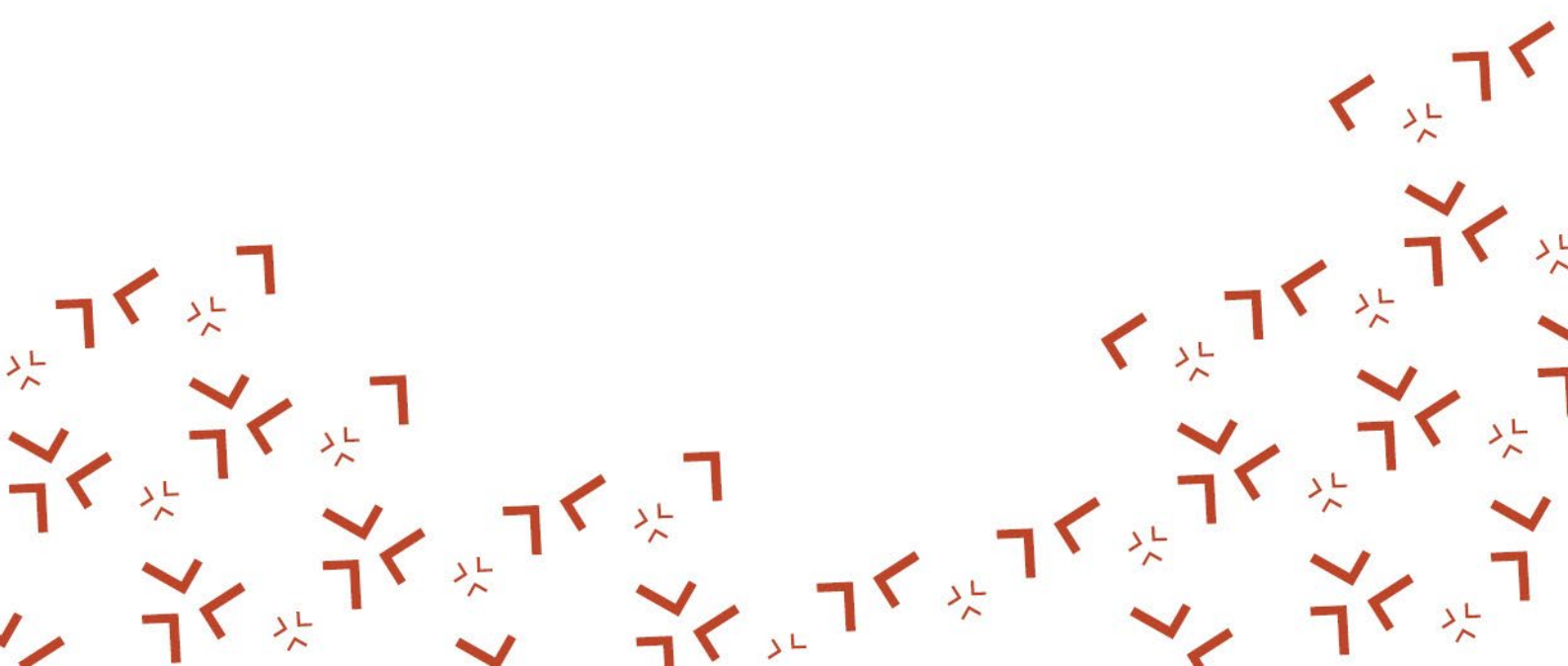


Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne (kustantajan versio).

Rinnakkaistallenteen sivuasettelut ja typografiset yksityiskohdat saattavat poiketa alkuperäisestä julkaisusta.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Kauppi, T. 2022. Vety energian kantajana – vetyteknologia nyt ja tulevaisuudessa. Hitsaustekniikka. 74 (6), 43-47.



Vety energian kantajana – vetyteknologia nyt ja tulevaisuudessa

Timo Kauppi

Vedyn käytön ennustetaan kasvavan yli 200 miljoonaan tonniin vuoteen 2050 mennessä. Vetyä tullaan käyttämään energian kantajana ja varastona. Suomelle vetytalous on mahdollisuus vähähiilisen sähköntuotantokapasiteetin ansiosta. Tässä artikkelissa tarkastellaan vetyä, sen käyttöä, kuljetusta ja vetysovelluksissa käytettäviin materiaaleihin liittyviä haasteita.

