



Käytännön vetypolttokennon soveltuvuus lentäviin miehittämättömiin laitteisiin

Jarkko Parikka

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2023

Konetekniikka
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Lentokonetekniikka

JARKKO PARIKKA

Käytännön vetytolttokennon soveltuvuus lentäviin miehittämättömiin laitteisiin

Opinnäytetyö 35 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Marraskuu 2023

Opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle ja toteutettiin kirjallisuustutkimuksena. Tutkimuksen taustana pidetään ajatusta vetykäyttöisen dronen hankkimiseen hyöty- ja koulutuskäyttöön. Vedyn ominaisuuksia tarkastellaan, mitä kaikkia haittoja ja hyötyjä voidaan odottaa tulevan vastaan eri tilanteissa. Työssä tarkastellaan haasteita, mitkä liittyvät vetyinfrastruktuurin laajuuteen.

Infrastruktuurin vaatimukseen keskitytään laajalti sen monimutkaisuuden takia. Eri-laiset tuotantomenetelmät, miten vetyä voidaan valmistaa ja siirtää käytettäväksi huomioidaan suuressa mittakaavassa. Pienen mittakaavan käyttö kuten dronen käytön vaatima järjestelmä ja logistiikka otetaan huomioon, jotta saadaan pinta-puoleinen ymmärrys järjestelmän laajuudesta.

Eriyistä huomiota kiinnitetään logistiisiin seikkoihin ja turvallisuusnäkökohtiin. Yhteenvetona voidaan todeta, että tämä opinnäytetyö tarjoaa pintapuolisesti kattavan yleiskatsauksen vetytolttokennojen ja infrastruktuurin laajuudesta drone- ja yleiseen käyttöön. Työ ei anna valmista vastausta järjestelmän hankinnasta, vaan antaa yleisen työkalun tietää, mitä kaikkea huomioida hankintapäätöstä tehdessä. Monet infrastruktuurin vaatimukset tulee helposti yllättävä tietona, jos asiaan ei ole perehtynyt etukäteen.

Asiasanat: vety, vetytalous, vetydrone,

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Aircraft Engineering

JARKKO PARIKKA:
Suitability of a Practical Hydrogen Fuel Cell for Flying Unmanned Devices

Bachelor's thesis 35 pages, appendices 0 pages
November 2023

The thesis was done for Tampere University of Applied Sciences and was implemented as a literature review. The research began with an examination of the properties of hydrogen. A closer look was also taken at the disadvantages and benefits of hydrogen. Moreover, the challenges related to the scale of the hydrogen infrastructure were examined.

The work focused on the possible introduction of hydrogen as fuel in an unmanned drone, the special infrastructure required by hydrogen and its efficient utilization at the destination. Infrastructure requirements that hydrogen requires in use and what is needed to deploy a hydrogen drone were also investigated.

Special attention was paid to logistical aspects and safety aspects. In summary, this thesis provides a superficially comprehensive overview of the hydrogen fuel cells and infrastructure for drone and general use.

Key words: hydrogen, hydrogen economy, hydrogen drone,

SISÄLLYS

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | VETY | 7 |
| 2.1 | Vedyn kemiaa | 7 |
| 2.2 | Tietoa vedystä..... | 8 |
| 2.3 | Vety polttoaineena | 8 |
| 2.4 | Vedyn valmistus | 9 |
| 2.5 | Vedyn energiatiheys..... | 10 |
| 2.6 | Vedystä energiaa | 11 |
| 2.7 | Vedyn säilytys | 13 |
| 2.8 | Vedyn kuljetus..... | 13 |
| 3 | VEDYN IFRASTRUKTUURI | 15 |
| 3.1 | Vety tankkauspuoleen rakennekaavio..... | 15 |
| 3.2 | Esimerkkilaskenta suorasta pullojen yhdistämisestä..... | 17 |
| 3.3 | Esimerkkilaskenta tankkauspuoleen käytöstä..... | 20 |
| 4 | LASKUJA..... | 22 |
| 5 | RÄJÄHDYSVAARALLISET TILAT | 26 |
| 5.1 | Vedyn säilytystilat..... | 26 |
| 5.2 | Vedyn syttymisherkkyys..... | 28 |
| 6 | POHDINTA | 30 |
| | LÄHTEET..... | 33 |

ERITYISSANASTO LYHENTEET

| | |
|-------|---|
| VAK | vaarallisten aineiden kuljetus |
| ADR | "Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route", eli suomeksi "eurooppalainen sopimus vaarallisten tavaroiden kansainvälisistä tiekuljetuksista". |
| MTOW | Maximum Take-Off Weight |
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell |
| DMFC | Direct-methanol fuel cells |
| MIE | Minimum Ignition Energy |

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyössä tutkitaan mahdollista vetykäyttöisen dronen käyttöönottoa ja sen vaatimaa infrastruktuuria. Huomiota kiinnitetään erityisesti turvallisuuteen ja yksityiskohtiin, mitä täytyy ottaa huomioon vedyn kanssa toimiessa.

Työ on tehty kirjallisuustutkimuksena. Työssä on myös perehdytty vetytalouteen ja kemiaan pintapuolisesti. Markkinoilla toimii suuri määrä eri valmistajia eri komponenteille liittyen kaikkeen tarvittavaan vetydronen käyttöön, mutta esimerkkinä käytetään Doosanin valmistamia komponentteja.

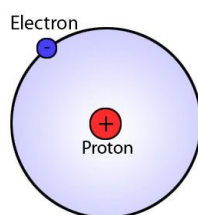
Työssä keskitytään yleisesti vedyn vaatiman laitteiston vaatimusten suhteen. Osa komponenteista ja säännöistä muuttuu jatkuvasti ja työssä on keskitytty valitsevan hetken tietoihin.

2 VETY

2.1 Vedyn kemiaa

Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, joka koostuu yhdestä protonista ja yhdestä elektronista. Vedyn kemiallinen merkki on (H) (KUVA 1). Protonin ja elektronin sähkövaraukset ovat yhtä suuret, mutta vastakkaismerkkiset, joten atomin kokonaisvaraus on nolla.

(<https://www.astro.utu.fi/zubi/atom/h.htm>)

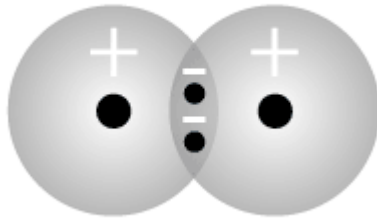


KUVA 1: Vetyatomimalli (H)

(https://study.com/cimages/multimages/16/hydrogen_bohr_model8259738646372964480.jpg)

Vedyn ytimessä on yksi positiivisesti varautunut protoni ja sen ulkokehällä yksi varaukseltaan samansuuruinen, mutta erimerkkinen, elektroni. Vetyä ei juurikaan esiinny yksiatomisena alkuaineena luonnossa, sillä vetyatomin vajaa ulkokehä tekee atomista erittäin reaktiivisen ja se mielellään muodostaa yhdisteitä muiden alkuaineiden kanssa. Vety esiintyy luonnossa kaksiatomisena alkuainemolekyylinä (H_2) (KUVA 2). Kaksiatomisessa alkuainemolekyyllissä vetyatomit jakavat uloimman elektronikuorensa elektronit, näin syntynyt alkuainemolekyyli on energeettisesti edullisempi ja näin ollen pysyvämpi rakenne.

(<https://www.watermatters.ca/blogs/articles/hydrogen-what-s-the-difference-between-h-h2-h-h-and-oh>)



KUVA 2: H₂ kaksiatominen alkuainemolekyyli malli

Vety ei esiinny luonnossa itsenäisenä aineena ja se täytyy pakottaa olotilaansa, mikä tekee sen kuljettamisesta ja siirtämisestä hankalaa. Koska vety on aina valmistettava, niin on parempi puhua energian siirrosta, kuin energialähteestä.

