

Seppo Heikkilä

Kaupallinen elektrolyysikenno autossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Auto- ja kuljetustekniikka
Tuotetekniikka
Insinöörityö
5.5.2013

Tekijä Otsikko	Seppo Heikkilä Kaupallinen elektrolyysikenno autossa
Sivumäärä Aika	24 sivua + 2 liitettä 5.5.2013
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Projekti-insinööri Harri Miinin
<p>Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kaupallisen elektrolyysikennon toimivuus ja hyöty henkilöautossa. Kyseessä oli ranskalaisen Flexfuel-companyn tuote, jonka avulla luvattiin 8–35 % polttoaineensäästö. Suomalainen maahantuoja halusi varmistaa laitteen toimivuuden ennen myynnin aloitusta.</p> <p>Laitteella tehdään vetykaasua elektrolyysin avulla ja palamisherkkä vety syötetään auton moottorin imuilman joukkoon. Tarkoituksena on korvata vedyllä osa käytettävästä polttoaineesta. Laitteen tarvitsema sähköenergia tuotetaan auton generaattorin avulla.</p> <p>Lisäksi työssä tarkastellaan vedyn ominaisuuksia ja valmistusmenetelmiä, elektrolyysiä, polttokennoja sekä pohditaan vetyautojen tulevaisuutta.</p> <p>Elektrolyysikennon todellinen hyöty selvitettiin laskennallisesti ja käytännön mittauksilla. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että tällä elektrolyysikennolla ei saavuteta valmistajan lupaamaa polttoainesäästöä. Laite ainoastaan lisäsi polttoaineenkulutusta, joten se on täysin turha.</p>	
Avainsanat	Elektrolyysi, vety, polttokenno, vetyauto

Author(s) Title	Seppo Heikkilä Commercial Electrolytic Cell in Car
Number of Pages Date	24 pages + 2 appendices 5 May 2013
Degree	Bachelor's Degree
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design
Instructor(s)	Harri Miinin, Project Engineer
<p>The main purpose of this research was to find out the benefits of using an electrolytic cell in a passenger car. This commercial product was developed by Flexfuel-company, which promised 8-35% fuel savings. The Finnish importer wanted to make sure the product worked as promised before starting to sell.</p> <p>The product makes hydrogen gas by electrolysis. The main aim is to replace a part of engine fuel with hydrogen gas. Electrolysis requires electrical energy which is produced by the car generator.</p> <p>The second purpose of the research was to review the features of hydrogen and the manufacturing methods of both electrolysis and fuel cells. Futhermore, the study considers the future of hydrogen cars.</p> <p>The real benefit of the electrolytic cell was explored computationally and by measurements. The results indicate that the electrolytic cell is useless because it does not achieve the fuel savings. In the present study it only increased fuel consumption and was therefore found completely useless.</p>	
Keywords	Electrolytic, hydrogen, fuel cell, hydrogen car

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Laitteiston esittely	1
1.2	Tausta	2
1.3	Tavoitteet	3
2	Vety polttoaineena	3
2.1	Vedystä yleisesti	3
2.2	Vety polttomoottorissa	4
3	Vedyn tuottaminen	5
3.1	Yleistä	5
3.2	Kemialliset menetelmät	6
3.3	Termokemialliset syklit	7
3.4	Sähkökemialliset menetelmät	7
4	Elektrolyysi	8
4.1	Yleistä	8
4.2	Elektrolyysin perussäännöt	8
4.3	Sähkökemialliset jännitesarjat	10
4.4	Höryelektrolyysi	11
4.5	Polttokenno	11
5	Energia- ja tuottolaskenta	13
5.1	Laskuesimerkki	14
6	Elektrolyysikennon asentaminen autoon	14
6.1	PWM-säädin	15
6.2	Asennus	16
6.3	Säätö	19
7	Mittaukset ja tulokset	21
8	Johtopäätökset	21
	Lähteet	23

Liitteet

Liite 1. Dynamometrimittauksissa käytetty ajosykli

Liite 2. Testitulokset

1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on vähentää auton polttoaineenkulutusta vetyä tuottavan elektrolyysikennon avulla. Vetykaasulla korvataan osa ottomoottorin käyttämästä polttoaineesta ja hyöty mitataan käytännön mittauksilla.

1.1 Laitteiston esittely

Asennettava laitteisto on elektrolyysikemmo, jonka avulla voidaan helposti erottaa vetykaasua vedestä (kuva 1). Elektrolyysikemmo on rakenteeltaan kuin vesisäiliö, johon johdetaan sähkövirtaa elektrodien avulla. Kemiallisten happettumis- ja pelkistymisreaktioiden avulla vedestä voidaan erottaa vetyä ja happea. Syntyvä vetykaasu ohjataan kennosta auton moottorin imusarjaan, ja se palaa moottorin sylintereissä bensiinin sekä hapen kanssa. Tarkoituksena on tehostaa palotapahtumaa ja parantaa hyötysuhdetta. Laitteiston tarvitsema sähkövirta otetaan auton generaattorista, ja vesisäiliöön laitetaan akkuvettä (tislattu vesi) elektrolyytiksi. Laitteiston teho säädetään autokohtaisesti OBD2-diagnosointilaitteella ja yleismittarilla.



Kuva 1. Laitteiston asennussarja [1]

Asennettava laitteisto on Ranskassa kehitetty kaupallinen tuote. Laitteiston mukana tulee selkeät asennusohjeet sekä kaikki asennukseen tarvittavat osat.

1.2 Tausta

Työ alkoi vuoden 2011 keväällä, kun vety muutossarjaa maahantuova Flexfuel-company halusi testauttaa laitteen toimivuuden Metropolia Ammattikorkeakoulun autolaboratoriossa. Ranskassa kehitetty laite lupaa kuluttajalle jopa 8–35 prosenttiyksikön polttoainesäästön ajoneuvosta riippuen sekä pienempiä pakokaasupäästöjä. Laite voidaan asentaa diesel- tai bensiinikäyttöisiin ajoneuvoihin. Lisäksi valmistaja toimittaa muutossarjoja jotka ovat suunniteltu suuremmille moottoreille, kuten työkoneisiin, laivoihin ja generaattoreihin [2].

Amerikassa on ollut useita vuosia myynnissä vastaavia kennoja joilla luvataan huimia säästöjä, mutta yksikään laite ei ole menestynyt virallisissa testeissä. Valmistajan mukaan tämän laitteen tarkka säätäminen on uusi oivallus ja tekee laitteesta huomattavasti energiatehokkaamman muiden valmistajien laitteisiin nähden. Ajoneuvon vaatimuksena on OBD2-pistoke, sillä säätö tapahtuu moottorinohjauksen tietojen avulla.

1.3 Tavoitteet

Työn tärkeimpänä tavoitteena on tutkia kokeellisesti elektrolyysikennon hyödyt ajoneuvossa: toteutuvatko valmistajan lupaamat säästöt polttoaineenkulutuksessa? Laite asennetaan nykyaikaiseen bensiinikäyttöiseen ajoneuvoon ja mittaustulokset tehdään ajamalla jarrudynamometrissä samaa ajosykliä erilaisilla vetysarjan asetuksilla.

Toisena tavoitteena on tarkastella vetyteknologian nykytilannetta. Työssä selvitetään vedyn valmistustavat, kuljetus ja säilöminen. Lisäksi selvitetään polttokennon toiminta ja sen mahdollisuudet ajoneuvokäytössä.

Työ suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa ja laitteisto asennettiin laboratorion opetusautoon Suzuki SX4:een.

2 Vety polttoaineena

2.1 Vedystä yleisesti

Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine (75 % massasta) ja maankuoren kolmanneksi yleisin hapen ja piin jälkeen. Vety on kevein tunnettu alkuaine ja sitä esiintyy ainoastaan yhdisteiden osana, ei vapaana vetynä. Suurin osa maankuoren vedystä on vedessä, jonka massasta noin 11 prosenttia on vetyä. [3, s. 2–3.]

