

HIUKKASEN VEDYSTÄ

SEPPÖ MÄKINEN

other publikation c31



VAMK

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

PUBLISHER:

Vaasan ammattikorkeakoulu | Vaasa University of Applied Sciences

ISSN 2489-4400 (C, other publications, 31)

ISBN 978-952-5784-59-6 (online)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-5784-59-6>

Copyright © Vaasa University of Applied Sciences and the authors

Design: VAMK | Satu Aaltonen

Layout: Tritonia | Merja Kallio

Vaasa 2022



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Wolffintie 30, 65200 Vaasa

julkaisut@vamk.fi

VAMK.fi

SISÄLTÖ

Tiivistelmä	4
1 Vety – ensimmäinen alkuaine	5
2 Vedyn eri isotoopit	8
3 Vety ja fuusioreaktorit	10
4 Vedyn käyttö polttomoottoreissa	11
5 Vety ja polttokennot	14
6 Vety poliittisten päätösten polttopisteessä ja TKI-toiminnassa	18
7 Loppusanat	21
Viitteet	22

TIIVISTELMÄ

Vety on hyvin erikoinen ja monipuolinen alkuaine. Sen lisäksi, että vety on universumin ensimmäinen, yksinkertaisin ja yleisin alkuaine, se on tällä hetkellä energian tuottamiseen ja ilmastonmuutoksen torjuntaan liittyvien keskustelujen polttopisteessä. Tässä artikkelissa luodaan lyhyt katsaus vetyyn fysikaalisena alkuaineena, minkä jälkeen tarkastellaan lyhyesti vedyn energiakäyttöön liittyviä seikkoja viimeaikaisten tapahtumien näkökulmasta.

1. VETY – ENSIMMÄINEN ALKUAINE

Aloitetaan vetyyn liittyvän tarinamme alusta. Siis aivan alusta, neliulotteisen aika-avaruutemme alkuhetkestä. Universumimme eli maailmankaikkeutemme syntyi n. 13,8 miljardia vuotta sitten kaikkien aikojen dramaattisimmassa synnytyksessä, kun alkuräjähdyksessä sai aikaan inflatoorisesti laajenevan superkuuman avaruuden [1]. Voisi olettaa, että noin kauan aikaa sitten tapahtuneesta käsittämättömän voimakkaasta räjähdyksestä ei tänä päivänä voi saada mitään tietoa. Tiede on kuitenkin kovin ihmeellistä. Jopa maailmankaikkeuden ensimmäisen sekunnin tapahtumat tunnetaan hyvin tarkasti, ja se on jaettu viiteen eri aikakauteen [2]. Tämän artikkelin mielenkiinto kohdistuu vähän vanhempaan universumiin, eli aikakauteen, jolloin maailmankaikkeus oli n. 380.000 vuotta vanha. Tuolloin protonit (jotka olivat syntyneet n. sekunnin kuluttua alkuräjähdyksestä) muodostivat elektronien kanssa kaikkien aikojen ensimmäiset atomit [3]. Tällöin syntyi myös kuuluisa kosminen taustasäteily, joka on vahvin kokeellinen todiste alkuräjähdysteorialle [4].

Lukijalle ei liene yllätys, että nuo ensimmäiset atomit olivat nimenomaan vetyatomeja. Ne muodostuvat yhdestä positiivisen sähkövarauksen omaavasta protonista ja yhtä suuren negatiivisen sähkövarauksen omaavasta elektronista. Näiden hiukkasten sähkövarauksen suuruutta kutsutaan alkeisvaraukseksi, e , koska kaikkien maailmankaikkeudessa olevien vapaiden hiukkasten sähkövaraus on tämän varauksen kokonaislukumonikerta. Protonin varaus on siis $+e$ ja elektronin varaus on $-e$. SI-järjestelmän perusyksiköissä ilmaistuna tuon sähkövarauksen suuruus on: $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (coulombia). Protonin ja elektronin muodostaman vetyatomien sähkövaraus on siis nolla, koska protonin ja elektronin sähkövaraukset summautuvat nolaksi. Elektroni on ns. alkeishiukkanen, eli sillä ei tunneta mitään sisäistä rakennetta. Protoni sen sijaan koostuu kolmesta alkeishiukkasesta, kahdesta u-kvarkista ja yhdestä d-kvarkista. U (up) eli ylös-kvarkki ja d (down) eli alas-kvarkki sisältävät sen verran sähkövarausta ja massaa, että niiden yhdistelmä tuottaa protonin. [5], [6]

Ensimmäisten vetyatomien syntymisen aikaan universumi koostui lähes yksinomaan vedystä. Myöhemmin syntyi toiseksi kevyin alkuaine, helium (He), ja tämän jälkeen muita

raskaampia alkuaineita monien mekanismien kautta. Jopa nykyään, vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Noin 74 % universumin normaalista materiasta on vedyn muodossa [7]. Sitä on siis hyvin paljon maailmankaikkeudessa, mutta tämä ei tarkoita sitä, että puhdasta vetyä olisi helppo löytää esim. maapallolta. Vetyä kyllä esiintyy maapallolla paljon, mutta yleensä hiileen sitoutuneena monenlaisten hiilivetyjen muodossa tai vesimolekyyleissä happeen sitoutuneena. Yksinkertaisin hiilivety eli metaani, CH₄, sisältää paljon vetyä, mutta molekyylisiin sitoutuneena. Maakaasu sisältää lähes yksinomaan metaania, joten metaani on sitä kautta tuttu kaasu kaasuautojen käyttäjille. Kemiallinen kaava H₂O kertoo, että vesimolekyyli muodostuu kahden vetyatomien ja yhden happiatomin muodostamasta yhteenliittymästä. Puhdasta vetyä tehdään yleensä vesimolekyylejä sähkövirralla hajottamalla, jolloin vesimolekyylien sisältämä vety- ja happikaasu saadaan kerättyä omiin säiliöihinsä. Sekä vety- että happikaasu esiintyvät normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa kaksiatomisina molekyyleinä, ts. H₂ ja O₂.