(<https://corporate.nordea.com/article/80926/vetytalous>)

(https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety)

2.2 Tietoa vedystä

Vedyn kemiallinen kaava on H₂ ja se kuuluu herkästi palaviin kaasuihin huoneenlämmössä. Se on ilmaa kevyempää, hajuton ja palaa näkymättömällä liekillä. Kaasu muodostaa räjähdysvaarallisen ilmaseossuhteen hyvin laajalla alueella 4–77 % ilmatilavuudesta.

(https://www.voikoski.fi/media/02-teollisuus-ja-elintarviketeollisuus/kaasut/kayttoturvallisuustiedote/vety_kayttoturvallisuustiedote_woikoski.pdf)

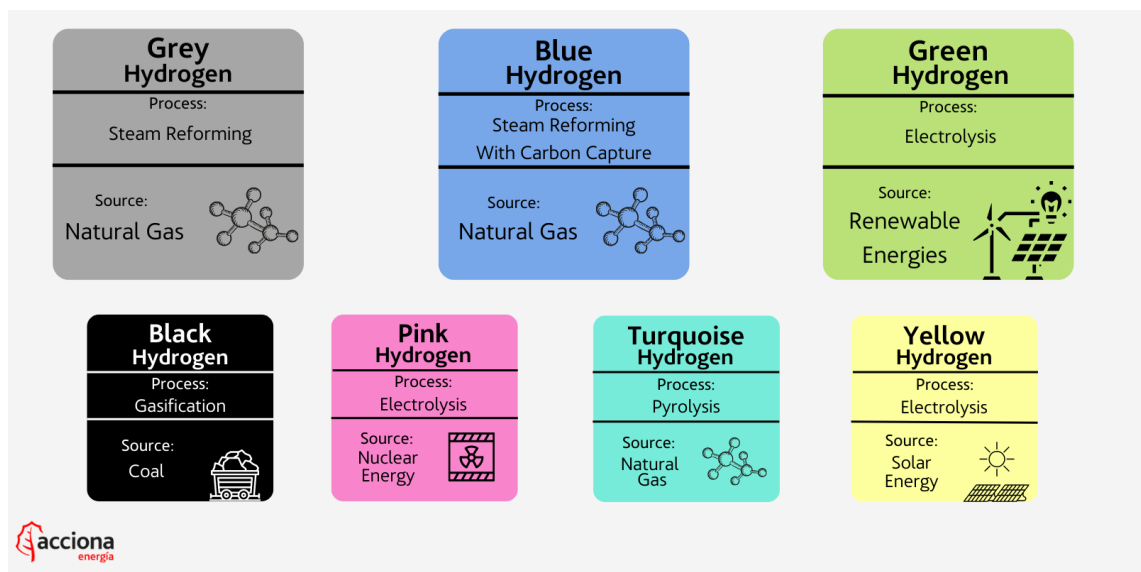
2.3 Vety polttoaineena

Vedyn reagoiessa hapen kanssa muodostuu vettä ja reaktiossa vapautuu energiaa. Vedyn huonoin puoli on sen alhainen tiheys ja vaatii yleisesti suuren tankin sisältääkseen saman määrän energiaa kuin yleiset polttoaineet, kuten bensiini, diesel, maakaasu ja metanoli.

2.4 Vedyn valmistus

Vedyn yksi tunnetuimmista valmistustavoista on erottaa vety ja happi vedestä sähköllä elektrolyysin avulla, jolloin saadaan vain vetyä ja happea, eikä muita sivutuotteita. Vedyn eri valmistustapoja kuvataan usein eri väreillä riippuen mistä vety erotetaan ja miten tuotettua energiaa käytetään (KUVA 3: Vedyn eri värit). (<https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>).

Vedyn yleisin valmistustapa on nykyään maakaasun höyryreformointi (harmaa vety). Siinä vedyn ja hiilen väliset kemialliset sidokset rikotaan, ja hiili hapetetaan hiilidioksidiksi, jolloin reaktion tuotteena saadaan vetyä ja hiilidioksidia. (https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/va-litse_auto_viisaasti/energialahteet/vety)



KUVA 3: Vedyn eri värit

(<https://proaccionaau.blob.core.windows.net/media/cm3hg1dy/hydrogen-colours-blog.png>)

Vedyn ilmastövastavuus on suoraan sidottuna sen tuottamismuotoon ei itse vedyn käyttöön. Vedyn hinta määräytyy pitkälti tavasta, kuinka se tuotetaan.

2.5 Vedyn energiatiheys

Vedyn energiatiheys hyötylämpöarvona on 120 MJ/kg. Bensiini sisältää energiaa 43,4 MJ/kg. Vety sisältää siis noin 2,8 kertaa enemmän energiaa per kilogramma kuin puhdas bensiini. (Tammertekniikka Tekniikan kaavasto 14. painos s.181)

1 bar kaasumaisessa muodossa ilmakehän paineessa vedyn tiheys on 0,09 kg/m³. Tämän takia normaaleissa olosuhteissa vetyä ei käytännössä varastoida tai kuljeteta kaasumaisessa muodossa ilmakehän paineessa.

200 bar paineessa vedyn tiheys on 14,9 kg/m³. Tämä on yleinen paine missä vetyä säilytetään ja kuljetetaan.

350 bar paineessa vedyn tiheys on 26,1 kg/m³. Tämä paine mahdollistaa kaasumaisen vedyn varastoinnin ja kuljetuksen taloudellisesti järkeväksi. Tämä paine on yksi yleisesti käytettävissä olevista paineista tankatessa esimerkiksi vetyautoa.

700 bar paineessa vedyn tiheys on 42 kg/m³. Tätä korkeaa painetta käytetään vetykäyttöisissä henkilöautoissa yleisesti. 125 litran säiliö sisältää tällöin noin 5 kg vetyä.

Vety esiintyy nestemäisessä muodossa alle -252.9 °C lämpötilassa. Tällöin vedyn tiheys on 71 kg/m³. Tätä käytetään tällä hetkellä lähinnä avaruusrakettien polttoaineena, mutta sille koitetaan kehittää myös siviilitarkoituksiin soveltuvia sovelluksia.

(<https://demaco-cryogenics.com/blog/energy-density-of-hydrogen/>)

Polttoaineita ei voida mitata vain kiloissa, koska ne täytyy säilyttää säiliöissä ja tilavuudet mitataan litroissa (dm³). Verrokkina käytettäessä 80 L polttoainesäiliötä, niin energiamääräksi saadaan eri polttoaineilla.

$$\text{Bensiini:} \quad 80 \text{ L} \cdot 750 \frac{\text{kg}}{1000\text{L}} = 60 \text{ kg} \quad 60 \text{ kg} \cdot 43,4 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 2600 \text{ MJ}$$

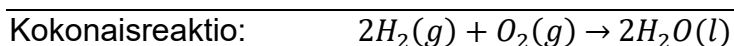
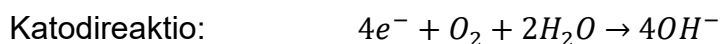
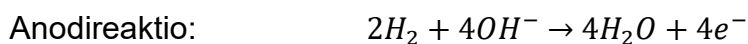
$$\text{Vety 700 bar:} \quad 80 \text{ L} \cdot 42 \frac{\text{kg}}{1000\text{L}} = 3,36 \text{ kg} \quad 3,36 \text{ kg} \cdot 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 400 \text{ MJ}$$

$$\text{Metanoli:} \quad 80 \text{ L} \cdot 792 \frac{\text{kg}}{1000\text{L}} = 63 \text{ kg} \quad 63 \text{ kg} \cdot 19,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 1250 \text{ MJ}$$

