tehontarpeen mukaan. Ne ovat modulaarisia, ja näin ollen niillä on hyvä muovattavuus, eli niitä voitaisiin käyttää erilaisissa ”älykkäissä” sovelluksissa. Polttokennosta kehitellään akun korvaajaa pieniin kannettaviin sovelluksiin, kuten viihde-elektroniikkaan. Yksi kohde polttokennon tehontuotannossa voisi olla myös talokohtainen pien- CHP. Polttokennoon perustuva CHP voisi tarjota uusia ratkaisuja haja-asutusten energian tuotantoon.

Erilaisten kannettavien sovellusten määrä on kasvanut rajusti viime vuosina. Kohteita on monia, mutta yhteistä näille on sähköenergian tarve ja sen jatkuva kasvu. Kuitenkin polttokennon käyttövarmuuden varmistaminen tuottaa haasteita monien aktiivisten osien vuoksi.

Katkoton virransyöttö on myös yksi sovelluskohde. Se on monissa laitteissa ja sähköverkossa erityisen tärkeä ominaisuus. Sähkön pitää usein olla saatavilla katkottomasti, jolloin on varmistettava katkoton sähköntuotanto ja tähän polttokennot voisivat toimia erityisen hyvin varavoimana. [2]

#### 4.4 Ajoneuvotyyppien vertailua

Seuraavassa on taulukoituna eri ajoneuvotyyppien ominaisuuksia ja suorituskykyä. Taulukon on tarkoitus tuoda esille polttokennon ominaisuuksia verrattuna muihin ajoneuvotyyppihin.

*Taulukko 4.1 Eri ajoneuvojärjestelmien vertailua [23]*

Vertailukohde	ICE (VW GOLF 1.4 TSI)	Hybrid (Toyota Prius III)	BEV (Nissan Leaf)	FCEV (Honda FCX Clarity)
Voimantuotto	Perinteinen moottori	Perinteinen ja sähkömoottori	Akku ja sähkömoottori	Polttokenno ja sähkömoottori
Polttoaine	Bensiini, Diesel ja vaihtoehtoiset polttoaineet	Bensiini/Diesel pääsääntöinen polttoaine	Sähkö	Vety
Maksiminopeus (kmh)	200	180	151	161
Kiihtyvyys (s)	9,5	10,4	7	10
käyttösäde (km)	888	1152	175	386
Hinta (\$)	29400	33400	41250	80000
Päästöt CO <sub>2</sub> (g/km)	144	89	0	0
Polttoaineen paino (kg)	40,8	33,3	171	4,1
Kapasiteetti (kWh)	500	409	24	137
Varastointisysteemin paino (kg)	48	40	300	93
Teho (kW)	90	100	80	100

Huomataan, että löytyy sekä eroja että samankaltaisuuksia. Eroja eri järjestelmien välillä on esimerkiksi käytösäteessä, päästöissä, polttoaineen painossa ja voiman tuotossa. Saman kaltaisuutta löytyy taas tehon tuotosta ja kiihtyvyydessä. Pääsääntöisesti kuitenkin eroja saadaan eri järjestelmien välillä. Korostettakoon erityisesti polttokenno- ja sähköauton päästöttömyyttä, sillä varauksella, että sähköntuotanto ei välttämättä ole päästötöntä. Termeistä ICE tarkoittaa perinteistä polttomoottoria, Hybridi yhdistelmätuotannon ajoneuvoa, BEV tarkoittaa patteristolla varustettua sähköautoa ja FCEV polttokennolla varustettua sähköautoa. [23]

## 5. YHTEENVETO

Polttokennoja on rakenteeltaan erilaisia, riippuen niiden ominaisuuksista ja operointitavoista. Yleisin ajoneuvosovelluksissa käytetty kenno on PEM- kenno, koska sen käyttölämpötilat ovat alhaisia. Tässä työssä keskityttiin tarkastelemaan nimenomaan PEM-kennojen toimintaa ja niiden käyttöä ajoneuvosovelluksessa. Erityispiirre PEM-kennolle on sen rakenteen yksinkertaisuus. Se koostuu anodista, katodista, elektrolyytistä ja bipolaa-rilevyistä. Lisäksi systeemiin kuuluu usein oheislaitteet eli muun muassa ohjaukseen tarvittava tehoelektronikka. Polttokennon reaktiot tapahtuvat pääkomponenteissa eli anodissa ja katodissa elektrolyytin avulla.