Vety muodostaa hyvin puhtaasti ja herkästi palavan yhdisteen ilman hapen kanssa. Palamistuotteena syntyy ainoastaan puhdasta vettä. Vedyn energiasisältö on 120 MJ/kg, kun bensiinin on noin 43MJ/kg, mutta tiheys on vedyllä kaasumaisen

olomuodon takia vain 90 g/m^3 . Vedyn sulamispiste normaalissa ilmanpaineessa on $-259,4$ ja kiehumispiste $-252,9$ astetta Celsiuksen asteikolla. Vety sopii hyvin polttoaineeksi, mutta sen varastointi on paljon vaikeampaa kuin nestemäisten polttoaineiden. Vety on normaalilämpötilassa aina kaasumaisessa olomuodossa ja sen nesteyttäminen vaatii paljon energiaa. Vetyä voidaan kuljettaa ja varastoida painesäiliöissä, mutta haittapuolena on painesäiliöiden suuri massa verrattuna vedyn massaan. Pahimmillaan säiliöiden massasta vain 11 prosenttia on itse vetyä. [3, s. 3–4.] Vety molekyyli H_2 on kooltaan hyvin pieni, joten se läpäisee helposti muovin tai jopa terässäiliön. Tästä syystä vedyn pitkäaikainen säilöminen on hyvin hankalaa.

2.2 Vety polttomoottorissa

Vedyn käyttöä polttomoottorissa on puhuttu jo pitkään. Sillä on paljon etuja, kuten suuri energiasisältö, puhdas ja nopea palaminen, korkea oktaaniluku ja mahdollisuus käyttää polttomoottoreissa sekä polttokennoissa. Fossiilisten polttoaineiden ehtyvyys ja CO_2 -päästörajojen tiukkeneminen tekevät vedystä mielenkiintoisen vaihtoehdon henkilöautojen polttoaineeksi.

Vety sopii polttoaineeksi nykyisiin polttomoottoreihin lähes suoraan tai pienin muutoksin. Tehoa saadaan yhtä paljon kuin tavallisista polttomoottoreista, mutta paremmalla hyötysuhteella laihemman seoksen ja vedyn paremman energiatiheyden ansiosta. Vedyn laaja palamisalue tekee siitä polttomoottoreihin helpommin soveltuvan polttoaineen muihin polttoaineisiin verrattuna. Vety leimahtaa pienestä kipinästä kun sitä on ilmassa 4–75 tilavuusprosenttia. Vastaava luku bensiinillä on 1,3–9,1 tilavuusprosenttia (taulukko 1). Vedyn suuri oktaaniluku 106 mahdollistaa bensiiniä suuremman puristussuhteen ja aikaisemman sytytysennakon, joilla saadaan kasvatettua moottorin vääntömomenttia sekä polttoainetaloutta. Toisaalta vety palaa bensiiniä huomattavasti nopeammin, joten sytytysennakkoa olisi sen perusteella säädettävä myöhäisemmälle. Kaikki tietenkin riippuu käytettävästä polttoainehappiseoksesta, sillä vety-happiseoksessa polttoaineen määrä voi vaihdella huomattavasti seoksen vielä palaessa hyvin. Vetymoottorin stoikiometrinen seos vaatii huomattavasti enemmän polttoainetta verrattuna bensiinimoottoriin. Nykyaikainen moottorinohjaus pystyy laskemaan oikean ennakon ja seoksen mm. lambda-anturien, kaasuläpän asento- ja nakutustunnistimien avulla.

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisuuksia [4, s. 78–84]

	Oktaaniluku	Leimahdusraja (til.%)		Itsesyttymislämpötila (°C)	Stoikiometrinen seos (til.% polttoainetta ilmassa)	Lämpöarvo (Mj/Kg)
		Ylempi	Alempi			
Vety	106	4	75	585	29,6	119
Bensiini	95/98	1,3	9,1	440	1,3	43,5
Diesel	-	-	-	225	1,3	43

Vetykäytön suuri etu on alhaisemmat päästöt verrattaessa muihin polttoaineisiin. Polttokennokäytöllä vedystä jää palamistuotteeksi vain vettä. Ottomoottorin vetykäytöllä palamistuotteena syntyy veden lisäksi NO_x-päästöjä johtuen vedyn korkeasta palolämpötilasta. NO_x-päästöjä voidaan alentaa käyttämällä laihempaa polttoaineseosta sekä kehittämällä vielä kehitteillä olevaa katalyyttistä pakokaasun puhdistusta. [5, s. 557.]

Vetykäytön päästöistä puhuttaessa on syytä huomioida kokonaispäästöt (vedyn valmistuksesta pyörälle). Mikäli vety tuotetaan käyttämällä fossiilisia polttoaineita, sen käyttäminen polttomoottorissa ei laske esimerkiksi hiilidioksidipäästöjä ollenkaan ja vedyn käytön hyöty menetetään. Jos vety tuotetaan elektrolyysin avulla, tulisi aurinkokennoilla ja ydinvoimalla tuotettua sähköä olla riittävästi tarjolla.

3 Vedyn tuottaminen

Tässä luvussa käsitellään nykyään käytössä olevat vedyn tuotantotavat.

3.1 Yleistä

Vedyn tuottaminen on koko vetytalouden keskeisin haaste. Energian kannalta perusongelma on siinä, ettei vetyä ole vapaana. Se ei ole pumpattavissa tai louhittavissa samaan tapaan kuin öljy tai hiili. Jotta vetyä voitaisiin käyttää polttoaineena, se täytyy ensin valmistaa esimerkiksi hajottamalla vesi sähkövirralla vedyksi. Vedyn puhtausetu menetetään, jos prosessiin tarvittava sähkö tuotetaan

öljyllä tai hiilellä. Energiaperiaatteen mukaan vedystä saadaan energiaa enintään sen verran kuin sen hajottamiseen vedestä menee. Tuntuu siis uskomattomalta, että ajoneuvossa elektrolyysin avulla tuotetulla vedyllä saataisiin aikaan polttoainesäätöä. Vedyn valmistaminen uusiutuvien luonnonvarojen avulla olisi paljon mielekkäämpää, mutta tämänhetkinen korkea hinta tekee siitä kannattamattoman. Uudet neljännen sukupolven ydinvoimalat ovat potentiaalisia energianlähteitä vedyn tuottamiseen. Ydinvoimalla tuotetun sähkön lisäksi vedyn valmistamiseen voitaisiin käyttää voimalan korkeaa, yli 900 asteen prosessilämpöä, joka mahdollistaisi vedyn kemiallisen valmistamisen. [6, s. 4–5.]

Tällä hetkellä ei ole olemassa laajamittausta, kustannustehokasta ja ympäristöystävällistä menetelmää vedyn valmistamiseen. Se on vetytalouden keskeisin haaste ja jarru vedynkäytön yleistymiselle. Nykyään on mahdollista valmistaa vetyä usealla eri menetelmällä:

- kemialliset menetelmät (reformointi)
- termokemialliset syklit
- elektrolyysi
- biokemialliset menetelmät
- fotolyysi
- radiolyysi

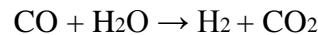
Näistä yleisimmät ja tärkeimmät valmistusmenetelmät esitellään seuraavaksi:

3.2 Kemialliset menetelmät

Maailmalla eniten käytetyt vedyn valmistuskeinot ovat erilaiset kemialliset menetelmät, jossa vety tuotetaan vedestä fossiilisten polttoaineiden avulla. Kustannustehokkain ja yleisin keino tällä hetkellä on metaanin höyryreformointi, joka suoritetaan reaktioastiassa 500–750 °C:n lämpötilassa ja 5–25 baarin paineessa.[7, s. 5.] Metaani reformoituu seuraavasti:



Reaktiosta syntyvä hiilimonoksidi pelkistyy edelleen vedyksi:



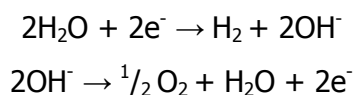
Prosessi on endoterminen, eli se vaatii ulkoista lämpöenergiaa reaktion läpiviemiseen. Tässä reaktiossa se otetaan metaanista. Reaktion jälkeen vety täytyy puhdistaa, ja puhdistusaste riippuu käyttökohteesta. Ihanteellisissa olosuhteissa prosessin hyötysuhde voi nousta 75–80 %:iin. Myös muita reformointitapoja on käytössä, mutta ne eivät ole yhtä yleisiä.[7, s. 6.]