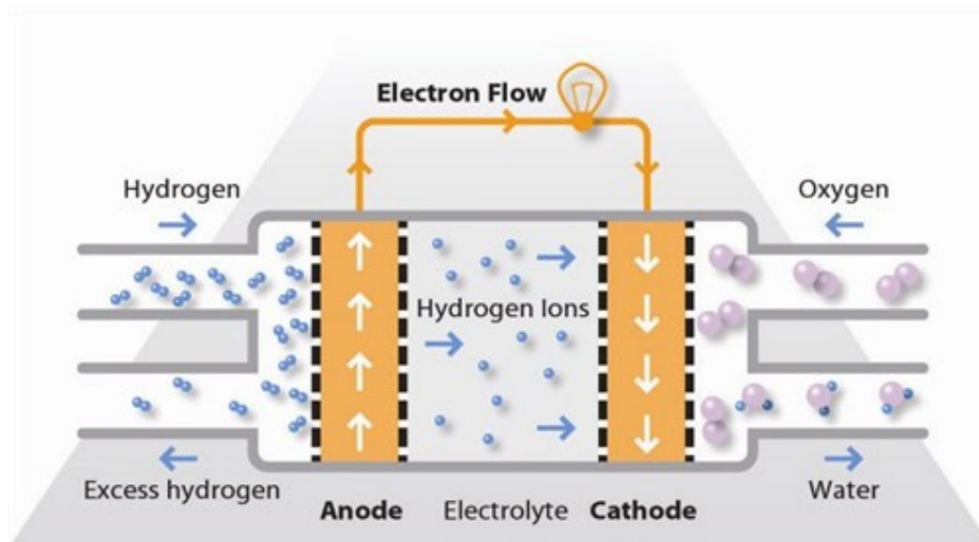
2.6 Vedystä energiaa

Vedystä saadaan sähköenergiaa yleensä vety polttokennolla. Polttokennossa vety ohjataan säiliöstä anodille, jossa se hapettuu, eli luovuttaa elektronin. Positiivisesti varautunut vetyioni kulkeutuu sitten elektrolyytin läpi katodille, jossa se pelkistyy, eli vastaanottaa elektronin. Hapettimena toimiva happi pelkistyy yhdessä vetyionien kanssa vedeksi. Happi ohjataan katodipuolelle ilmakehästä polttokennoon. Vesi poistuu järjestelmästä reaktiotuotteena sähkökemiallisen reaktion jälkeen.

Anodi- ja katodipuolen erottaa toisistaan elektrolyytti, tämä komponentti erottelee eri polttokennoja toisistaan. Elektrolyytti kalvo sallii positiivisesti varautuneiden vedyn protonien läpi kulkemisen, mutta samalla se estää negatiivisesti varautuneiden vedyn elektronien läpi kulkemisen. Varautuneet elektronit pakotetaan kulkemaan ulkoisen sähköpiirin läpi, jolloin syntyy sähkövirtaa, mitä käytetään sähkölaitteen virtalähteenä tai akun lataamiseen. Alla esitetty polttokennossa tapahtuvat puolireaktiot ja kokonaisreaktio.



Yksinkertaistettuna: yleinen kemiallinen reaktio vety polttokennossa on vedyn ja hapen yhdistyminen vesimolekyyliksi, jolloin energiaa vapautuu sähköön muodossa (KUVA 4). Vety polttokennot ovat melko tehokkaita eivätkä tuota haitallisia päästöjä, sillä ainoa reaktiotuote tai ”pakokaasu” on vesihöyry. Suurimmat vetyyn liittyvät päästöt syntyvät vedyn tuottamisen aikana.



KUVA 4: polttokennon toimintaperiaate

(<https://fuelcellsworks.com/knowledge/technologies/pemfc/>)

(PEMFC) Proton Exchange Membrane Fuel Cell tai PEM polttokenno on yleisimpiä polttokennoja siirrettävissä sovelluksissa ja käytetään yleisesti vetyautoissa. Samaa kennotyyppiä käytetään pääsääntöisesti vetydroneissa. Kenno toimii melko alhaisessa lämpötilassa noin 60–80°C. Kennolla voidaan päästä jopa 40–65 % hyötysuhteeseen.

(<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d2ee00790h>)

Poistuva vesi voi pakkasella aiheuttaa kuitenkin ongelmia ja estää kennon toiminnan ja vaatii erityisiä huomioita kylmäkäynnistyksessä (cold start), jotta komponentit eivät vioitu. Tämä pitää ottaa erityisesti huomioon valittaessa kennotyyppiä ja sen varustusta, esimerkiksi esilämmityksen suhteen.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128517300175>)

2.7 Vedyn säilytys

Koska vety muodostaa ilman kanssa räjähdysvaarallisen seoksen, kaasupulloja paikassa, jossa ei ole tulipalon vaaraa eikä lämmön- tai syttymislähteitä kaasupulloja saa a paikassa, jossa ei ole tulipalon vaaraa eikä lämmön- tai syttymislähteitä, jos kaasupulloja säilytetään sisätiloissa pitää ne olla ATEX määräysten mukaisia. Varastossa ei saa varastoida hapettavia kaasuja tai muita syttyviä tai hapettavia materiaaleja.

(https://www.woikoski.fi/media/02-teollisuus-ja-elintarviketeollisuus/kaasut/kayttoturvallisuustiedote/vety_kayttoturvallisuustiedote_woikoski.pdf)

Vety säilötään painepulloissa, koska nestemäisen vedyn tarvitseva alhaisen lämpötilan pitäminen on erittäin hankalaa ja energiaa. Nesteytetty vety vaatii jatkuvaa kylmänä pitoa, jotta se ei kaasuunnu säiliössä ja aiheuta paineen nousulla riskejä. Vedyn alkaessa kiehua ja höyrystyä nesteestä kaasuksi alkaa muodostua painetta, mikä aiheuttaa riskitilanteen, jolloin painetta pitää pudottaa ja kaasuuntunut vety päästää ulos säiliöstä.

(<https://seshydrogen.com/en/safety-of-hydrogen-systems/>)

Yksistään vedyn ilmoitusraja pelastuslaitokselle on 100 kg. Mutta jos tiloissa tai alueella on muita kemikaaleja kuten: liuottimia, happoja, maaleja yms. vaaralliseksi luokiteltuja kemikaaleja, niin niiden kaikkien yhteysmäärä voi laukaista ilmoitusvelvollisuuden, jolloin myös vety pitää ilmoittaa mukaan, vaikka se ei ylittäisi 100 kg.

(sähköposti 25.7.2023 Woikoski asiantuntijan kanssa)

2.8 Vedyn kuljetus

Vetyä saa kuljettaa 333 L vapaarajan sallimassa rajassa. Pullo pitää olla silti UN-tyyppihyväksytty kyseisen aineen kuljettamiseen. Suuremman määrän kuljettaminen tarvitsee Vaarallisten Aineiden Kuljetus luvan (VAK-lupa). Vapaarajan ylitys vaatii myös kuljetuskalustolta VAK hyväksynnän. Mikäli kuormassa kuljete-

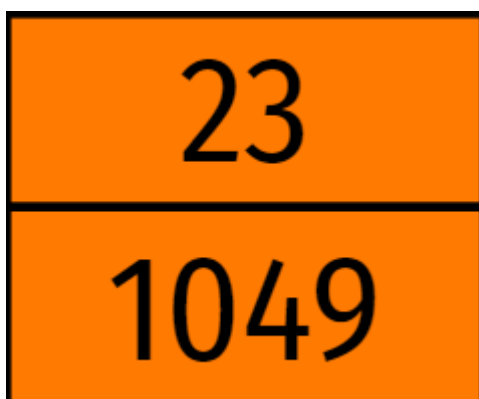
taan muita erilaisia vaarallisia kemikaaleja pitää niiden yhteisluku laskea kertomien kautta, mikä vedylle on 3. Vedyllä ei ole poikkeusmääriä (E0) kuljetuksen suhteen.

(<https://eservices.traficom.fi/AutoilijanPalvelut/VAKAine/1049>)

(sähköposti 25.7.2023 Woikoski asiantuntijan kanssa)

Paineistetun vedyn UN-numero on 1049. Tästä käytetään myös usein nimitystä YK-numero. Tätä käytetään esimerkiksi kuljetuksen aikaisessa merkinnässä säiliön sisällöstä. Numerolla voi ilmoittaa tarvittaessa hätäkeskukseen aineen tiedon heti. Vedyn vaarantunnusnumero on 23 (KUVA 5).

- 2 merkitsee että kyseessä on paineistettu kaasu.
- 3 tarkoittaa kyseessä olevan herkästi syttyvä aine.