Rakenteestaan johtuen vetykaasu on erittäin kevyttä. Kaasun tiheys, eli massan ja tilavuuden suhde, yhdistettynä Arkhimedeeseen lakiin kertoo meille sen, mikä kaasu nousee ilmassa ylöspäin ja mikä taas laskeutuu ilmassa alaspäin. Jos kaasun tiheys on ilman tiheyttä pienempi, kaasu nousee ylöspäin. Kaasun tiheydelle voidaan johtaa yksinkertainen laskukaava Ideaalikaasun tilanyhtälöstä [8]:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1)$$

Tässä p kuvaa kaasun painetta, M kaasun moolimassaa ja T sen absoluuttista (kelvin)lämpötilaa. Laskukaavassa esiintyvä R on universaali kaasuvakio, $R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$. Moolimassa kertoo massan ainemäärälle, joka sisältää tasan yhden moolin ko. ainetta. Mooli taas on ainemäärän perusyksikkö luonnontieteissä käytetyssä SI-järjestelmässä. Yksi mooli sisältää $6,022 \cdot 10^{23}$ atomia (jos on kysymys atomeista muodostuvasta aineesta) tai molekyylejä (jos aine muodostuu molekyyleistä) [9].

Vety koostuu H₂-molekyyleistä, joiden moolimassa on 2,0 g/mol [10]. Ilma koostuu pääasiassa typestä N₂ (78,0 % tilavuudesta), hapesta O₂ (20,9 % tilavuudesta) ja argonista

(0,9 % tilavuudesta) [11]. Loppu 0,2 % ilman tilavuudesta koostuu hiilidioksidista, vesihöyrystä yms. kaasuista. Puhdasta vetyä ilmakehästä ei juurikaan löydy, sillä ilma sisältää vetyä vain 0,00005 % tilavuudestaan [12]. Mainituilla kaasuosuuksilla laskien ilman moolimassa on 29,0 g/mol, siis 14,5 kertaa vedyn moolimassan suuruinen. Tästä johtuu, että samassa paineessa ja lämpötilassa olevan ilman tiheys on 14,5 kertaa niin suuri kuin vetykaasun tiheys:

$$\frac{\rho_{\text{ilma}}}{\rho_{\text{vety}}} = \frac{\frac{pM_{\text{ilma}}}{RT}}{\frac{pM_{\text{vety}}}{RT}} = \frac{M_{\text{ilma}}}{M_{\text{vety}}} = \frac{29,0}{2,0} = 14,5$$

Vetykaasu on siis 14,5 kertaa kevyempi kuin ilma, ja siksi vetyä on käytetty mm. ilmalaivoissa. Toukokuussa 1937 tapahtunut ilmalaiva Hindenburgin katastrofaalinen tulipalo ja tuhoutuminen vei 35 ihmisen hengen ja käytännössä päätti vetytätteisten ilmalaivojen lyhyeksi jääneen aikakauden [13].

Vety on hyvin reaktiivinen alkuaine, ja se syttyy siksi hyvin helposti räjähdysmäisesti palamaan. Palamisella tarkoitetaan sitä, että aine yhtyy happeen kemiallisessa reaktiossa. Kun vety ja happi yhtyvät toisiinsa, saadaan tuloksena vettä, H₂O, ja samalla tässä eksotermisessä reaktiossa vapautuu runsaasti lämpöenergiaa. Sen sijaan helium, universumin toiseksi yksinkertaisin ja kevyin alkuaine, on jalokaasu eikä siksi reagoi juuri minkään aineen kanssa minkäänlaisessa kemiallisessa reaktiossa juuri missään olosuhteissa. Tämän vuoksi helium on turvallinen täyteaine esim. nykyaikaisissa ilmalaivoissa. Jalokaasuksi sanotaan alkuainetta, jonka atomirakenne vastaa eräänlaista paikallista energiaminimiä. Koska luonto pyrkii aina energiaminimiin, ovat jalokaasut luonnossa hyvin suosittuja, eivätkä ne siksi halua muuttaa rakennettaan esim. kemiallisen reaktion avulla.

2. VEDYN ERI ISOTOOPIT

Vetyatomia yksinkertaisempaa atomia ei voi olla, koska se sisältää vain yhden protonin ytimessään ja yhden elektronin ytimen ympärille pallomaisen todennäköisyysjakauman muotoon sijoittuneena. On hieman väärin sanoa, että elektroni kiertää protonia tiettyä ympyrärataa pitkin. Tällainen planetaarinen malli, ts. malli, jossa atomiydin ajatellaan auringoksi ja elektroni ajatellaan aurinkoa kiertäväksi planeetaksi, on osoitettu vääräksi 1900-luvun alkupuolella kehittyneessä kvanttimekaniikassa [5], [14]. Kuuluisan tanskalaisen fyysikon Niel Bohrin esittämä planetaarinen malli soveltuu kuitenkin varsin hyvin atomifysiikan alkeiskursseille, eikä se vetyatomien kohdalla edes tuota kovin vääriä tuloksia atomin koolle tai energiatiloille.