3.3 Termokemialliset syklit

Vetyä on mahdollista valmistaa termokemiallisin menetelmin, mutta kehitystarvetta on vielä runsaasti. Lupaavimmat termokemialliset syklit aikaansaadaan kalsium-bromi- ja jodi-rikkisykleillä. Prosessissa vesi sidotaan esimerkiksi jodi-rikkiyhdisteisiin, joista vety saadaan erotettua korkeassa 800–1000 °C:en lämpötilassa. Tarvittava lämpö on mahdollista ottaa esimerkiksi ydinvoimaloista. Syklissä rikki ja jodi kiertävät koko ajan, mutta eivät kulu. Sykliin syötetään vettä ja lämpöä ja siitä saadaan vetyä ja happea. Prosessin lämpötila vaikuttaa suoraan hyötysuhteeseen. Mitä suurempi lämpötila, sitä parempi tuotto. Koko menetelmän hyötysuhteen ylärajaksi on arvioitu n.48 % johtuen korkeasta lämpötilasta, paineesta ja erilaisista materiaaleista. [6, s. 7–8.]

3.4 Sähkökemialliset menetelmät

Elektrolyysi on ehkä kaikista tunnetuin ja yksinkertaisin tapa valmistaa vetyä. Valmistukseen tarvitaan ainoastaan vettä ja sähköä. Prosessissa veteen johdetaan elektrodien kautta sähkövirtaa jolloin vesimolekyylinen vety pelkistyy katodilla ja vesimolekyylinen happi hapettuu anodilla. Reaktioyhtälö on seuraavanlainen:



Elektrolyysin hyötysuhde vaihtelee 40–80 %:n välillä, joten se on höyryreformointia kannattamattomampi tapa valmistaa vetyä. Hyötysuhdetta on mahdollista parantaa

nostamalla prosessin lämpötilaa ja painetta. hyötysuhde nousee, sillä korkeammassa lämpötilassa voidaan suurempi osa elektrolyysin vaatimasta energiasta tyydyttää lämpöenergialla.

Elektrolyysillä valmistetaan noin 5 % maailmassa tuotetusta vedystä. Menetelmän etuna ovat erittäin puhdas vety sekä yksinkertainen valmistus. Elektrolyysiä käytetään silloin kun vedyntarve vuorokaudessa on niin pieni, että sen tuottaminen höyryreformoinnilla tai kuljettaminen kauempaa on liian kallista. [6; 7]

4 Elektrolyysi

Tässä luvussa tarkastellaan elektrolyysin kemiallista prosessia. Lisäksi selvitetään elektrolyysiin liittyvät lait sekä keskeisimmät laskentakaavat. Lopuksi tarkastellaan polttokennojen toiminta ja niiden tulevaisuus.

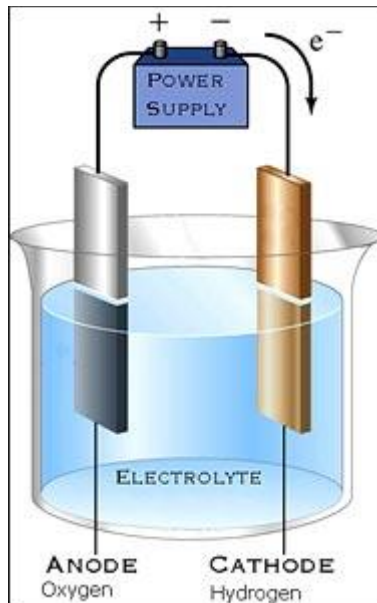
4.1 Yleistä

Tässä työssä käytettävä ”vetygeneraattori” perustuu vety-happikaasun erottamiseen elektrolyysin avulla. Se on yksinkertainen ja nopea tapa valmistaa pieniä määriä puhdasta vetyä, joten se soveltuu hyvin käytettäväksi tämän työn tarkoitukseen. Elektrolyysin keksijänä pidetään Michael Faradayta (1791–1867) joka tutki ilmiötä hyvin laajasti ja loi keskeisimmät sitä koskevat lait vuonna 1833. Faraday sai kiinnostuksen elektrolyysiin ollessaan Humphrey Davyn (1778–1829) oppipoikana, joka oli ensimmäisenä saanut hajotettua veden elektrolyyttisesti vedyksi ja hapeksi. Faraday loi myös elektrolyysisanaston mikä on käytössä tänäkin päivänä. [8]

4.2 Elektrolyysin perussäännöt

Elektrolyysi on sähkövirran avulla pakotettu hapettumis-pelkistymisreaktio. Kenno sisältää kaksi elektrodia joiden pinnalla reaktiot tapahtuvat. Elektrodien välillä on liikkumiskykyisiä ioneja sisältävä elektrolyyttiliuos. Sähkövirran kulkusuunnaksi on yleisesti sovittu plus-navasta miinus-napaan, ja elektrodien kulkusuunta sen vastakkaiseksi. Kennon elektrodia, joilla tapahtuu pelkistymisreaktio, sanotaan katodiksi, ja elektrodia jolla tapahtuu hapettumisreaktio, sanotaan anodiksi (kuva 2).

Elektrolyytissä olevat plus-merkkiset ionit kulkeutuvat katodia kohden ja pelkistyvät sen pinnalla. Vastaavasti liuoksen negatiiviset ionit kulkeutuvat anodia kohden ja hapettuvat sen pinnalla.[9, s. 37–38.] Elektrolyysillä on mahdollista puhdistaa tai päällystää eri metalleja, mutta tässä työssä tarkoitus on erottaa vesimolekyylin vety vetykaasuksi.



Kuva 2. Elektrolyysin toiminta [10]

Faraday loi elektrolyysin perustana olevat lait:

Faradayn 1. laki: Elektrodilla saostuneen tai vapautuneen aineen ainemäärä on suoraan verrannollinen kennon läpi kulkeneeseen sähkömäärään.

Faradayn 2. laki: Kun useita eri aineita saostuu tai vapautuu elektrodilla saman sähkömäärän kulkiessa kennon läpi, saostuneiden tai vapautuneiden aineiden määrät ovat suoraan verrannollisia niiden ekvivalenttimassaan

Elektrolyysissä syntyvän tuotteen ainemäärään vaikuttaa siis se, kuinka paljon elektroneja siirtyy tapahtuman aikana. Elektronien siirtymiseen vaikuttaa kennossa käytetty virta ja aika. Yhden elektronimoolin kuljettama sähkömäärä saadaan kertomalla alkeisvaraus Avogadron vakiolla N_A [11; 12]:

$$1,60217 \times 10^{-19} \text{ As} \times 6,022137 \times 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \approx 96485 \frac{\text{As}}{\text{mol}} = \text{Faradayn vakio } F$$

Elektrolyysin sähkömäärä Q saadaan yhtälöstä:

$$Q = I \times t = n \times z \times F$$

I = elektrolyysissä käytetty virta (A)

t = aika (s)

n = hapettuvan tai pelkistyvän aineen ainemäärä (mol)

z = elektronien ainemäärä (mol) yhtä moolia kohti hapettuvaa tai pelkistävää ainetta

F = Faradayn vakio (96485 As/mol)

Yhtälön avulla on helppo laskea esimerkiksi elektrolyysireaktiosta saatavien aineiden määrät. [11; 12.]