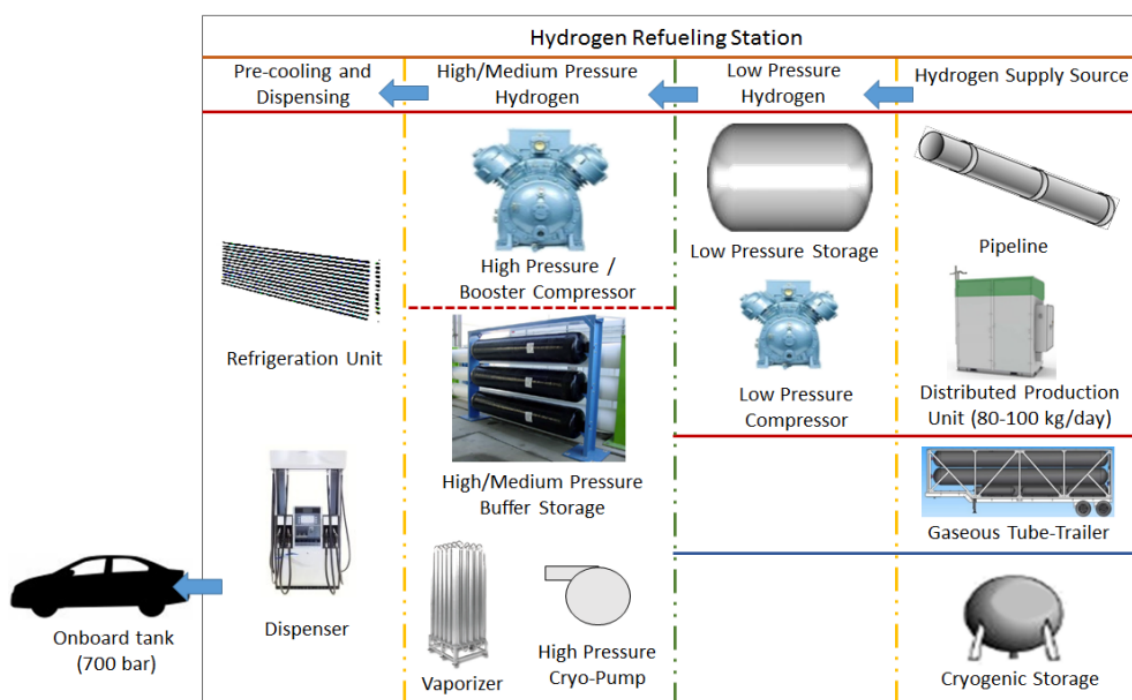
KUVA 5: VAK/ADR kuljetuksessa vaadittavat merkinnät autossa. Merkintä ilmoittaa aineen vaarantunnusnumeron ja itse kuljetettavan aineen UN-numeron.

Kaasupulloilla on erityiset omat merkinnät. Esimerkiksi Woikoski merkitsee palavien kaasujen pullon yläosan punaisella maalilla. (■ flammable - red, RAL 3000)

3 VEDYN IFRASTRUKTUURI

3.1 Vety tankkauspisteen rakennekaavio

Seuraavassa esimerkkejä millainen järjestelmä tarvitaan vetyauton tankkaamiseen. Vastaavanlainen järjestelmä vaaditaan pienemmissä tankkausoperaatioissa vedyn kanssa (KUVA 6).



KUVA 6: Tankkausaseman tarvitsema infrastruktuuri
(<https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam>)

Tarkastellessa autoille tarkoitettua vedyn tankkausasemaa huomataan nopeasti, miten monta eri komponenttia kokonaisuuteen kuuluu. Vety voidaan toimittaa asemalle erilaisilla tavoilla, mutta se tarvitsee paineistaa kovaan paineeseen, kun tankataan. Jäähdytys on myös järjestelmässä tärkeää.

Nesteytetyn vedyn asemilla oletetaan kulutuksen olevan nopeaa ja jatkuvaa, jotta nesteytettyä vetyä ei tarvitse jäähdyttää jatkuvasti. Nesteytettyä vetyä ei juuri-kaan käytetä suoraan siviili sovelluksissa. Nesteytetty vety kuitenkin höyrystetään kaasumaiseen muotoon ja paineistetaan kaasumuodossa haluttuun paineeseen ennen tankkausta.

Pienempään tarpeeseen on mahdollisuus hankkia erillisiä tankkausyksiköitä (KUVA 7), mitkä sisältävät kaikki tarvittavat komponentit tankin täyttämiseksi turvallisesti kohotetulla paineella. Useampi eri valmistaja tarjoaa erilaisia tankkausyksiköitä, mihin liitetään normaali vetypullo noin 200 bar paineessa. Tankkausyksikkö nostaa vedyn painetta kompressorilla samalla siirtäen sen haluttuun tankkauskohteeseen. Kyseiset tankkausasemat voi vaatia erityisen KIWA sertifiointin riippuen sen sijainnista ja käyttäjästä.



KUVA 7: Doosan siirrettävä tankkausasema
(<https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-refueling>)

Tankkausasema on lähes pakollinen käytettäessä vetyä erilaisissa sovelluksissa. Vety voidaan ohjata suoraan 200 bar:n painepullosta käytettävään pienempään tankkiin paineenalentaajan läpi, mikä on itsessään kyseenalaista eikä tällöin saada täyttä mahdollista hyötyä pienemmästä tankista. Suora pullojen yhdistäminen toisiinsa ja paineen tasaaminen on riskialtista toimintaa. Jokaisessa tapauksessa on aina syytä kiinnittää erityistä huomiota putkistojen ehdottomaan tiiveyteen. (sähköposti 25.7.2023 Woikoski asiantuntijan kanssa)

Vedyn säilytys vaatii EX luokitellun tilan mikä itsessään lisää vaatimuksia soveluksiin, missä halutaan käyttää vetyä polttoaineena.

3.2 Esimerkkilaskenta suorasta pullojen yhdistämisestä

Tarkastellessa esim. Doosanin valmistama 12 L (Tyyppi 3) droneen tarkoitettua säiliötä, mikä on tarkoitettu 350 bar:n paineelle (KUVA 8).



KUVA 8: Doosan vetysäiliö

(<https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-tank>)

Laskujen lähtötiedoissa oletetaan, että häviöitä ei synny missään vaiheessa operaatiota (TAULUKKO 1). Pullojen yhdistämisessä ei synny häviöitä tai minkäänlaisia putkien tilavuuksia ei huomioida. Myöskään minkäänlaista minimipainetta ei huomioida dronen toiminnan kannalta, vaikka polttokenno toimii normaalipaineella, tarvitsee painetta olla pullossa, jotta vetyä liikkuu tarvittavalla nopeudella polttokennolle.

Lentoaika on laskettu Doosanin DT30X (Kuva 9) dronen mainostuksessa valmistajan antamalla pisimmällä mahdollisella lentoajalla, kun säiliö on täynnä 350 bar:n paineessa. Lentoajaksi valmistaja antaa 150 min ilman hyötykuormaa.

Säiliö täydessä paineessa sisältää noin 310 g vetyä.