Vetyatomien ydin voi sisältää protonin lisäksi myös toisenlaisia ydinhiukkasia, neutroneita. Neutronin massa on likipitään sama kuin protonin massa, mutta sillä ei ole sähkövarausta eli se on sähköisesti neutraali [15]. Atomin ytimessä olevien protonien lukumäärä määrittää alkuaineen (esim. vetyatomien ytimessä on aina 1 protoni, heliumatomien ytimessä on aina 2 protonia, jne.) ja ytimessä olevien neutronien lukumäärä määrittää ko. alkuaineen isotoopin. Mikäli vetyatomien ytimessä on vain protoni, sanomme vetyä tavalliseksi vedyksi, H. Mikäli ytimessä on protonin lisäksi yksi neutroni, on kyseessä vety-2 eli deuterium, jolle käytetään usein merkintää D. Tämä kemiallinen merkintätapa on harhaanjohtava, koska kyseessä on vety, vaikka kemiallisessa merkissä ei käytetäkään H-kirjainta. Deuterium ei siis ole eri alkuaine, vaan se on vety-alkuaineen raskaampi isotooppi. Vedyllä on myös deuteriumiakin raskaampi isotooppi, vety-3 eli tritium, T, jonka ytimessä on protonin lisäksi kaksi neutronia. Väärinymmärrysten välttämiseksi olisi hyvä käyttää ydinfysiikassa vakiintunutta merkintätapaa, jossa alkuaineen kemiallisen symbolin vasemmassa ylänurkassa näkyvä luku kertoo atomiytimessä olevien ydinhiukkasten (protonit ja neutronit) kokonaismäärän. Normaali vety, deuterium ja tritium voidaan siis kuvata symboleilla ^1H , ^2H ja ^3H . Alkuaineet esitetään yleensä ns. jaksollisen järjestelmän taulukossa [16] ja alkuaineiden isotoopit ns. nuklidikartassa [17] (Kuva 1).

1 1.008 H Hydrogen	2 4.003 He Helium	3 6.941 Li Lithium	4 9.012 Be Beryllium	11 22.990 Na Sodium	12 24.305 Mg Magnesium	19 39.098 K Potassium	20 40.078 Ca Calcium	21 44.956 Sc Scandium	22 47.88 Ti Titanium	23 50.942 V Vanadium	24 51.996 Cr Chromium	25 54.938 Mn Manganese	26 55.933 Fe Iron	27 58.933 Co Cobalt
------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--	-----------------------------------	-------------------------------------

Labels for Helium (He):

- ATOMIC NUMBER: 2
- ATOMIC MASS: 4.003
- CHEMICAL NAME: Helium
- ELEMENT SYMBOL: He

	⁴ Li	⁵ Li	⁶ Li	⁷ Li	⁸ Li
	³ He	⁴ He	⁵ He	⁶ He	⁷ He
¹ H	² H	³ H	⁴ H	⁵ H	⁶ H
	¹ n				

KUVA 1. Vety on alkuaineiden jaksollisen järjestelmän ensimmäinen ja yksinkertainen alkuaine (vasen). Vety sisältää normaaliolosuhteissa 0-2 neutronia, jolloin se esiintyy isotoopin H, D tai T muodossa, ts. isotoopin ¹H, ²H tai ³H muodossa (oikea).

Joskus puhutaan raskaasta vedestä. Tällainen vesi on todellakin raskaampaa kuin tavallinen vesi siinä mielessä, että sen tiheys (ts. massan ja tilavuuden osamäärä) on suurempi kuin tavallisella vedellä. Raskas vesi koostuu molekyyleistä, joissa on kaksi deuteriumatomia yhdistyneenä happiatomiin. Näin muodostuu raskaan veden molekyylejä, D₂O. Kun tiedämme, että tavallisen veden kemiallinen kaava on H₂O, voimme laskea kuinka monta prosenttia raskaampaa raskas vesi on verrattuna tavalliseen veteen:

$$\frac{\rho_{\text{raskas}}}{\rho_{\text{tavallinen}}} = \frac{M_{\text{O}} + 2M_{\text{D}}}{M_{\text{O}} + 2M_{\text{H}}} = \frac{16,0 + 2 \cdot 2,0}{16,0 + 2 \cdot 1,0} = \frac{20,0}{18,0} = 1,11$$

Raskaan veden tiheys on siis 11 % suurempi kuin tavallisen veden tiheys.

3.VETY JA FUUSIOREAKTORIT

Deuterium ja tritium ovat vedyn tärkeitä isotooppeja myös fuusioreaktoreiden näkökulmasta katsottuna [18]. Etelä-Ranskassa on parhaillaan rakenteilla ITER-niminen fuusiotestireaktori, jolla pyritään selvittämään kaupallisen fuusioreaktorin rakentamiseen liittyvät ongelmat ennen kuin sellaista ryhdytään puuhaamaan [19]. Rakentaminen on kestänyt jo hyvin, hyvin pitkään, ja se tulee jatkumaan vielä muutaman vuoden ajan. Tavoitteena on saada tämä maailman suurin Tokamak-tyyppinen [20] laitteisto toimimaan vuoden 2025 aikana. ITER-projektiin kuuluu 35 valtiota, Suomi mukaan luettuna. Reaktorissa vedyn raskaat isotoopit D ja T fuusioituvat, minkä seurauksena syntyy heliumydin (He) ja neutroni. Reaktio vaatii toteutuakseen n. 90 miljoonan celsius-asteen lämpötilan, ja juuri tämä tuottaa ne teknilliset ongelmat, jotka ovat estäneet kaupallisen fuusioreaktorin (tai edes kunnollisen testireaktorin) rakentamisen jo kymmenien vuosien ajan. Vertailun vuoksi todettakoon, että aurinkomme ytimessä lämpötila on 'vain' n. 15 miljoonaa astetta. Tulevaan ITER-projektin Tokamak-testireaktoriin pyritään luomaan n. 150 miljoonan asteen lämpötila, jotta fuusioreaktio saadaan tapahtumaan optimaalisesti. ITER-reaktorin on tarkoitus käydä 50 MW ottoteholla ja sen tulisi tuottaa energiaa kymmenen kertaa suuremmalla, eli 500 MW antoteholla [19].