4.3 Sähkökemialliset jännitesarjat

Elektrolyysissä, kuten muissakin aineiden hapettumis-pelkistymisreaktiossa eri aineet reagoivat eri tavalla. Elektrolyysissä keskeisin asia on valita oikeat metallit ja liuokset jotta toivottuun tulokseen päästäisiin. Aineiden herkkyttä/taipumusta reagoida kuvataan normaalipotentialeilla E^0 , ja monien pelkistymisreaktioiden normaalipotentialit löytyvät taulukoista. Mitä suurempi aineen pelkistymisreaktion E^0 -arvo on, sitä helpommin aine pelkistyy. Hapettumisreaktiot ovat käänteisiä pelkistymisreaktioita, joten niiden normaalipotentialit saadaan vaihtamalla etumerkkiä. [11, s. 154–157.]

Tässä työssä elektrolyysikennon tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman paljon vetyä mahdollisimman pienellä virralla. Käytettävän kennon materiaalien tulisi olla kestäviä, jotta laite kestäisi päivittäistä käyttöä pitkien ajomatkojen ajan. Kuluvia osia kennossa ovat sähköä johtavat elektrodit sekä elektrolyyttiliuos, joka laimenee prosessin aikana. Vedyntuotannossa elektrodien ei tarvitse osallistua prosessiin, joten passiiviset metallit, esimerkiksi grafiitti ja platina, ovat hyviä elektrodimateriaaleja. Passiiviset metallit eivät hapetu kennon anodilla kuten aktiiviset metallit, esimerkiksi rauta, kupari ja lyijy. Aktiiviset metallit osallistuvat elektrolyysireaktioon, ja niitä käytetään esimerkiksi

metallien pinnoittamisessa ja puhdistamisessa. Aktiivisesta metallista olevat elektrodit syöpyvät ja kuluvat loppuun ajan myötä.

Valmistajan toimittama kenno on rakenteeltaan hyvin suljettu, joten on hyvin vaikeaa sanoa mitä materiaalia on käytetty elektrodeina. Kennon ympärillä on tiivis muovikotelo, joka on hyvin tiiviisti liimattu kokoon, joten sitä ei lähdetty aukaisemaan. Elektrodeina on oletuksen mukaan rosterilevyt, sillä kennon päällä olevat navat ovat rosteria. Rosteri on aktiivinen metalli joten sen anodi hapettuu käytössä. Rosteri tunnetaan nimellä ruostumaton teräs, ja sen sisältämä kromi hidastaa teräksen korroosiota.

Elektrolyyttiliuoksena käytetään soodan (NaHCO_3) ja tislattun veden seosta. Laitteen asennusohjeen mukaan 50 g soodaa lisätään kahteen litraan vettä. Elektrolyytin tarkoitus liikuttaa ioneja ja soodan avulla saadaan kasvatettua veden sähkönjohtavuutta eli ionien kulkua. Soodan sijaan elektrolyytinä voidaan käyttää myös muita suoloja, happoja tai emäksiä.

4.4 Höryelektrolyysi

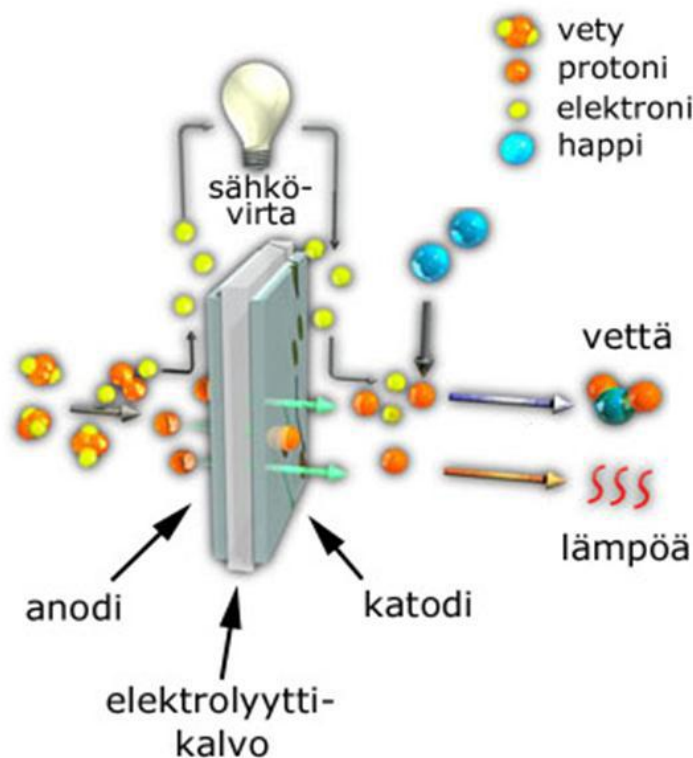
Vedyn valmistuksessa käytettävän elektrolyysin hyötysuhdetta voidaan parantaa nostamalla prosessin lämpötilaan ja painetta. Menetelmää kutsutaan höryelektrolyysiksi, ja siinä vesihöyry hajotetaan vedyksi ja hapeksi elektrolyyserissä, jossa on zirkonium- ja yttriumelektrolyytti. Tämä keraamiperusteinen elektrolyytti kestää korkeita lämpötiloja ja johtaa hyvin happi-ioneja. Prosessilämpö on noin 700–800 °C, ja hyötysuhde voi olla parhaimmillaan jopa 90 %. Menetelmä perustuu sähköä edullisemmin saatavaan lämpöön esimerkiksi ydinvoimaloiden yhteydessä. Korkea lämpötila tuo kennon valmistusmateriaaleille ja rakenteelliselle suunnittelulle omat haasteensa, joita ei ole kyetty vielä ratkaisemaan tyydyttävästi.[7, s. 6.]

4.5 Polttokenno

Parhaita vetyenergian tuottajia ovat voimakkaasti kehittyvät polttokennot. Polttokennojen etuna ovat hyvä hyötysuhde (polttoaineesta sähköksi), luotettavuus, pieni koko ja äänettömyys. Kun normaalisti fossiilisten polttoaineiden palaessa

syntyvää lämpöenergiaa muutetaan turbiinien ja generaattorien avulla sähköenergiaksi, parhaidenkin voimalaitosten hyötysuhde on vain noin 40 %. Auton bensiinimoottorin hyötysuhde jää usein alle tämänkin. Polttokennosta haetaan mullistavaa sähköenergian tuottajaa, ja suuret autonvalmistajat pitävät polttokennoja vakavasti otettavana polttomoottorin vaihtoehtona tulevaisuudessa.[5]

Polttokenno muuttaa polttoaineen sisältämän kemiallisen energian suoraan sähköksi (kuva 3). Käytettävä polttoaine ei kuitenkaan pala perinteisessä mielessä, joten polttokenno ei ole lämpövoimakone eikä sitä sido lämpövoimakoneiden hyötysuhderajoitukset. Polttokenno on kuin käännetty elektrolyysikemmo, ja polttoaineet, vety ja happi syötetään ulkoa. Polttoaine syötetään kennon anodille, jossa se ionisoituu eli muuttuu protoneiksi ja elektroneiksi. Protonit läpäisevät elektrolyyttikalvon ja kulkeutuvat katodille. Elektronit kulkevat katodille ulkoisen virtapiirin kautta jolloin syntyy sähkövirta. Katodilla protonit, elektronit ja katodille syötettävä happi reagoivat keskenään muodostaen vettä. Lisäksi reaktiossa vapautuu lämpöä.[3]



Kuva 3. Polttokennon toimintaperiaate [3]