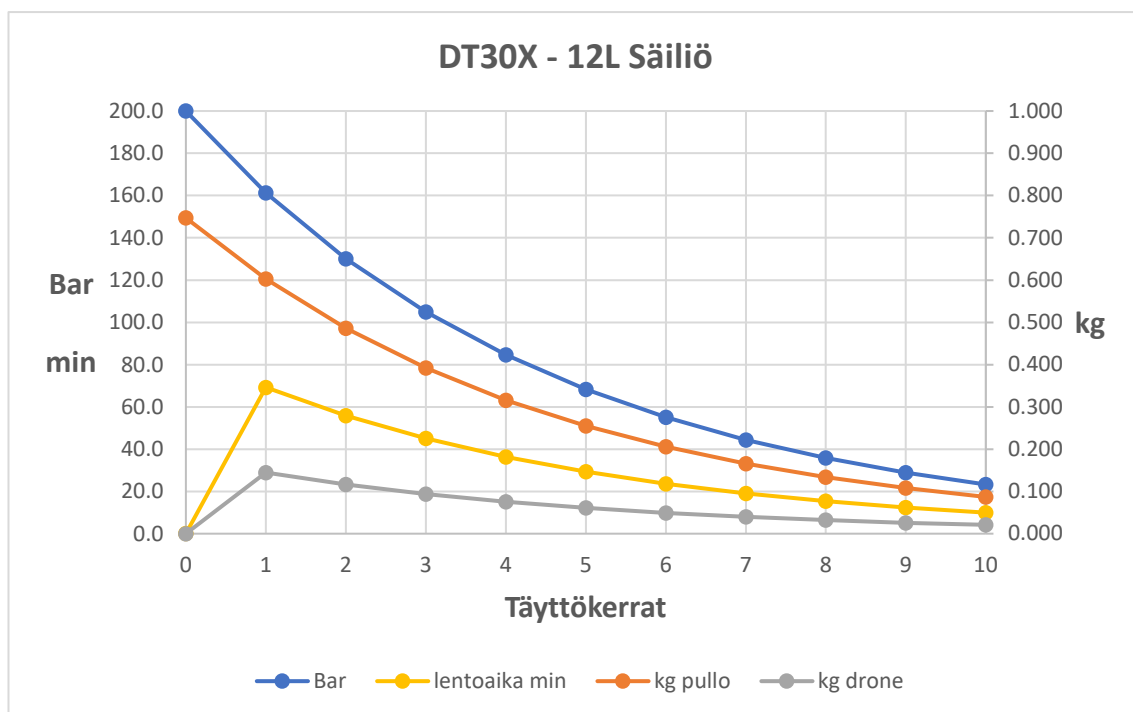


KUVA 9: DT30X drone

(<https://www.doosanmobility.com/en/products/drone-dt30>)

| Paineen tasaus | | | | Doosan säiliö | | | DT30X |
|----------------|----|-------|----------|---------------|-------|----------|---------------|
| | L | Bar | kg pullo | L | Bar | kg drone | lentoaika min |
| 0 | 50 | 200.0 | 0.747 | 12 | 1.0 | 0.000 | 0.0 |
| 1 | 50 | 161.3 | 0.602 | 12 | 161.3 | 0.145 | 69.2 |
| 2 | 50 | 130.1 | 0.486 | 12 | 130.1 | 0.117 | 55.8 |
| 3 | 50 | 104.9 | 0.392 | 12 | 104.9 | 0.094 | 45.0 |
| 4 | 50 | 84.6 | 0.316 | 12 | 84.6 | 0.076 | 36.3 |
| 5 | 50 | 68.2 | 0.255 | 12 | 68.2 | 0.061 | 29.3 |
| 6 | 50 | 55.0 | 0.205 | 12 | 55.0 | 0.049 | 23.6 |
| 7 | 50 | 44.4 | 0.166 | 12 | 44.4 | 0.040 | 19.0 |
| 8 | 50 | 35.8 | 0.134 | 12 | 35.8 | 0.032 | 15.4 |
| 9 | 50 | 28.9 | 0.108 | 12 | 28.9 | 0.026 | 12.4 |
| 10 | 50 | 23.3 | 0.087 | 12 | 23.3 | 0.021 | 10.0 |

TAULUKKO 1: Vetypullojen yhdistäminen suoraan



KAAVIO 1: Vetypullojen yhdistäminen suoraan

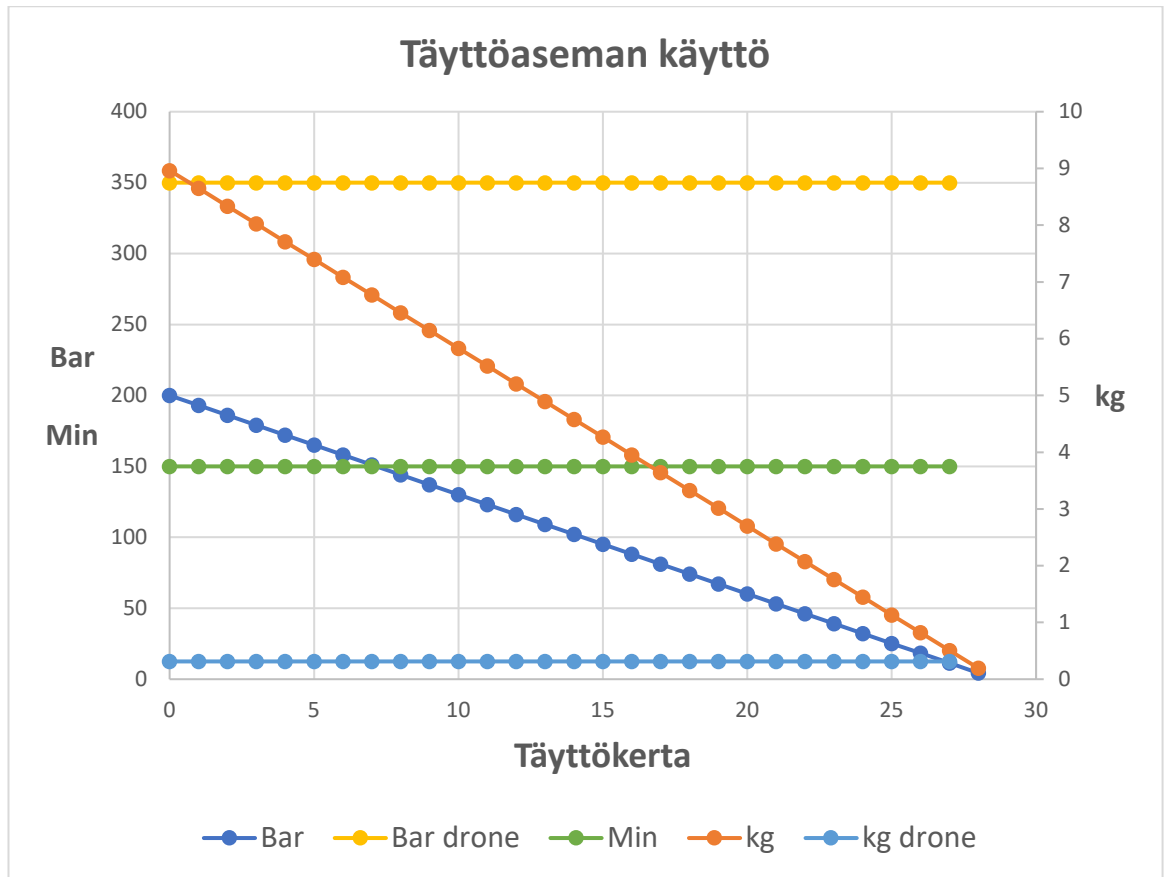
3.3 Esimerkkilaskenta tankkausaseman käytöstä

Esimerkkinä käytetään 12x50 L vetypullon muodostamaa 600 L kokonaistilavuutta, mikä paineistetaan Doosanin 12 L säiliöön 350 bar:n paineeseen (TAULUKKO 2: Tankkausaseman käytöstä).