Fuusioreaktorin lämpötilassa aine muuttuu neljänteen olomuotoonsa eli plasmaksi [21]. Tämä on yhtäältä meille maapallon asukeille kaikista eksoottisin olomuoto, mutta toisaalta (jos pimeä aine unohdetaan tässä kohtaa) lähes kaikki universumin materia on plasman muodossa. Me olemme tottuneet kiinteään, nesteeseen ja kaasuun, ja siksi on helppo unohtaa plasma kokonaan. Universumin kannalta plasma on lähes ainoa olomuoto, ja siksi tärkeä. Sen yleisyys selittyy plasmaa sisältävien tähtien valtavalla massalla niitä kiertäviin planeettoihin ja kuihin sekä muihin taivaankappaleisiin verrattuna. Plasma koostuu atomeista irronneista elektroneista ja ionisoituneista atomeista. Deuteriumin ja tritiumin kohdalla ionisoitunut atomi tarkoittaa pelkkää atomiydintä, jossa on joko protoni + neutroni (D) tai protoni + 2 neutronia (T).

4. VEDYN KÄYTTÖ POLTTOMOOTTOREISSA

Vetyä on äärimmäisen hankala nesteyttää – toisin kuin esim. maakaasu (metaani) tai kotigrillissä yleisesti käytetyt propaani ja butaani. Jos vetykaasun haluaisi muuttaa nestemäiseen olomuotoon, pitäisi kaasu jäähdyttää lähes absoluuttiseen nollapisteeseen, ts. 20 kelvinin lämpötilaan [22]. Tämä 20 K lämpötila vastaa meille tutummalla celsius-asteikolla -253 °C lämpötilaa. Tämän vuoksi on paljon helpompi löytää nesteytettyä maakaasua (LNG, eli Liquefied Natural Gas) tai propaania tai butaania kuin nestemäistä vetyä. Esimerkiksi maakaasu nesteytyy jo -160 °C lämpötilassa, jolloin sen tilavuus pienenee n. kuudessadasosaan sen normaalipaineessa ja -lämpötilassa viemästä tilavuudesta [23].

Nesteyttämisiongelmissä huolimatta vetyä voidaan käyttää monissa teknillisissä prosesseissa energian tuottamiseen. Korkeapaineista vetykaasua voidaan polttaa sellaisenaan polttomoottorissa, mutta sen räjähdysherkkyden, karkaamisherkkyden ym. teknillisten ongelmien vuoksi tämä teknologia ei ole lyönyt läpi moottorivalmistajien keskuudessa. Ainakin BMW, Mazda, Toyota ja Subaru ovat paneutuneet vetypolttomoottoriin tosissaan, mutta suurta läpimurtoa ei ole tällä saralla vielä tapahtunut [24]. Vedyn karkaamisherkkyydellä tarkoitetaan sitä, että vety pienehköinä molekyylinä tunkeutuu yllättävänkin helposti metallisen seinämän läpi. Ajatus tällaisesta karkaamisesta voi tuntua hyvinkin eksoottiselta, mutta tämä on korkeapaineisen vetykaasun ja esim. ruostumattoman terässäiliön kohdalla hyvinkin merkittävä tekijä. Sopivalla säiliön sisäpuolisella komposiittipinnoitteella karkaamista voidaan estää erittäin paljon [25].

Puhdasta vetykaasua parempi vaihtoehto polttomoottorien polttoaineeksi on ammoniakki, NH_3 . Kuten kemiallisesta kaavasta näkee, yksi ammoniakkimolekyyli sisältää peräti 3 vetyatomia. Näin ollen ammoniakin polttaminen on melko lähellä vedyn polttamista. Ammoniakin itsesyttymislämpötila on polttomoottorikäyttöön varsin korkea, 651 °C [26]. Dieselpolttoöljyllä tämä lämpötila on vain n. 220 °C [27]. Nelitahtimoottorin puristustahdin aikana sylinterissä olevan ilman lämpötilan

nostaminen itsesyttymislämpötilaan edellyttääkin ammoniakkia käytettäessä varsin korkeaa puristussuhdetta. Jos tämä onnistutaan tekemään, tarvitaan vain nestemäisen, korkeapaineisen ammoniakkin ruiskuttaminen sylinterikammioon sopivassa kohtaa, muutama aste ennen yläkuolokohtaa, ja polttoaine syttyy palamaan räjähdysmäisesti. Sitten seuraakin työtahti, tämän jälkeen poistotahti ja sitten uusi imutahti.

Ideaalikaasun tilanyhtälön ja adiabaattisen puristuksen tarkastelu kertovat meille millainen puristussuhde tarvitaan, jotta sylinterissä olevan ilman lämpötila nousee tarpeeksi korkealle ennen ammoniakkin ruiskuttamista [28]:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \quad (2)$$

Tässä laskukaavassa T_1 ja T_2 ovat sylinterikaasun absoluuttiset lämpötilat ennen puristusta (ts. imutahdin jälkeen) ja puristuksen jälkeen (puristustahdin lopussa, kaasun sytyttämishetkellä), tässä järjestyksessä. Adiabaattivakio γ on kaasun vakioaineessa määritetyn ominaislämpökapasiteetin, c_p , ja vakiotilavuudessa määritetyn ominaislämpökapasiteetin, c_v , suhde [29]:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (3)$$

Ei-lineaarille 3-atomisille molekyyleille tämän vakio suuruus on n. 1,33 [29]. Koska epälinearisessa ammoniakkimolekyylissä on peräti 4 atomia, NH_3 , saa adiabaattivakio hieman tätä pienemmän arvon, 1,31 [30]. Laskukaavassa esiintyvät V_1 ja V_2 ovat sylinterikaasun tilavuus ennen puristusta ja puristuksen jälkeen, tässä järjestyksessä.