Polttoaineena voidaan käyttää vetyä, metanolia ja rajoitetusti metaania (vaatii erittäin korkean lämpötilan). Vetyä käytettäessä reaktiotuotteena syntyy vain vettä; hiilivetykäytöllä syntyy lisäksi hiilidioksidia. Polttokennon haasteina ovat siihen käytettävien polttoaineiden jakeluverkostojen puuttuminen ja laitteistojen korkeat hinnat, jotka estävät polttokennoja syrjäyttämästä perinteisiä sähköntuotantotapoja. Aiemmin mainittu vedyn säilöminen ja kuljettaminen on iso haaste varsinkin suunniteltaessa polttokennoa henkilöautoihin. Paineistaminen 300 bar:n paineisena kaasuna tai -253 °C kylmänä nesteenä syö energiaa ja alentaa hyötysuhdetta. Tarkasteltaessa polttokennojen kokonaishyötysuhdetta (säiliöstä pyörään) se painuu noin 30 %:n tasolle, joka on nykyisten dieselautojen hyötysuhde.[5, s. 651.] Hyötysuhdetta alentavat vedyn haastava valmistaminen, kuljetus ja varastoiminen sekä polttokennoon tarvittavat lisälaitteet, kuten säätölaitteet ja jäähdytyspumput. Laitteesta uskotaan tulevan läpimurto varsinkin autoteollisuudessa, mikä johtuu USA:n ja Euroopan yhä tiukkenevista päästömääräyksistä.

5 Energia- ja tuottolaskenta

Työssä tarkasteltava laite tuottaa vetyä elektrolyysikennon avulla. Kennon tarvitsema virta tuotetaan auton laturilla. Laturi saa käyttövoimansa auton moottorilla, joka käyttää polttoaineenaan bensiiniä. Ennen minkäänlaisia mittauksia mahdollinen polttoaineen säästö tuntuu aika oudolta. Mikäli tarkastellaan hyötysuhteita, niin tilanne vaikuttaa vieläkin oudommalta. Bensiinimoottorilla, huonolla hyötysuhteella, tuotetaan virtaa laturin avulla ja sillä virralla tehdään vetyä elektrolyysikennossa huonolla hyötysuhteella. Jos ajatellaan, että bensiinin energia muutetaan moottorin pyörimisenergiaksi, hyötysuhde on esimerkiksi 30 % ja elektrolyysikennon hyötysuhde esimerkiksi 50 % niin kokonaishyötysuhde on $0,3 \times 0,5 = 0,15$ eli 15 %. Vaikka tuotettu vetykaasu parantaisikin palotapahtumaa ja parantaisi moottorin hyötysuhdetta, on vaikea uskoa että se nostaisi prosessin kokonaishyötysuhdetta yli polttomoottorin alkuperäisen hyötysuhteen. Valmistajan lupaama 8–35 % polttoaineensäästö kuulostaa aika etäiseltä

5.1 Laskuesimerkki

Vedyn tuottaminen sähköän avulla tarvitsee energiaa. Jos kennossa kulkee 10 ampeerin virta ja auton latausjännite on 14 voltia, saadaan tehonkulutukseksi 140 W. Energiaa kuluu siis 140 joulea (0,14 kJ) jokaisen reaktion sekunnin aikana.

Kyseisellä virran määrällä voidaan laskea elektrolyysissä katodilta vapautuvan vedyn ainemäärä yhden sekunnin aikana. Ainemäärä saadaan johdettua edellä mainitulla kaavalla:

$$n = \frac{I \times t}{z \times F} = \frac{10A \times 1s}{2 \times 96485 \text{ As/mol}} = 0,000051822 \dots \text{ mol}$$

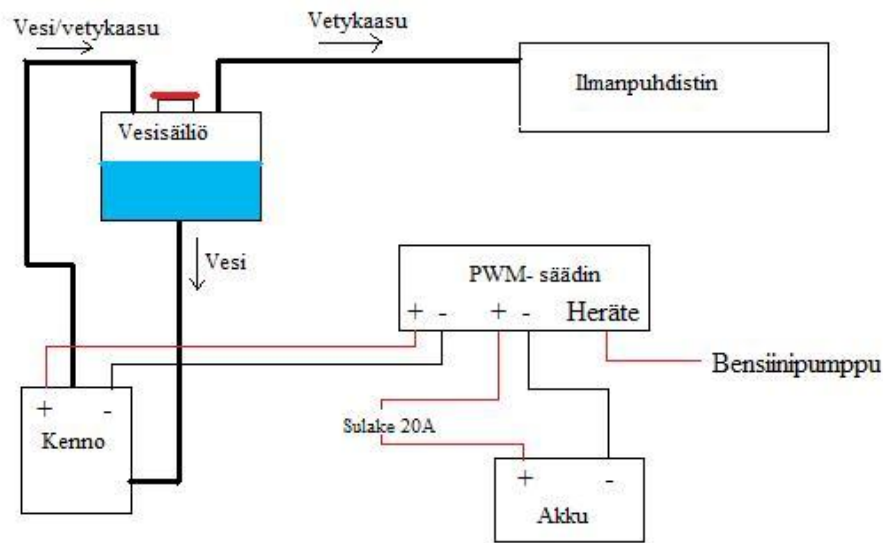
Vedyn sisältämän energian määrä voidaan laskea vedyn käytössä tapahtuvasta entalpian muutoksesta. Vedyn reagoiessa ilman kanssa, on reaktiossa syntyvän vedyn reaktioentalpia 285,8 kJ/mol (NTP-olosuhteet).[13, s. 12.] Yhdessä sekunnissa syntyvän vedyn energia on

$$0,000051822 \dots \text{ mol} \times 285,8 \text{ kJ/mol} \approx 0,015 \text{ kJ} = 15 \text{ J}$$

Elektrolyysikemno siis tarvitsee energiaa 140 joulea tuottaakseen 15 joulea vetyä reaktion jokaista sekuntia kohden. Hyöty on $-125 \text{ J/s} = -125 \text{ W}$. Lisäksi kun huomioidaan elektrolyysin hyötysuhde (80–90 %), niin hyöty laskee edelleen.

6 Elektrolyysikemnon asentaminen autoon

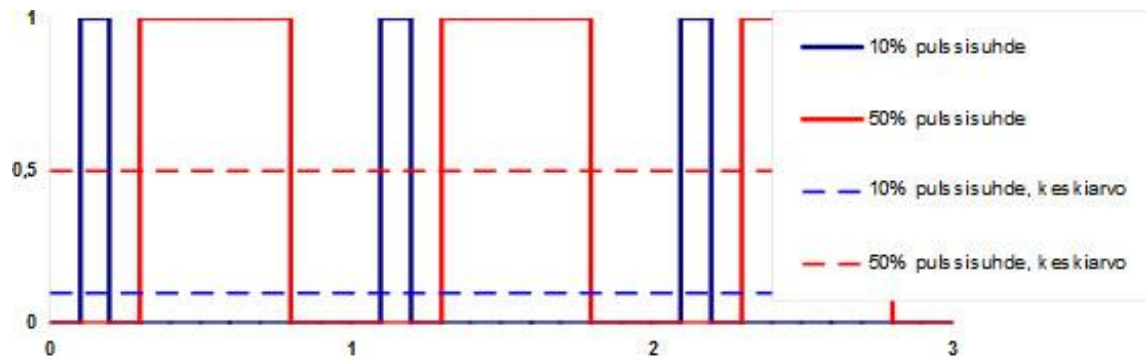
Valmistaja toimitti valmiiksi asennussarjan ja asennusohjeet. Elektrolyysikemno on tyypiltään kuiva kemno, jossa elektrolyytti kiertää säiliön ja kemnon välillä. Erillistä siirtopumppua ei tarvita sillä neste siirtyy kemnosta säiliöön lämmönjohtumisen ja gravitaation avulla (kuva 4). Kuivan kemnon etuina ovat elektrolyytin pysyminen viileämpänä, sekä kemnon ja elektrolyytin pitempi käyttöikä.