Laskenta on teoreettinen eikä sisällä mitään häviöitä ja oletetaan tankkauksen toimivan 100 % tarkkuudella joka kerta.

| | | | | | DT30x | lentoaika |
|-----------------|--------|--------|----|-----------|----------------------|---------------------|
| | Bar | kg | L | Bar drone | kg drone | Min |
| 0 | 200.00 | 8.964 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 193.01 | 8.6508 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 2 | 186.02 | 8.3376 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 3 | 179.04 | 8.0244 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 4 | 172.05 | 7.7112 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 5 | 165.06 | 7.398 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 6 | 158.07 | 7.0848 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 7 | 151.08 | 6.7716 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 8 | 144.10 | 6.4584 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 9 | 137.11 | 6.1452 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 10 | 130.12 | 5.832 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 11 | 123.13 | 5.5188 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 12 | 116.14 | 5.2056 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 13 | 109.16 | 4.8924 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 14 | 102.17 | 4.5792 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 15 | 95.18 | 4.266 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 16 | 88.19 | 3.9528 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 17 | 81.20 | 3.6396 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 18 | 74.22 | 3.3264 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 19 | 67.23 | 3.0132 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 20 | 60.24 | 2.7 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 21 | 53.25 | 2.3868 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 22 | 46.27 | 2.0736 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 23 | 39.28 | 1.7604 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 24 | 32.29 | 1.4472 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 25 | 25.30 | 1.134 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 26 | 18.31 | 0.8208 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 27 | 11.33 | 0.5076 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| 28 | 4.34 | 0.1944 | 12 | 350 | 0.3132 | 150 |
| Yhteensä | | | | | 8.7696 kg | 4200 min |

TAULUKKO 2: Tankkausaseman käytöstä



KAAVIO 2: Tankkausaseman käytöstä

Laskennan tulos on suuntaa antava ja teoreettinen. Saadaan kuitenkin selville, että kyseisellä määrällä voidaan lentää noin 28 kertaa täysipitkiä lentoja ja lento-aikaa muodostuu yhteensä noin 70 h. Tulos on teoreettinen paras mahdollinen.

Linde gas:illa (entinen AGA) kyseinen määrä vetyä eli 12x50 L maksaa (7.10.2023) 1429 € (ei sisällä ALV). Lentotunnin hinnaksi pelkän polttoaineen osalta tulee noin 20 €/h +alv.

4 LASKUJA

Doosan on ilmoittanut DT30X:n lentoajaksi 12 L säiliöllä 150 min. Säiliöön mahtuu noin 310 g vetyä 350 bar:n paineessa. Vety sisältää 120 MJ/kg energiaa. Säiliön sisältämä kokonaisenergia.

$$\frac{0,310 \text{ kg}}{120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 37,2 \text{ MJ}$$

Joulet Wateiksi

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

kWh Jouleina

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ J} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

kWh Jouleina

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

Muuntosuhde MJ > kWh

$$\frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \text{ MJ}} = 0,2777 \dots$$

$$37,2 \text{ MJ} \cdot 0,2777 \dots = 10,333 \dots \text{ kWh}$$

Hyötysuhde polttokennossa noin 50 %

$$10,3333 \dots \text{ kWh} \cdot 0,5 \approx 5,2 \text{ kWh}$$

Drone hyöty käyttää noin 5,1 kWh energiaa 150 min Lennon aikana.

Verrokki akkuna käytetään Tattu Plus 3.0 25000mAh 51.8V 14S1P 25C Li-po Smart Battery Pack (KUVA 10).



KUVA 10: Tattu Plus 3.0 25000mAh 51.8V 14S1P 25C Li-po
(<https://genstattu.com/tattu-plus-3.0-25000mah-51-8v-14s1p-25c-lipo-smart-battery-pack-with-molex-plug/>)

Akku sisältää energiaa.

$$51,8V \cdot 25Ah = 1295VAh \approx 1,3kWh$$

Akku painaa 9,6 kg, joten akun energiatiheys on.

$$\frac{1\,300Wh}{9,6kg} \approx 135 \frac{Wh}{kg}$$

Jos akun turvallista purkautumistasoa pidetään 80 % latauksesta, mikä voidaan käyttää ja akun sisältämä energia hyöty käytetään 100 %.

$$1,3kWh \cdot 0,8 = 1,04kWh$$

Montako akkua vaaditaan samaan energiamäärään, kuin vetysäiliöstä saadaan dronelle.

$$\frac{5,2kWh}{1,04kWh} = 5kpl$$

Kyseinen akku painaisi noin.

$$5 * 9,6 kg = 48kg$$

Kyseinen akku painaisi yksistään on jo noin kaksi kertaa Doosanin DT30X dronen maksimi lentoonlähtöpainon (MTOW 24,9 kg).

Viisi kyseistä akkua maksaa (11.10.2023). \$1 355.99 = 1 278.63 €.

$$5 \cdot 1\,279\text{€} = 6\,395\text{€}$$

Lentoaika yksi akku kerrallaan ilman että huomioidaan mitään muuta kuin aika.

$$\frac{150min}{5} = 30min$$

Akkujen elinikä hyvin käytettynä ja säilytettynä on noin 600 lataussykliä valmistajan mukaan. Vety voimanlähteiden valmistaja ilmoittaa Li-Po akkujen kestoksi noin sataa lataussykliä.

Aikaisemmin tarkasteltiin tankkausaseman käytössä 12 x 50 L vetypullo kokonaisuutta ja laskettiin, että saadaan noin 28 täyden ajan lentokertaa. Mikäli näin hahutettaisiin lentää 600 kertaa vedyllä, mikä vastaisi akkuvalmistajan ilmoittamaa lataussyklimäärää, tarvitaan 12 x 50 L pullopakkauksia yhteensä noin 22 kappaletta. Tämä tarkoittaisi yhteensä 264 kpl 50 L vetypulloa. Vetyvoimanlähteiden valmistajan mukaan luku olisi noin 44 kpl 50 L vetypulloa.

$$\frac{600}{28} \approx 22 \cdot 12 = 264$$

Vetyvoimalähteiden ilmoittama pullojen määrä, jos lataussykliä on sata kappaletta.

$$\frac{264}{6} = 44$$

12x50L vetypullopakkausten yhteishinta akkuvalmistajan antaman eliniän perusteella (600 lataussykliä).

$$22 \cdot 1429 \text{ €} = 31\,438 \text{ €}$$

Pakkausten yhteishinta vetyvoimanlähteiden ilmoittaman lataussykliä perusteella sata lataussykliä.

$$31\,438 \text{ €} \div 6 \approx 5\,240 \text{ €}$$

Akkuvalmistajan ilmoittama akkujen 600 lentokertaa ja lentoaika 150 min

$$\frac{600 \cdot 5 \text{ akkua} \cdot 30 \text{ min}}{60} = 1\,500 \text{ h}$$

100 lentokertaa vetyvoimanlähteiden ilmoittaman lataussykliä perusteella.

$$1\,500 \text{ h} \div 6 \approx 250 \text{ h}$$

Tämä tarkoittaisi 600 erillistä lentoonlähtöä akuilla. Akun sisältämä energia riittäisi 30 min lentoon kerralla, mikä pakottaisi lennon keskeytykseen ja akun vaihtoon. Vedyllä voidaan lentää 150min yhdellä säiliöllisellä ja suorittaa sama määrä lentotunteja sadalla lentoonlähdöllä.

5 RÄJÄHDYSVAARALLISET TILAT

5.1 Vedyn säilytystilat

Vedyn säilytys vaatii säilytykseen erilliset tilat, mitkä on EX luokiteltu. Seuraavassa hieman tietoa Tukesin ilmoittamista vaatimuksista tilojen suhteen.

Räjähdysvaaran huomioon ottaminen oppilaitoksessa.

Oppilaitosten räjähdysvaaran arviointi noudattaa samaa periaatetta kuin teollisuudessa:

- tunnistetaan käytettävät palavat kemikaalit ja pölyt
- selvitetään räjähdyskelpoisten ilmaseosten aiheuttamat vaarat
- estetään räjähdyskelpoisten ilmaseosten muodostuminen
- estetään räjähdyskelpoisten ilmaseosten syttyminen
- vähennetään mahdollisen räjähdysvaaran vaikutuksia.

Erytisesti oppilaitoksissa on ensisijaisesti pyrittävä estämään räjähtävien ilmaseosten muodostuminen. Tämä voidaan varmistaa korvaamalla käytetyt palavat aineet muilla aineilla. Jos tätä ei voida tehdä, on pyrittävä pitämään palavien aineiden pitoisuudet ilmassa niin pieninä, ettei se riitä räjähdysvaaran aiheuttamiseen.

Tähän päästään esimerkiksi

- tekemällä esim. kemian kokeita pienillä ainemäärillä
- pitämällä palavien aineiden varastot pieninä
- hankkimalla asianmukaiset purunpoistolaitteistot/vetokaapit
- hyvällä yleisilmanvaihdoilla ja tarvittaessa kohdepoistoilla
- huolellisella siivouksella.