Lasketaan nyt puristussuhde, ts. V_1 :n ja V_2 :n osamäärä, lämpötilojen T_1 ja T_2 funktiona:

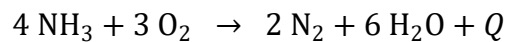
$$\frac{V_1^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

Jos oletamme, että 4-tahtisen polttomoottorin sylinteriin imutahdin aikana imettävän ilman lämpötila on esim. 40 °C eli 313 K, voimme laskea polttomoottorin puristussuhteen, joka tuottaa puristuksen jälkeen ilmalle ammoniakkin itsesyttymislämpötilan 651 °C eli 924 K:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left(\frac{924}{313}\right)^{\frac{1}{1,31-1}} = 32,9$$

Tämä on hyvin korkea puristussuhde verrattuna tyypillisten dieselmoottoareiden puristussuhteisiin. Näin ollen ammoniakkikäyttöisten polttomoottoareiden teknilliset haasteet ovat selvästi suurempia kuin tavallisten diesel- tai LNG-kaasumoottoareiden haasteet.

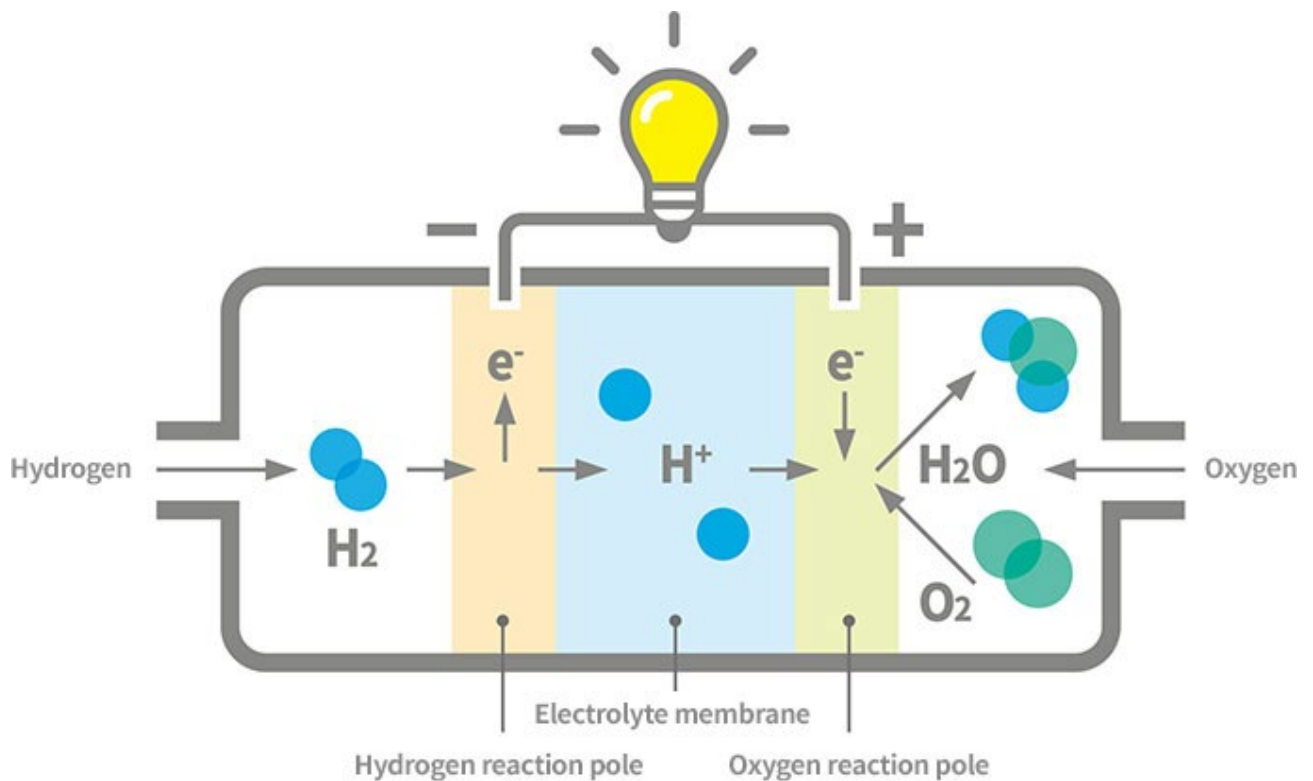
Ammoniakin palaessa puhtaasti (stöikiömetrisesti), syntyy lämpöenergian Q lisäksi (eksoterminen reaktio) vain typpikaasua ja vesihöyryä:



Koska ilmakehä koostuu 78-prosenttisesti typestä, ei tällainen palaminen tuota ongelmia ilmastonmuutoksen näkökulmasta. Ammoniakin käyttäminen polttomoottoarin polttoaineena on haastavaa myös siksi, että palaminen voi tapahtua vain varsin kapealla ammoniakki-ilma-seossuhteella (16-28 V-% NH_3) [31].

5. VETY JA POLTTOKENNOT

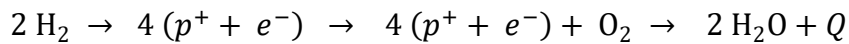
Polttaminen ei ole ainoa tapa tuottaa vedystä käyttökelpoista energiaa. Polttamisessa vedyn sisältämä kemiallinen energia muutetaan lämpöenergiaksi, jota voidaan käyttää edelleen joko jonkin väliaineen lämmittämiseen tai mekaaniseen työhön esim. polttomoottorissa. Toinen vaihtoehto vedyn sisältämän kemiallisen energian hyödyntämiseen on polttokenno (Kuva 2). Siinä korkeapaineinen vetykaasu johdetaan polttokennon sisällä olevan fosforihappoa sisältävän elektrolyyttikalvon pinnalle. Kalvo vetää voimakkaasti puoleensa vetymolekyylissä olevaa kahta positiivisen sähkövarauksen omaavaa protonia, mikä johtaa vetymolekyylin hajoamiseen kahdeksi protoniksi ja kahdeksi negatiivisesti varatuksi elektroniksi. Positiiviset protonit imaistaan elektrolyyttikalvon sisään, jossa ne kulkeutuvat kalvon läpi sen vastakkaiselle pinnalle [32].