Kuva 4. Kaaviokuva laitteistosta

6.1 PWM-säädin

Tämän laitteiston tehonkulutusta ohjataan PWM-säätimellä (Pulse width modulator). Säätimen avulla saadaan säädettyä elektrolyysikennon energiankulutus mahdollisimman optimaaliseksi. Toiminta perustuu hakkuriin, joka katkoo kennolle syötettävää virtaa nopealla päälle-poiskytkennällä. Virtaa siis katkotaan aina vakion mittaisen ajan jälkeen jolloin keskiarvona saadaan haluttu teho. Kennolle tuleva virta on kantiaallon muotoista, ja virran suuruutta voidaan kasvattaa pulssinleveyttä suurentamalla (kuva 5), tai lisäämällä pulssien taajuutta. Sääto tapahtuu laitteessa olevasta potentiometrillä.



Kuva 5. Pulssin leveyden vaikutus keskiarvoon

PWM-säätimellä on korkea hyötysuhde, sillä kytkimenä toimiva komponentti on suurimman osan ajasta joko johtavassa tilassa tai estää virran kulun kokonaan.

6.2 Asennus

Laitteiston asentaminen autoon tapahtui valmistajan toimittamien ohjeiden mukaisesti. Asennussarjan lisäksi tarvittiin perustyökalut, juotoskolvi sekä yleismittari. Ohjeiden mukaan tarvitaan myös OBD2-diagnosointilaite, mutta se todettiin testin aikana turhaksi. Komponenttien sijoittelu pieneen moottoritilaan oli haaste, mutta onnistui sovittelujen jälkeen (kuva 6). Kahden litran vesisäiliö pitää olla elektrolyytikennon yläpuolella kokonaan, joten kenno sijoitettiin mahdollisimman alas lähelle moottoria. Kennolle jouduttiin rakentamaan erillinen metalliteline. Säiliö tuli mahdollisimman ylös, siten, että konepelti mahtui kiinni. PWM-säädin kiinnitettiin tulipeltiin näkyvälle paikalle, jotta potentiometrien säätö oli mahdollista ilman säätimen irrotusta. Vesisäiliön pohjasta vedettiin letku kennon alaosaan ja kennon päältä vedettiin letku vesisäiliön päälle. Vesisäiliön päältä, toiselta puolelta vedettiin letku ilmanpuhdistinkoteloon. PWM-säätimelle vedettiin johdotukset akulta, ja plus-johto suojattiin 20 ampeerin sulakkeella. Säätimeltä vedettiin johdot kennon plus- ja miinusnavalle.



Kuva 6. Laitteisto asennettuna moottoritilaan

PWM-säädin tarvitsee herätevirran, jonka saatuaan se päästää virran elektrolyysikennolle käynnistäen vedyntuotannon. On hyvin tärkeää, ettei herätevirta tule, ennen kuin moottori on käynnissä, sillä muuten räjähdysherkkä vety täyttäisi ilmanpuhdistinkotelon ja räjähtäisi käynnistettäessä autoa. Yritin ottaa herätevirran moottorin öljynpaineanturilta, mutta virtamäärä ei riittänyt edes releen kanssa PWM-säätimelle. Öljynpaineanturilla liikkui vain joitain milliampeereja, joka ei riittänyt releen magnetointivirraksi. Päädyin ottamaan herätevirran polttoainepumpun releeltä. Kytettäessä auton sytytysvirta päälle, polttoainepumppu pyörii muutaman sekunnin ajan, jonka todettiin olevan turvallisen lyhyt aiheuttaakseen räjähdysvaaran. Oletus osoittautui myöhemmin oikeaksi, sillä vedyntuotanto alkoi noin kymmenen sekunnin jälkeen käynnistämisestä.

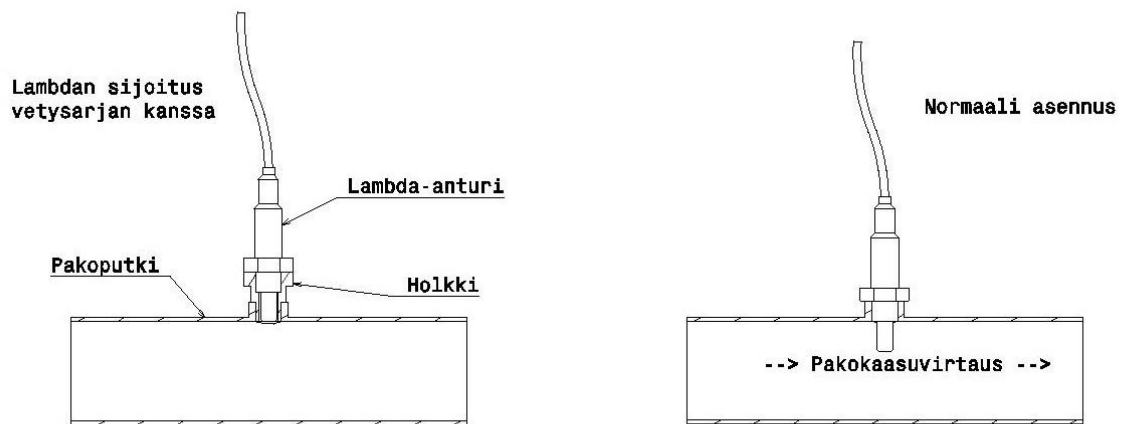
Mittauksia varten autoon asennettiin tarkka polttoaineenkulutusmittari. Laite asennettiin moottoriin menevän polttoaineletkun väliin. Laite mittaa sen läpi kulkevan polttoainemäärän hyvin tarkasti. Kennon virtaa ja jännitettä mitattiin Hioki Power

Analyzer-laitteistolla (kuva 7). Virta mitattiin pihtimittarilla kennon virtajohtimen ympäriltä ja jännite kennon plus- ja miinusnavan väliltä. Kaikki mittaustulokset kerättiin talteen Dewetron-tiedonkeruulaitteiston avulla.



Kuva 7. Laitteiston virta sekä jännite

Viimeinen kohta oli asentaa holkki auton lambda-anturin ja pakoputken väliin. Holkki nostaa anturin mittapään pois pakokaasuvirtauksesta (kuva 8). Menettely ihmetyttää, mutta todennäköisesti tällä järjestelyllä vältetään moottorin vikavalon syttyminen. Vedyn mukanaolo lisää pakokaasujen happipitoisuutta, joten ilman holkkia moottorinohjaus luulisi seoksen olevan liian laiha. Moottorinohjaus rikastaisi seosta, mutta, mikäli ennalta asetettu säätövara ylittyy, moottorin häiriövalo syttyy ja moottorin lambdasäätö poistuu käytöstä.[9 s. 485–488.]



Kuva 8. Lambda-anturin sijoitus

Holkki asennettiin ohjeiden mukaan paikalleen, ja ainakaan testauksen aikana moottorin häiriövalo ei syttynyt. Olisi mielenkiintoista tutustua moottorin seossuhteisiin tarkemmin, sillä lambdamittauksen ideana on että lambda-anturin mittapää on pakokaasuvirtauksessa eikä virtauksen sivussa. Ajanpuutteen vuoksi tyydyttiin tekemään asennus valmistajan ohjeiden mukaan ja vertaamaan saatuja tuloksia auton alkuperäisiin tuloksiin ilman vetysarjaa. Laitetta en kuitenkaan asentaisi omaan autoon, ennen kuin olisin varmistunut polttoaineseoksista.

Laitteiston käyttöönotto sujui ongelmitta. Ensimmäisellä kokeilulla laite alkoi tuottaa vetyä noin 1 minuutin jälkeen. Elektrolyytti nousee kennolta takaisin säiliöön, ja sen mukana tuleva vety täyttää säiliön yläosan ja jatkaa matkaansa moottorin ilmanpuhdistinkoteloon. Vetykaasun tuotanto varmistettiin ottamalla sitä tyhjään pulloon. Kun pullon suulle vie tulitikun, vety syttyy päästään voimakkaan vihellyksen.