PEM-kennolle voidaan määrittää laskennallisesti tarvittavia suureita, kuten avoimen piirin jännite ja hyötysuhde. Näiden avulla voidaan määrittää oikean kokoluokan järjestelmä haluttuun sovellukseen. Kennotyyppi vaikuttaa siihen, millaisia ominaisuuksia kennolla on, esimerkiksi missä lämpötilassa kenno toimii. Kennon mallintamisessa on tehtävä paljon laskutoimituksia, esimerkiksi kennon kosteustasapainoa on seurattava jatkuvasti. Myös operointiolosuhteilla on merkitystä, esimerkiksi paineella on suuri merkitys kennon toiminnalle.

Yleisesti voidaan todeta, että polttokennoilla etuja tuotannossa ovat järjestelmän korkea hyötysuhde, yksinkertainen rakenne, pienet emissiot ja hiljainen käyttö. Toistaiseksi kaupallisuuden esteenä nähdään olevan hinta, kehittymätön teknologia, vedyn infrastruktuuri ja käyttöikä.

Vedyn valmistus, varastointi ja infrastruktuuri ovat oleellinen osa puhuttaessa polttokennoista ajoneuvosovelluksessa. Vety ei ole energialähde vaan se on energian kantaja. Tämä tarkoittaa, että se pitää jalostaa polttoaineeksi joistakin lähtöaineista. Valmistuslähteitä on useita, kuten maakaasu ja veden elektrolyysi. Varastointia voidaan tehdä käytännössä kolmella järkevällä tapaa, varastointi kaasuna tai nesteinä ja sitominen metallihydrideihin. Tarkastelussa oli myös vaihtoehtoiset liikennepolttoaineet. Liikenteeseen voidaan tuottaa polttoainetta monella tapaa. Eräs metodi on ottaa talteen jätteistä vapautuvaa bio-kaasua ja tuottaa siitä esimerkiksi vetyä.

Ajoneuvot polttokennosovelluksena on kiinnostava ja kehittyvä teknologian ala. Sen tekniikka perustuu hyvin pitkälti sähköajoneuvoon. Polttokennoajoneuvon, joka käyttää vetyä polttoaineekseen, pääkomponentit ovat vetytankit, polttokennostack, tehonsäätöyksikkö, akku ja sähkömoottori. Ajoneuvoissa polttokennoa voidaan käyttää muuhunkin kuin vain voiman tuottoon. Sähkön käyttö ajoneuvoissa on lisääntymään päin ja näin ollen polttokennoilla voitaisiin tuottaa lisävirtaa laitteisiin. Polttokennoajoneuvoissa on potentiaalia, jos kolme asiaa ratkaistaan: vedyn käsittelyn turvallisuus, riittävä jakeluverkosto ja uusiutuva energiatuotanto.



## 6. POHDINTA

Polttokennon toimintaperiaate ja mallinnus ovat nykyään hyvin tunnettuja. Tutkimus on ollut suhteellisen vähäistä vuosien saatossa, mutta on viime vuosina ollut lisääntymään päin. PEM- kennon toiminta tunnetaan hyvin, eikä sen rakenteeseen näin ollen ole tulossa muutoksia. Aina tietysti on mahdollista, että onnistutaan kehittämään täysin uusi ja kilpailukykyinen polttokenno. Tutkimusta riittää, esimerkiksi suorametanoliksenno voisi tulevaisuudessa olla käytettävyydeltään potentiaalinen vaihtoehto. Harva lopulta tietää tai ymmärtää polttokennon toimintaa tai ylipäätään käsittää sen mahdollisuudet polttomoottorin korvaajana.