KUVA 2. Tyypillisen polttokennon toimintaperiaate [33].

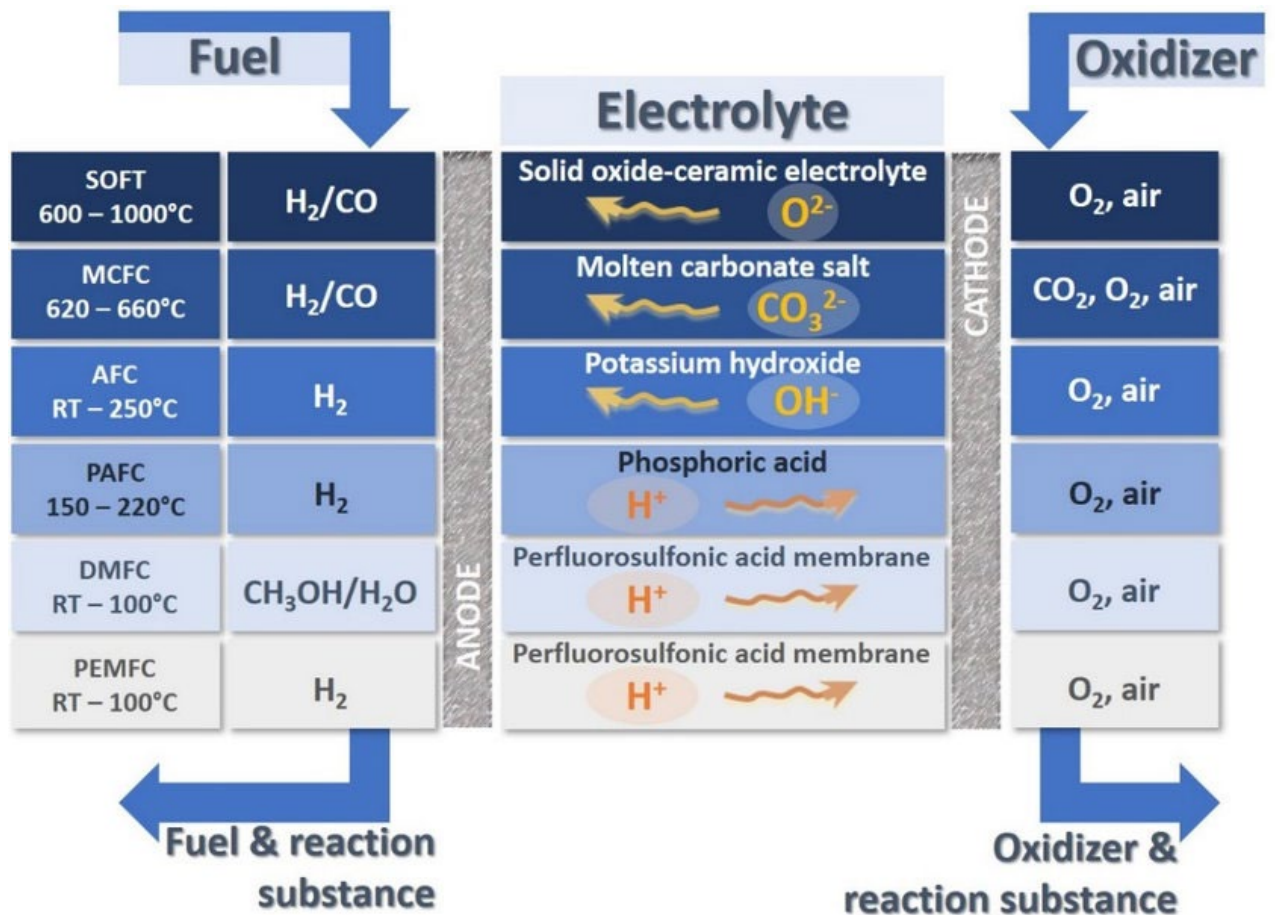
Elektrolyyttikerroksen pinta hylkii negatiivisesti varattuja elektroneja, eivätkä elektronit näin ollen pääse tunkeutumaan elektrolyyttikalvon sisään. Kennon hylkimät elektronit ohjataan sähköjohtimella kennon ohi, jolloin elektronivirta muodostaa sähkövirran. Määritelmän mukaisesti sähkövirran suunta on vastakkainen elektronien etenemissuuntaan nähden, mutta yhtä kaikki, liikkuvat elektronit synnyttävät tasavirtaa kennon ohi. Syntynyttä sähkövirtaa voidaan käyttää esim. sähköauton akuston tai kondensaattoreiden varaamiseen tai autossa olevien sähkömoottoreiden pyörittämiseen.

Polttokennon läpi tunkeutuneet protonit yhtyvät kennon kiertäneisiin elektroneihin kennon vastakkaisella pinnalla. Samalla tässä syntyvät vetyatomit reagoivat kemiallisesti kennon pintaan johdetun ilman sisältämän happikaasun kanssa, jolloin syntyy vesimolekyylejä:



Reaktiossa vapautuu myös lämpöenergiaa, Q .

Polttokennoja on erityyppisiä, joista edellä kuvattu fosforihappoa sisältävä kenno lienee yleisimmin käytetty (Kuva 3).