Jos räjähdysvaarallisen tilan syntymistä ei kuitenkaan voida estää, tulee räjähdysvaaralliset tilat tila luokitella ja merkitä selkeästi. Räjähdysvaarallisissa tiloissa on käytettävä tiloihin soveltuvia laitteita ja työvälineitä. Vaatteiden ja -kenkien on oltava sellaisia, että ne eivät aiheuta räjähdyskelpoisen ilmaseoksen sytyttäviä staattisen sähkön purkauksia. Oppilaita ei siis voi päästää räjähdysvaarallisiin tiloihin ilman koulutusta ja valvontaa.

(<https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat>)

Työnantajan pitää merkitä räjähdysvaaralliset tilat EX-merkinnällä. (KUVA 11: EX tila) Jos koko tilaa ei ole tilaluokiteltu, räjähdysvaarallisen tilan rajat on hyvä merkitä esim. lattiaan musta-keltaraitaisella viivalla. Räjähdysvaarallisessa tilassa on oltava myös muut tarvittavat turvallisuuteen liittyvät merkinnät, kuten avotulen tekoa ja tupakoinnin kieltoa sekä kännykän käyttökieltoa osoittavat kilvet. (<https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat>)



KUVA 11: EX tilan merkintä

(<https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat>)

Työnantajan on tehtävä räjähdysvaarallisille tiloille tilaluokitus. Työnantaja tekee tilaluokituksen noudattamalla standardeja ja käsikirjoissa julkaistuja esimerkkejä.

Räjähdysvaaralliset tilat luokitellaan räjähdysvaarallisen aineen ja räjähdysvaaran keston mukaan tilaluokkiin 0, 1, 2, 20, 21 ja 22. Tilaluokituksen perusteella määräytyvät tiloissa olevien, sinne asennettavien tai sinne tilapäisesti tuotavien laitteiden turvallisuusvaatimukset.

(<https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat>)

5.2 Vedyn syttymisherkkyys

Vety muodostaa herkästi ilman kanssa räjähdysvaarallisen ilmaseoksen, seoksen sytytykseen vaaditaan vain 0,017 mJ energian sisältävä kipinä (KUVA 12: kaasujen syttymisenergiat), mutta itsesyttymislämpötila on 585 °C. Tämän vuoksi tiloissa on erittäin korkeat vaatimukset vetypullojen säilytykseen. Bensiini tarvitsee syttyäkseen noin 0,1 mJ energian ja metanoli noin 0,14 mJ. (Kuva: syttymisenergiat ja ilma kaasu seossuhde taulukko).

(<https://crohmiq.com/minimum-ignition-energy-data-by-product/>)

0,2 mJ energiaa sisältävä kipinä aiheuttaa jo sytytysvaaran, mutta sitä pidetään usein alle ihmisen kuulo- ja näköhavainnon kynnyksenä, mikä on noin kymmenen kertaa suurempi energia, kuin mitä vety tarvitsee syttyäkseen.

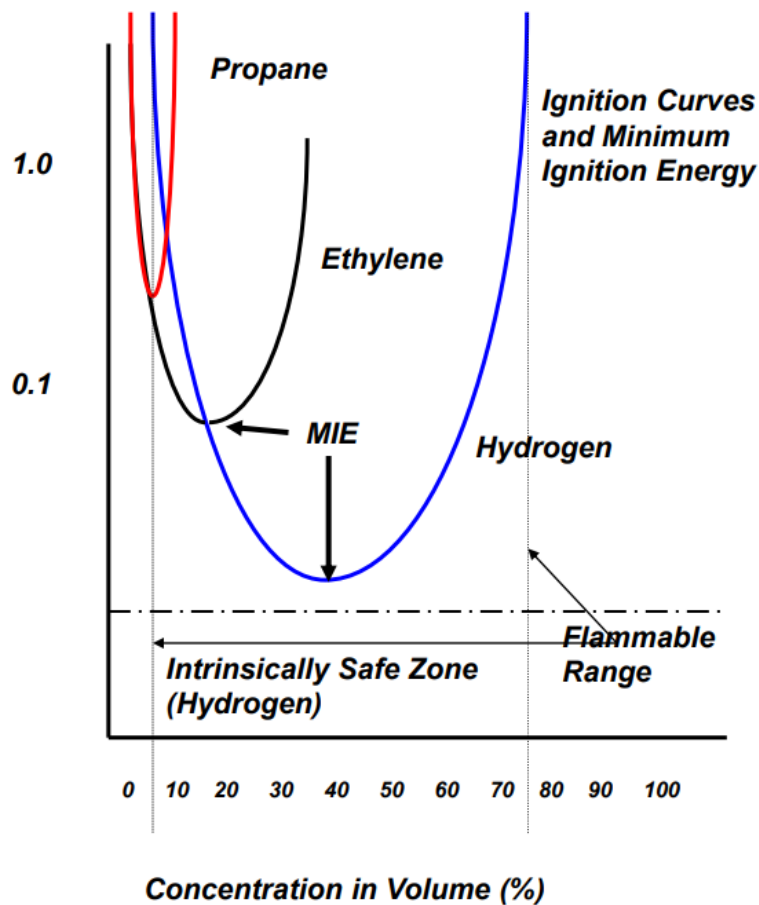
(<https://eepower.com/technical-articles/the-hazards-and-applications-of-static-electricity-part-2/#>)

1,0 mJ kipinä saa ihmisen tuntemaan iskun ja 10-30mJ isku saa ihmisen hätkähtämään. 1350mJ voi pitää tappavana iskuna.

(<https://creativeloafing.com/content-197734-the-straight-dope---can-static-electricity-kill>)

Modernien autojen sytytysjärjestelmässä kipinä muodostetaan noin 50–100 mJ energialla ja uusimman sukupolven järjestelmissä jopa 200 mJ energialla.

(<https://pages.championpowersports.eu/assets/Beru/ti-07-ignition-coils-gb-2013-lowres-0.pdf> S. 7)



KUVA 12: kaasujen syttymisenergiat ja ilma kaasu seossuhde taulukko (<https://www.jjstech.com/minimum-ignition-energy.html>)

Vedyn syttymiseen tarvitsema energia on todella pieni ja koska kaasu muodostaa räjähdysvaarallisen ilmaseossuhteen alueella 4–77 % ilmatilavuudesta, täytyy säilytystilojen ja käytön olla turvallisuussäätöjen mukaista. Vetyyn liittyvät onnettomuuden ovat vähentyneet paljon sitten 1990–2010 lukujen ajalta, jolloin onnettomuuksia oli huomattavasti enemmän nykytilanteeseen verrattuna. Suurin syy onnettomuuksien vähenemiseen on tällä ajanjaksolla toteutettujen turvallisuusmääräysten tarkentumisella.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922012976>)

6 POHDINTA

Vetyä pidetään eräänlaisena Graalin maljana energian siirrolle, mutta sen ympärille vaatima energia infrastruktuuri on hyvin laaja, monimutkainen ja samalla vaatii energiaa, kun huomioidaan erilaiset pumppausasemat ja paineen nostot. Vedestä erotettava vety on juuri niin ”vihreää” kuin sen erottamiseen käytetty energia on. Maakaasusta höyryreformoinnilla saatava ”harmaa vety” on edullista, mutta ei juuri eroa muista fossiilisista polttoaineista päästöiltään. Nykyisin paljon palstatilaa ja tutkimusrahaa saava ”sininen vety” pyrkii viherpesemään siihen käytettävän energian määrää. Näitä tutkimuksia rahoitetaan nykyisin paljon, koska niistä odotetaan läpimurtoa energiataloudessa, mutta ne eivät pysty pakenemaan termodynamiikan lakeja.

(<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.956>)

Britannian Science and Technology Committee: n julkaisema “The role of hydrogen in achieving Net Zero” (julkaistu: Joulukuu 2022 sivu:4) ei usko, että vety on ihmelääke energiaongelmiimme siihen kohdistuvista odotuksista huolimatta.

” Hydrogen will have its place in this portfolio. But we do not believe that it will be the panacea to our problems that might sometimes be inferred from the hopes placed on it”.