6.3 Sääto

Vetysarjan avulla on tarkoitus saada polttoaineenkulutus mahdollisimman pieneksi. Laitteiston säätö pyritään tekemään siten että ajoneuvon moottori kuormittuu mahdollisimman vähän. Mitä vähemmän moottoria kuormitetaan, sitä vähemmän polttoainetta kuluu. Toisaalta mitä enemmän laite ottaa virtaa, sitä enemmän se

tuottaa palamisherkkää vetyä. Tarkoitus on hakea mahdollisimman optimaalinen säätö, jossa laitteen tuottama hyöty on mahdollisimman suuri lisääntyneeseen polttoaineenkulutukseen nähden.

Vedyntuotannon säätö tapahtuu pääasiassa PWM-säätimellä. Oikea säätö on ehkäpä työn merkittävin osa sillä se vaikuttaa eniten lopputulokseen. Säädetäviä suureita kennon ottama virta I . Toki elektrolyysiliuoksen voimakkuus vaikuttaa myös, mutta tämän annettiin olla valmistajan ohjeiden mukainen. Kennolle tuleva jännite on auton latausjännitteen suuruisen eli 14 V. Virrankulutus säädetään jokaiselle autolle yksilökohtaisesti, ja sen suuruuteen vaikuttavat monet asiat aina ilmankosteudesta moottorin kuluneisuuteen

Laitteen ohjeen mukaan elektrolyysikennon virrankulutus säädetään auton moottorin kuormitustiedon perusteella. Ohjeen mukaan kennon virtaa nostetaan niin kauan, kunnes moottorin kuormitustieto (load value) muuttuu. Silloin on saavutettu maksimivirran piste ilman kasvanutta polttoaineenkulutusta. Moottorin kuormitustieto saadaan OBD-pistokkeen kautta.

Ohje on hieman ristiriitainen tosiasioiden kanssa. Mikäli laturia kuormitetaan sähkölaitteella, niin tietysti se lisää moottorin kuormitusta ja lisää polttoaineen kulutusta. Tämä asia tuli hyvin esiin käytännössä. Load value-arvo alkoi kasvaa heti, kun kenno alkoi saada virtaa. Kuormituksen huomasi myös auton tyhjäkäynnin alenemisesta. Ajoneuvolla päätettiin ajaa tehodynamometrissä samaa ajosykliä erilaisilla kennon virroilla ja hakea optimaalisinta virtamäärää.

Ajosykli (liite 1) suunniteltiin itse ja se yritettiin saada vastaamaan normaalin henkilöauton tyypillisimpiä ajonopeuksia ja -tilanteita. Tarkoituksena oli ajaa Ammattikorkeakoulun emissiolaboratoriossa Euro 3:n mukaiset tulokset, mutta vapaata testausaikaa ei valitettavasti löytynyt kyseisenä ajankohtana.

7 Mittaukset ja tulokset

Ajoneuvon mittauksissa keskityttiin kuluttajan kannalta tärkeimpään eli polttoaineen kulutuksen mittaamiseen. Ajoneuvolla ajettiin samaa ajosykliä peräkkäin, ja mitattavia suureita olivat laitteiston ottama jännite, virta sekä auton käyttämä polttoainemäärä. Jokainen mittaus pyrittiin tekemään samalla tavalla. Mittauksissa käytetyssä jarrudynamometrissä vastus säädettiin kyseiselle ajoneuville sopivaksi ja se pidettiin samana kaikissa mittauksissa. Juuri ennen mittauksen aloittamista auto seiso tyhjäkäynnillä ensimmäinen vaihde kytkettynä ja kytkinpoljin painettuna pohjaan. Kun mittaus alkoi, liikkeelle lähdettiin heti. Ajosyklin mukaiset kiihdytykset tehtiin aina mahdollisimman nopeasti ja samalla tavalla. Käytännössä kiihdytykset tehtiin aina kaasua pohjassa ja tietyllä vaihteella. Ajosyklin hidastukset tehtiin moottorijarrua käyttäen. Jarrupolkimeen ei koskettu, jotta mittaustulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoiset. Mittaus päätettiin, kun dynamometrin rullat pysähtyivät.

Ajoneuvolla ajettiin ajosykli yhteensä 20 kertaa viidellä eri virtamäärällä (liite 2). Jokaisella virtamäärällä otettiin riittävän monta ajoa mittaustarkkuuden varmistamiseksi. Ensimmäiset ajokerrat kenno toiminnassa (test5 ja test6) ovat harjoituksia. Kylmän moottorin vaikutuksen polttoaineenkulutukseen huomaa selvästi polttoaineenkulutuksesta (test3 ja test7). Nämä tulokset on jätetty pois keskiarvosta. Tulokset 1–4 on ajettu elektrolyysikenno pois kytkettynä ja näiden tulosten keskiarvoon on verrattu muita tuloksia.

Tulokset kertovat hyvin yksiselitteisesti elektrolyysikennon hyödyn. Parhaimmalla säädöllä saavutettiin alle yhden prosentin hyöty, joka häviää pois mittaustarkkuuksien puitteissa. Valmistajan lupaama 8–35 % on hyvin kaukana. Mielenkiintoista on huomata, että 15 ampeerin virralla polttoaineenkulutus on aavistuksen pienempi kuin 10 ampeerin virralla. Todennäköisesti elektrolyytti lämpenee huomattavasti enemmän 15 ampeerin virralla ja se tehostaa vedyntuotantoa hieman.

8 Johtopäätökset

Tämän työn lopputulos on odotusten mukainen. Laitteen ei uskottu tuovan todellista säästöä polttoaineenkulutukseen. Vetygeneraattoreista on puhuttu pitkään, ja

Amerikassa on useita kaupallisia laitteita tarjolla. Valmistajat lupaavat huimia säästöjä, mutta niillä ei ole tarjolla puolueettomia mittaustuloksia. Autonvalmistajat varmasti hyödyntäisivät laitetta, mikäli sen avulla olisi mahdollista saada polttoainesäätöä aikaiseksi.

Laitteistossa on muutama asia, joka ihmetyttää. Ensimmäinen on lambdatunnistimen nostamien. Nostamisen jälkeen lambda tuskin toimii oikein ja moottorihjaus ei tiedä, millä seoksella moottori käy. Tällä voi olla hyvin tuhoisia seurauksia pitkällä aikavälillä. Ahdetuissa moottoreissa asia korostuu. Mikäli polttoaineseos on liian laiha, moottorissa saattaa esiintyä vahingollista nakutusta sekä sylintereiden lämpötila saattaa nousta vaarallisen korkeaksi. Pahimmassa tapauksessa moottorin männät sulavat ja leikkautuvat kiinni sylintereihin. Asiaa olisi mielenkiintoista tutkia enemmän laajakaistalambdan avulla.

Toinen asia liittyy laitteiston ohjaukseen. Laitteisto ei millään tavalla huomioi moottorin kuormitusta, kierroslukua eikä mitään muutakaan. Laitteisto syöttää tasaista virtamäärää kennolle tuottaen saman määrän vetyä kaikissa tilanteissa. Tämä ei ole kannattavaa, sillä polttomoottorin vaatima ilma sekä polttoainemäärä vaihtelevat suuresti tyhjäkäynnin ja täyskuormituksen välillä. Mikäli laite pystytään säätämään vain yhdelle tietylle kuormitustilanteelle, niin muut kuormitustilanteet tuskin ovat yhtä taloudellisia. Toisaalta tällä laitteella ei saavuteta säästöä missään tilanteessa, joten koko laite on täysin turha eikä säätömahdollisuutta tarvita.