KUVA 3. Erilaisia polttokennotyyppejä [34].

Koska avaruudessa matkustavat astronautit, kosmonautit ja taikonautit tarvitsevat sähkövirtaa, vettä ja lämpöenergiaa, on polttokenno mitä parhain väline avaruusaluksissa. Jos alus sisältää vety- ja happikaasua sekä polttokennon, ei näistä kolmesta tule tyhjässä ja kylmässä avaruudessa pulaa. Kaiken lisäksi, happea avaruuteen tulee joka tapauksessa viedä hengittämisen mahdollistamiseksi. Näin ollen polttokennon käyttö edellyttää vain vetykaasun lisäämistä aluksen rahtiin. Polttokennoja on tästä syystä käytetty avaruuslennoilla 1960-luvulta lähtien [35].

Nykyään tätä avaruusteknologiaa käytetään mm. sähköautoissa, joissa polttokenno tarjoaa vaihtoehtoisen tavan tuottaa sähkövirtaa. Polttokenno toimii korkeapaineisella vetykaasulla, joten vetyauto pitää tankata samaan tapaan kuin maakaasuauto.

Polttokennoautojen yleistymisen tiellä on oikeastaan vain yksi ongelma: Suomesta (ja monesta muustakin maasta) puuttuu vetykaasun jakeluverkosto kokonaan. Tämän rakentaminen on lähitulevaisuuden tärkein tavoite niin Suomessa kuin koko Euroopassa. Muuten vetyteknologian käyttöön ottaminen jää lähtökuoppiinsa eikä pääse lentoon lainkaan.

Tällä hetkellä liikenteessä olevat sähköautot käyttävät sähkövirran lähteenä litiumioni-, litium-rautafosfaatti- tai suolasula-akuista rakennettuja korkeajännitteisiä akustoja. Vain äärimmäisen pieni osa sähköautoista tuottaa sähkömoottoreidensa tarvitseman sähkövirran korkeapaineisen vetykaasun ja polttokennon avulla. Näitä kahta erityyppistä sähköautoratkaisua tulisi verrata toisiinsa mahdollisimman objektiivisesti ja kiihkottomasti. Kummanko hiilijalanjälki on pienempi koko elinkaaren aikana, kumpi edustaa yksinkertaisempaa kokonaisteknologiaa, kummanko huoltokulut ovat edullisemmat, mikä on kokonaistaloudellisempi ratkaisu, kumpi toimii luotettavammin pohjoismaisissa talvi- ja kesäolosuhteissa, kumpaanko voidaan tuottaa tarvittavat materiaalit ja komponentit kotimaisin voimin, jne? Vertaileminen ei ole helppoa, mutta niin kauan kuin Suomessa ja Pohjanmaalla ei ole toimivaa korkeapaineisen vihreän vedyn hajautettua tuotantoa ja/tai toimivaa kaasunjakelun infrastruktuuria, vertaileminen jää teoreettiselle tasolle ja harvojen käsiin.

6. VETY POLIITTISTEN PÄÄTÖSTEN POLTTOPISTEESSÄ JA TKI- TOIMINNASSA

On ollut ilo seurata viimeaikaista poliittista vetyaktiivisuutta Suomessa. Ministeritasolla on ryhdytty ajamaan koko Eurooppaan vedyn jakeluverkostoa [36]. Mikäli vetyä ryhdyttäisiin tuottamaan keskitetysti ja tähän liittyisi maakaasun tapaan kaasunjakeluputkisto, tämä tulisi Suomeen todennäköisesti Haaparannan kautta. Tästä putki jatkuisi Pohjanmaan rannikkoa pitkin alaspäin.

Keskitettyyn vedyn tuotantoon ja kaasuputken kautta tapahtuvaan jakeluun liittyy paljon taloudellisia, ajallisia ja teknillisiä ongelmia. Rakentaminen olisi kallista, niin tuotantolaitosten kuin putkiston kohdalla, ja rakentaminen kestäisi aivan liian kauan. Tarvitsemme nopeita toimia, jotta yritykset ja autoilijat pääsevät hyötymään vetyteknologian eduista niin nopeasti kuin suinkin mahdollista. On varsin vaikeaa kuvitella, että nykyistä maakaasun jakeluun käytettävää putkistoa voitaisiin käyttää vetykaasun jakeluun ilman massiivisia muutostöitä ja investointeja.

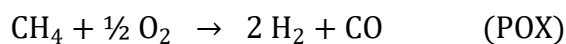
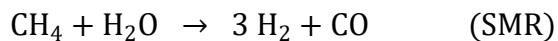
Kaikki edellä mainitut ongelmat kääntävät ajatukset hajautettuun vedyn tuotantoon. Tässä nähdään nykyään paljon positiivista, ja siksi VAMK on ollut innolla mukana Ossi Koskisen johtamassa *H2 Ecosystem Roadmap* -hankkeessa yhdessä Novian ja Hankenin kanssa. Tässä hankkeessa olemme pyrkineet kartoittamaan Pohjanmaan (lähinnä pienten ja keskisuurten) yritysten mielenkiintoa vetyteknologian hyödyntämiseen ja yritysten väliseen verkostoitumiseen. Hankkeen yhteydessä olemme keränneet laajan nimilistan kiinnostusta osoittaneista yrityksistä, järjestäneet seminaareja ja luoneet hankkeellemme Internet-sivut, joiden välityksellä jaamme ilosanomaa vetykaasun tuottamisesta, hyödyntämisestä ja varastoinnista [37].