(<https://publications.parliament.uk/pa/cm5803/cmselect/cmsctech/99/summary.html>)

Vety tarvitsee suuren ja kestävä säiliön sen varastointiin ja käytettäväksi esimerkiksi dronessa. Vaikka sen energiatiheys kiloissa on enemmän kuin bensiinin tai metanolin, se tarvitsee paljon painavamman säiliön, mikä erityisesti lentävissä laitteissa on aina iso kulutusta lisäävä tekijä. Tällöin erityisesti metanoli on hyvä mahdollinen korvike, koska siitä voidaan saada energiaa samantyyllisellä polttokennolla kuin vedystä. Metanoli säiliön koko on huomattavasti pienempi ja säiliö kevyempi, koska sen ei tarvitse olla paineistettu, vaikka itse polttoaine on painavampaa.

Tällä hetkellä markkinoilta löytyy kuitenkin huomattavasti helpommin kaupallisia vedyllä toimivia droneja kuin metanolilla toimivia. Esimerkiksi Doosan ja H³Dynamics on kehittäneet kaikki tarvittavat osat vety dronea varten, kuten tankkausasemat, säiliöt, vetykennostoja, valmiita täydellisiä järjestelmiä, jotka voidaan yhdistää omiin sovelluksiin ja itse droneja.

Suurin este vetytaloudelle on tällä hetkellä polttokennoon tarvittavat raaka-aineiden heikko saatavuus. Platinaa (Pt) käytetään anodina (-) ja iridiumia (Ir) katodi (+) materiaalina polttokennossa. Koska kyseisiä materiaaleja on vaikea korvata millään muulla ja koko vetytalous on riippuvainen näistä kahdesta metallista, se rajoittaa vetytalouden kasvamista. Melkein kaikki platina- ja iridiumkaivokset sijaitsevat Venäjällä, Etelä-Afrikassa ja Zimbabwessa.

Kiina on viime aikoina panostanut huomattavasti vetyteknologiaan, ja se kärsii jo raaka-aineiden hintojen nousun seurauksista, vaikka vetytaloutta ei ole vielä oikeastaan alettu rakentaakaan.

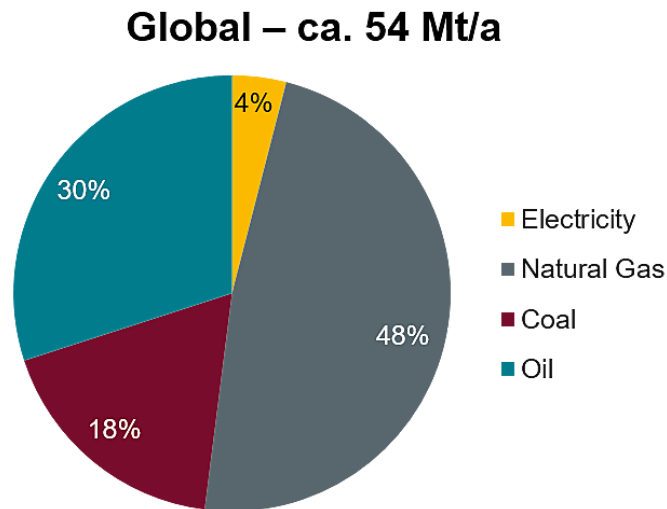
(<https://www.kitco.com/news/2022-03-10/Platinum-market-surplus-to-fall-by-47-in-2022-as-demand-continues-to-grow-WPIC.html>)

Vetysäiliöitä, putkistoja ja muita siihen liittyviä infrastruktuuri komponentteja, mitkä valmistetaan yleensä metallista, vaanii myös vetyhaurastuminen. vedyn tunkeutumien metalliin ja muuttamalla sen ominaisuuksia ja aiheuttamalla taipuvuuden ja vetolujuuden menetyksen (hydrogen embrittlement).

(<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-embrittlement>)

Tämän vuoksi vetypullojen täytyy olla paksuja ja pinnoitettu erityisillä aineilla, mikä tekee niistä painavia ja kalliita.

Vedyn tuotannolla on tällä hetkellä suuri "hiilijalanjälki", koska suurin osa vedystä tuotetaan käyttäen fossiilisia polttoaineita (KUVA 13). (Stern & Stadler Handbook of Energy Storage (2019))



KUVA 13: Vedyn lähteet

(<https://www.hoou.de/projects/green-hydrogen/pages/2-1-various-possibilities-of-hydrogen-production>)

Tämä tutkimus osoittaa vetytalouden monimutkaisuuden ja monimutkaisen infrastruktuurin sen ympärille. Vaikka lopullisena reaktiotuotteena syntyykin vain vettä, se ei se tarkoita, että vedyn tuotannossa ei olisi jo muodostunut huomattavan kokoinen "hiilijalanjälki".

Vety toimii monessa käyttötarkoituksessa sen laajan skaalattavuuden takia ja onkin soveltuva vaihtoehto drone käyttöön. Vaikka drone lennon aikana tuottaisi reaktiotuotteena vain vettä, se ei tarkoita, etteikö taustalla voi olla jo huomattavan laaja määrä päästöjä.

LÄHTEET

Linkkien sisältö tarkastettu 17.11.2023

(<https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2022/11/Hydrogen-Gas-H2-.png>)

(<https://corporate.nordea.com/article/80926/vetytalous>)

(<https://creativeloafing.com/content-197734-the-straight-dope---can-static-electricity-kill>)

(<https://crohmiq.com/minimum-ignition-energy-data-by-product/>)

(<https://demaco-cryogenics.com/blog/energy-density-of-hydrogen/>)

(<https://eepower.com/technical-articles/the-hazards-and-applications-of-static-electricity-part-2/#>)

(<https://energyandpolicy.org/gas-utilities-greenwashing-to-expand-fossil-fuels-rng-hydrogen/renewable-natural-gas-and-hydrogen-reports/>)

(<https://eservices.traficom.fi/AutoilijanPalvelut/VAKAine/1049>)

(<https://fuelcellsworks.com/knowledge/technologies/pemfc/>)

(<https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam>)

(<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.956>)

(<https://proaccionaau.blob.core.windows.net/media/cm3hg1dy/hydrogen-colours-blog.png>)

(<https://publications.parliament.uk/pa/cm5803/cmselect/cmsctech/99/summary.html>)

(<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d2ee00790h>)

(<https://seshydrogen.com/en/safety-of-hydrogen-systems/>)

(https://study.com/cimages/multimages/16/hydrogen_bohr_model8259738646372964480.jpg)

(<https://tukes.fi/teollisuus/rajahdysvaaralliset-tilat>)

(<https://www.acciona.com.au/updates/stories/what-are-the-colours-of-hydrogen-and-what-do-they-mean/>)

(<https://www.astro.utu.fi/zubi/atom/h.htm>)

(<https://www.doosanmobility.com/en/products/drone-dt30>)

(<https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-refueling>)

(<https://www.doosanmobility.com/en/products/hydrogen-tank>)

(https://www.doosanmobility.com/images/dt20_slide01.png)

(<https://www.hoou.de/projects/green-hydrogen/pages/2-1-various-possibilities-of-hydrogen-production>)

(<https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>)

(<https://www.jjstech.com/minimum-ignition-energy.html>)

(<https://www.kitco.com/news/2022-03-10/Platinum-market-surplus-to-fall-by-47-in-2022-as-demand-continues-to-grow-WPIC.html>)

(https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/vaalitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety)

(<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>)

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128517300175>)

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922012976>)

(<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-embrittlement>)

(<https://www.watermatters.ca/blogs/articles/hydrogen-what-s-the-difference-between-h-h2-h-h-and-oh>)

(sähköposti 25.7.2023 Woikoski asiantuntijan kanssa)

(Tammertekniikka Tekniikan kaavasto 14. painos s.181)

Vetykaasun turvallisuustiedote Woikoski: https://www.woikoski.fi/media/02-teollisuus-ja-elintarviketeollisuus/kaasut/kayttoturvallisuustiedote/vety_kayttoturvallisuustiedote_woikoski.pdf