Projekti opetti paljon elektrolyysistä, polttokennoista, vedystä ja sen valmistamisesta. Vetyautojen yleistyminen on tulevaisuudessa mahdollista, mutta perinteisissä polttomoottoreissa vetyä tuskin tullaan näkemään. Suuret autovalmistajat tutkivat parhaillaan vetykäyttöisten polttokennojen soveltuvuutta autoihin, ja tulevaisuudessa vetyauto on mahdollinen, mikäli aiemmin mainitut vedyn ongelmat saadaan ratkaistua.

Lähteet

[1] Vetysarja. Laitteiston maahantuoja. Verkkodokumentti. Flexfuel-company. <<http://www.flexfuel-company.fi/Etusivu.php>>. Luettu 6.10.2012.

[2] Why run on hydrogen? Verkkodokumentti. Flexfuel-company. <<http://www.kit-hydrogene.com/>>. Luettu 26.10.2012.

[3] Mikkola, Mikko. Vedyn mahdollisuudet tulevaisuuden energiantuotannossa. Verkkodokumentti. <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/vetytulevaisuus/vety_energiantuotannossa-moniste.pdf>. Viitattu 3.3.2012.

[4] Lund, Peter. 2003. Vetyteknologiat. Verkkodokumentti. <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf>. Viitattu 5.3.2012.

[5] Bosch. 2003. Autoteknillinen taskukirja 6. painos. Jyväskylä: Autoalan Koulutuskeskus Oy.

[6] Raunio, Tapani. Vedyn valmistaminen. Verkkodokumentti. <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_05/Raunio_Vedynvalmistaminen.pdf>. Viitattu 5.3.2012.

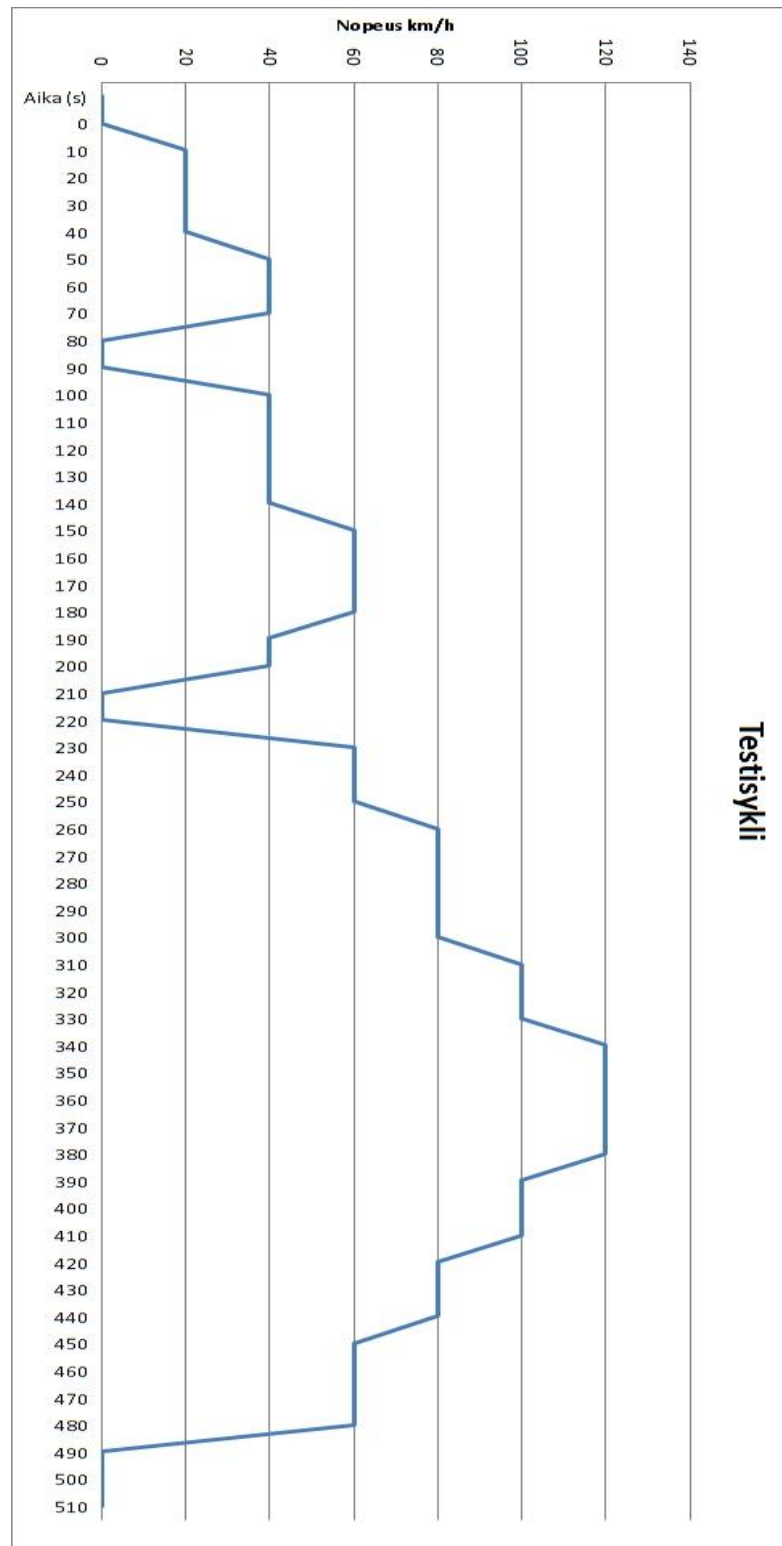
[7] Jumppanen, Pauli. Vety energiantuotannossa. Verkkodokumentti. <http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek_42_4_2009_4.pdf>. Viitattu 6.10.2012.

[8] Hakuteos.com. Michael Faraday. Verkkodokumentti. <http://hakuteos.com/Michael_Faraday>. Viitattu 21.5.2013.

[9] Juhala, Matti; Lehtinen, Arto; Suominen, Matti & Tammi, Kari. 2005. Moottorialan sähköoppi. Jyväskylä: Autoalan Koulutuskeskus Oy.

- [10] S. S. Gas Lab Asia. Hydrogen Gas Plant. Verkkodokumentti.
<<http://www.liquidgasplants.com/h2-gas-plant.html>>. Viitattu 21.5.2013.
- [11] Antila, Anna-Maija; Karppinen, Maarit; Leskelä, Markku; Mölsä, Heini; Pohjakallio, Maija. 2007. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita Prima Oy.
- [12] Seppänen, Raimo; Kervinen Martti; Parkkila, Irma; Karkela, Lea; Meriläinen, Pekka. 2007. MAOL-taulukot. Helsinki: Otava.
- [13] Virtanen, Mikko. 2009. Vetykaasun paineistus ja säilytys. Verkkodokumentti.
<<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/46920/nbnfi-fe200909012074.pdf?sequence=3>>. 7.5.2009. Viitattu 4.4.2013.

Dynamometrimittauksissa käytetty ajosykli



Testisykli

Testitulokset

Nro	Kennon virta (A)	Kulutus (ml)	Huom.	ka	Hyöty (%)
test 1	0	761,882			
test 2	0	782,289			
test 3	0	810,314	Kylmä moottori		
test 4	0	793,212		779,13	0,00
test 5		787,073	harj.		
test 6		801,183	harj.	794,13	-1,93
test 7	4,5	932,802	Kylmä moottori		
test 8	4,5	796,848			
test 9	4,5	804,878		800,86	-2,79
test 10	10	816,544			
test 11	10	812,336			
test 12	10	812,442		813,77	-4,45
test 13	15	823,715			
test 14	15	828,698			
test 15	15	812,57			
test 16	15	801,377			
test 17	15	778,831		809,04	-3,84
test 18	7,2	763,901			
test 19	7,2	779,753			
test 20	7,2	774,547		772,73	0,82