Tulevaisuudessa polttokennolla voisi korvata polttomoottorit hyvällä hyötysuhteella, kunhan tietyt haasteet ja ongelmat saadaan ratkaistua. Valoa tämän suhteen on jo nähtävissä. Esimerkiksi Toyota on onnistunut tuottamaan vuoden 2017 malliinsa uuden tehotehdydeltään varsin kehittyneen moottorin (3,1 kW/L). Tämä tehotehdyys tilavuutta kohden on 2.2 kertaa suurempi kuin vastaavan vuoden 2008 mallin. Tästä huomataan, että kehitystä todella tapahtuu. Lisäksi moottorin tehoa ollaan saatu nostettua varsin paljon 90 kilowatista 114 kilowattiin. Mutta mikä tärkeintä, moottorin koko on pienentynyt huomattavasti. Kennoteknologiaa Toyota on onnistunut kehittämään myös. Elektrolyyttiä on onnistuttu muokkaamaan niin, että virrantiheyttä on saatu kasvatettua 2.4 kertaiseksi edelliseen malliin. Yksi mahdollistaja näiden muutosten taustalla on innovaatio koskien jännitettä nostavaa katkojaa (tehoelektronikan komponentti), jonka kehityksen johdosta muut kehityskohteet ovat mahdollistuneet. [21]

Jotta polttokennot voisivat lisääntyä, olisi niistä tehtävä houkuttelevampi vaihtoehto kuluttajalle. Lisäksi ajoneuvoissa turvallisuus on saatava riittävän hyväksi ja muutenkin tehdä vedyn käsittely helpoksi. Kuluttajien tietoisuutta polttokennoista ja näkyvyyttä olisi syytä lisätä. Tällä hetkellä houkuttelevuutta lisää mahdollisuus uusiutuvan energian käyttöön, mutta rajoitteita on edelleen liikaa, kuten infrastruktuurin puuttuminen. Sisällytin tähän työhön käynnin Woikoski-yhtiössä, jossa pääsin tutustumaan heidän vetyteknologiaansa ja -tuotantoonsa. Käynti yrityksessä vahvisti mielikuvaa siitä, että järkevä kehittyminen vetymarkkinoilla vaatisi infrastruktuurin ja tankkausasemien kehittymistä. Tällä hetkellä vedyn käsittely on iso ja suhteellisen vaativa prosessi, jolloin hyöty katoaa käytettävyyden ongelmiin. Vetyä syntyy kemianteollisuudessa suhteellisen paljon sivutuotteena ja tätäkin voisi hyödyntää tankkausasemien muodossa tehokkaammin. Itse ajoneuvon polttokennoteknologia on ottanut viimeisen vuosikymmenen aikana harppauksia. Tankkausasemien perustaminen on kallista, mutta keskitetty tuotanto ja asemien perustaminen tietyille alueille mahdollistaisi esimerkiksi vetybussien käytön. Käyttövarmuus on jo sillä tasolla, että käyttöönotto olisi mahdollista. Tulevat vuodet näyttävät mihin suuntaa tämä teknologia lähtee kehittymään.