VAMK on myös mukana valmistelemassa Turun amk:n kanssa tutkimusaihiota, jossa selvitetään vihreää vetyä tuottavan pilottilaitoksen rakentamista Naantaliin. Laitoksen tuottamaa lämpöenergiaa on tarkoitus hyödyntää kaukolämpöverkostossa. Laitoksen

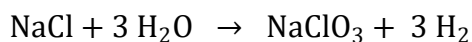
tuottama vety voitaisiin myös jalostaa metaaniksi tai ammoniakiksi. Vettä hapeksi ja vedyksi hajottavassa elektrolyysilaitoksessa hyödynnettäisiin tuuli- tai aurinkovoimaloiden tuottamaa sähköenergiaa. Tuotantoketju on siis pyritty tekemään niin vihreäksi kuin suinkin mahdollista.

Edellä mainittu 'vihreä' vety tarkoittaa vetyä, joka on tuotettu vettä hajottavassa elektrolyysilaitoksessa sähköenergialla, joka on tuotettu hiilineutraalisti. Jos vetyä tuotettaessa ilmakehään vapautuu suhteellisen runsaasti hiilidioksidia, vetyä sanotaan 'ruskeaksi' (tai joskus 'mustaksi'). Näiden lisäksi käytetään termejä 'sininen' vety ja 'harmaa' vety, riippuen vedyn tuotantoteknologiasta ja sen tuottaman hiilidioksidin määrästä.

Tällä hetkellä lähes 90 % Suomessa tuotetusta vedystä tehdään metaanin höyryreformoinnilla (Steam Methane Reformer, SMR) tai katalyyttisellä osittaisella hapettamisella (Partial Oxidation of X, POX):



Runsas 10 % Suomessa valmistetusta vedystä saadaan sellun valkaisukemikaalina käytetyn natriumklooraatin sähkökemiallisen ja kemiallisen valmistuksen sivutuotteena:



Vain vajaa 1 % suomalaisesta vedystä tuotetaan sähkökemiallisesti vettä elektrolysoimalla. [38]

Kun vihreää vetyä elektrolyysillä tuottava laitos Woikoski Oy aloitti toimintansa Kokkolassa v. 2014, se oli Euroopan suurin tämän kaltainen laitos [39]. Yrityksistä huolimatta Woikosken tuottama vihreä vety ei noihin aikoihin saanut aikaan vetybuumia Pohjanmaalla – ikävä kyllä. Nyt yritetään uudelleen. Viime vuoden lokakuussa Woikoski ja Lappeenrannassa toimiva start-up-yritys Neovolt [40] ilmoittivat aloittavansa hankkeen, jossa ne kehittävät yhdessä vihreän vedyn tuotantoteknologiaa [41].

Toivottavasti tämä saa aikaan vihreän vedyn kauan kaivatun massiivisen ja monipuolisen tuotannon, jakelun ja käytön alueellamme.

7.LOPPUSANAT

Yhteenvetona voidaan todeta, että vety on numero yksi monessa mielessä: maailmankaikkeuden ensimmäinen atomi oli vetyatomi, vety löytyy alkuaineiden jaksollisen järjestelmän ensimmäisestä ruudusta, se on rakenteeltaan yksinkertaisin mahdollinen atomi ja – ainakin kirjoittajan mielestä – vety on paras energianlähde tulevaisuuden hiilineutraalissa maailmassa. Myös Pohjanmaalla.

VIITTEET

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang
- [2] <https://www.documentarymania.com/player.php?title=First+Second+of+the+Big+Bang>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Chronology_of_the_universe
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_atom
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Proton>
- [7] <https://sciencenotes.org/what-is-the-most-abundant-element-in-the-universe/>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Ideal_gas_law
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mole_\(unit\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mole_(unit))
- [10] <https://fi.wikipedia.org/wiki/Moolimassa>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth
- [12] <https://energies.airliquide.com/resources/planet-hydrogen-hydrogen>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Hindenburg_disaster
- [14] <https://onlinecourses.jyu.fi/course/view.php?id=10§ion=9>
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron>
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Periodic_table
- [17] <https://atom.kaeri.re.kr/nuchart/?zlv=0>
- [18] <https://www.energy.gov/articles/how-does-fusion-energy-work>
- [19] <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER> ; <https://www.iter.org/proj/inafewlines>
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics))
- [22] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>
- [23] <https://fi.wikipedia.org/wiki/Maakaasu>
- [24] <https://www.whichcar.com.au/opinion/can-burning-hydrogen-save-the-ice-engine>
- [25] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/high-pressure-hydrogen-tank-testing>
- [26] <https://fi.wikipedia.org/wiki/Ammoniakki>
- [27] <https://www.ttl.fi/ova/diesel.html>
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Ideal_gas_law
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity_ratio

- [30] <http://www.freestudy.co.uk/gas%20properties.htm>
- [31] Ammonia, 1. Introduction. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
https://doi.org/10.1002/14356007.a02_143.pub3
- [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
- [33] <https://www.batterypowertips.com/fuel-cell-powered-robot-platforms-faq/>
- [34] https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-various-types-of-fuel-cells-with-the-following-operation-temperatures_fig1_351773833
- [35] <https://www.nasa.gov/content/space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells>
- [36] <https://www.suomenmaa.fi/uutiset/uutissuomalainen-lintilalta-hurja-visio-suomesta-voitaisiin-vetaa-vetyputki-ruotsin-kautta-keski-eurooppaan/>
- [37] <https://www.h2ecosystem.org/>
- [38] Henkilökohtainen tieto, Pekka Stén
- [39] <https://www.verkkouutiset.fi/a/woikoski-avasi-euroopan-suurimman-vetytehtaan-kokkolaan-28031/#7a2076e5>
- [40] <https://neovolt.fi/>
- [41] <https://www.kemia-lehti.fi/woikoski-ja-neovolt-aloittavat-vihrean-vedyn-kehityshankkeen/>