## LÄHTEET

- [1] VTT:n esittely polttokennoista ja vedystä. VTT, 2015, [WWW]. <http://www.vtt.fi/palvelut/liiketoiminnan-kehitt%C3%A4minen/pilot-laitokset-ja-t-k-infrastruktuuri/kone-ja-kuljetusv%C3%A4lineiden-tutkimusymp%C3%A4rist%C3%B6t/polttokenno-ja-vetyteknologioiden-kehitys> [Viitattu 10.11.2017]
- [2] Tekninen tiedotus, J. Laurikko, Polttokennoteknologia ja sen tarjoamat liiketoimintamahdollisuudet, Tampereen teknillinen yliopisto, 2002
- [3] Luentomoniste, R. Mikkonen, Polttokennot ja vetyteknologia, Tampereen teknillinen yliopisto, 2006
- [4] J. Larminie, A. Dicks, Fuel cell systems explained, Wiley, British Library Cataloguing in Publication Data, 2003
- [5] Tekninen tiedotus, J. Laurikko, Polttokennoteknologia ja sen tarjoamat liiketoimintamahdollisuudet, s. 12-13, Tampereen teknillinen yliopisto, 2002
- [6] Kuva voimantuottojärjestelmästä, tietoa energiatasapainon optimoinnista sähköautossa. M. Bugár, 2010, [WWW]. <http://www.posterus.sk/?p=8570>
- [7] Työ aiheesta voimalaitosmittakaavan polttokennojärjestelmien teknis-taloudellinen vertailu, Prizztech Oy, 2010. Saatavilla: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki3ID1440.pdf> [Viitattu 14.3.2018]
- [8] Tekninen tiedotus, J. Laurikko, Polttokennoteknologia ja sen tarjoamat liiketoimintamahdollisuudet, s. 19-22, Tampereen teknillinen yliopisto, 2002
- [9] Kuva paineistetusta SOFC-kennojärjestelmästä. 2009, [WWW]. <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1427066> [Viitattu 24.11.2017]
- [10] Polttokennojen mahdollisuudet ja rajoitteet jätteistä tuotetun biokaasun hyödyntämisessä sähköksi ja lämmöksi, LUT, 2016. Saatavilla: [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134740/kandidaatintyo\\_osterman\\_hanna.pdf.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134740/kandidaatintyo_osterman_hanna.pdf.pdf?sequence=2) [Viitattu 24.11.2017]
- [11] Ajoneuvokäytön polttokennoteholähteen hybridisointi, TTY, 2009. Saatavilla: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/6814/karimaki.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Viitattu 24.11.2017]

- [12] Polttokennoajoneuvojen tarvitseman vedyn jakelu ja tankkaus, TTY, 2012. Saatavilla: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21127/nis-sila.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Viitattu 24.11.2017]
- [13] Corbo, P., Migliardini, F., Veneri O. Hydrogen fuel cells for road vehicles. Lontoo, 2011. Springer-Verlag Lontoo. 245 p.
- [14] Barbir, F. 2005, PEM Fuel Cells, Academic Press. 456 p
- [15] FuelCellToday.. Technologies, PEMFC, [WWW]. Saatavissa: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/technologies/pemfc>. [Viitattu 22.11.2017]
- [16] California Fuel Cell Partnership. Driving for the future, how it works [WWW]. Saatavissa: [www.fuelcellpartnership.org](http://www.fuelcellpartnership.org). [viitattu 22.11.2017]
- [17] Letter of understanding on the Development and Market Introduction of Fuel Cell Vehicles [WWW]. Saatavissa: [http://www.cleancaroptions.com/Auto\\_OEM\\_letter\\_on\\_FCEVs.pdf](http://www.cleancaroptions.com/Auto_OEM_letter_on_FCEVs.pdf). [viitattu 22.11.2017]
- [18] Green Car Congress [WWW]. Saatavissa: <http://www.greencarcongress.com/2009/09/automakers-fcv-20090909.html>. [viitattu 22.11.2017]
- [19] Polttokennoajoneuvoista yleistä tietoa, [WWW]. Saatavissa: <https://spectrum.ieee.org/green-tech/fuel-cells/why-the-automotive-future-will-be-dominated-by-fuel-cells>
- [20] Hoffmann, P. (2001). Tomorrow's Energy: hydrogen, fuel cells and the prospects for a cleaner planet. MIT Press.
- [21] Toyota Mirai FCV poster, 2017, [WWW]. Saatavissa: [www.toyota-europe.com](http://www.toyota-europe.com)
- [22] Pohdintaosuudessa käytetty Woikosken omia Powerpoint-esityksiä koskien vetytaloutta ja –autoilua. Saatavilla Woikoski-yritykseltä: Ballard FCGen H2 – Princip and function – TGU, Vety liikennepolttoaineena, Woikoski\_Arctictest\_english\_20160210\_Jussi Rissanen
- [23] Ajoneuvotyyppeiden vertailua, [WWW]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468612005671> [viitattu 12.2.2018]
- [24] Tietoa polttokennon hinnoista [WWW]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530100965X> [14.3.2018]