Vetyä on käytetty teollisessa mittakaavassa jo yli sadan vuoden ajan lannoitteiden ja jalostamoiden raaka-aineena. Energianlähteenä vedyn hyödyntäminen on kuitenkin vielä hyvin vähäistä. (DNV 2022, 8)

Vetyä ei voida pitää varsinaisesti energianlähteenä, koska sitä ei maapallolla tavata sellaisenaan kuin poikkeusolosuhteissa (mm. valokaari hitsauksessa), vaan yleensä se on sitoutuneena johonkin muuhun alkuaineeseen. Siksi on parempi puhua vedyn kohdalla energian kantajasta (engl. energy carrier).

DNV:n ennusteen mukaan vuonna 2050 vedyllä tuotetaan n. 5 % maailman energiantarpeesta. Tähän tarvitaan noin 200 miljoonaa tonnia vetyä vuodessa (DNV 2022, 3). Euroopan unionin tavoite on suurempi eli 2050 mennessä jopa 14 % energiasta pitäisi tulla vihreästä vedystä. Vety (engl. hydrogen) on maailman yleisin alkuaine (H). Se on erit-

täin kevyt kaasu, jonka atomipaino on 1,008 ja se on esimerkiksi 27 kertaa kevyempi kuin kevytmetalli alumiini (Al). Pienen kokonsa takia se kykenee liikkumaan myös helposti metalleissa. Vedyn liukoisuus teräkseen riippuu lämpötilasta ja teräksen mikrorakenteesta. Vety kykenee liukenemaan teräkseen vain atomaarisena tai ioneina.

Kuvan 1 mukaan vuonna 2050 vielä noin kolmasosa vedystä tuotetaan fossiilista raaka-aineista, tosin CCS-prosessilla. 71-92 % vedyn valmistuksessa syntyvästä hiilidioksidista voidaan ottaa talteen, tällöin puhutaan "sinisestä" vedystä. (Bellona 2022)

Vedyn ominaisenergia on selvästi korkeampi kuin minkään muun yleisesti käytettävän polttoaineen, mutta energiatiheys jää vaatimattomaksi, taulukko 1. Vetyä tarvitaan n. 2700-kertainen tilavuus bensiiniin verrattuna saman energiasisällön tuottamiseen.

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisenergioita ja energiatihyksiä (Stetson ja muut 2016, 6).

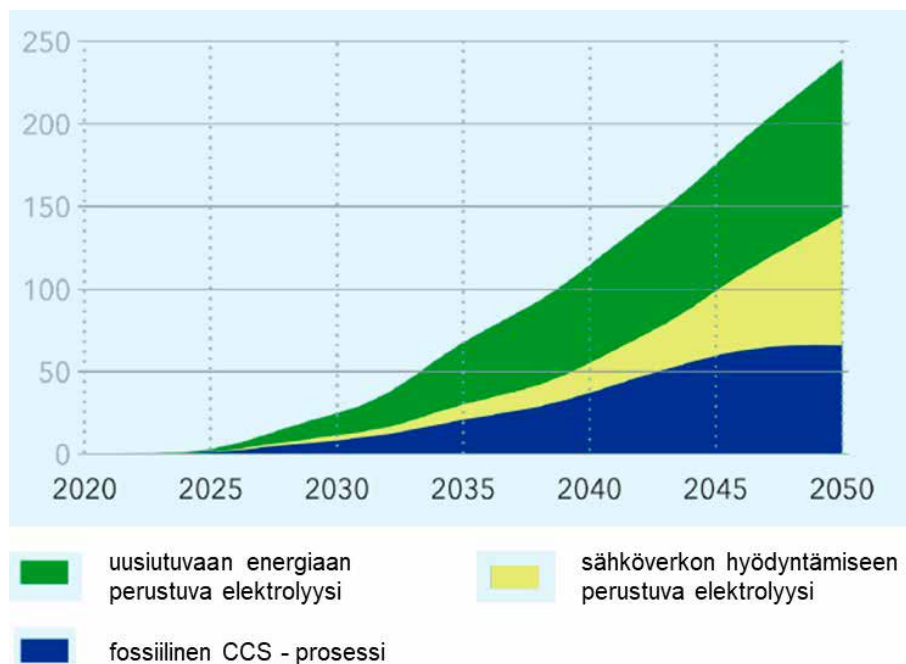
Polttoaine	Ominaisenergia MJ/kg	Energia tiheys MJ/l
diesel	43.4	36.8
bensiini (E10)	41.6	30.8
LPG (10 bar)	46	22.8
CH4 (nesteytetty, -163 °C)	50	21.2
CH4 (250 bar, 25 °C)	50	9.4
H2 (nesteytetty, -253 °C)	120	8.6
H2 (700 bar, 25°C)	120	4.7
H2 (350 bar, 25°C)	120	2.8

Vedyn valmistus ja ominaisuudet

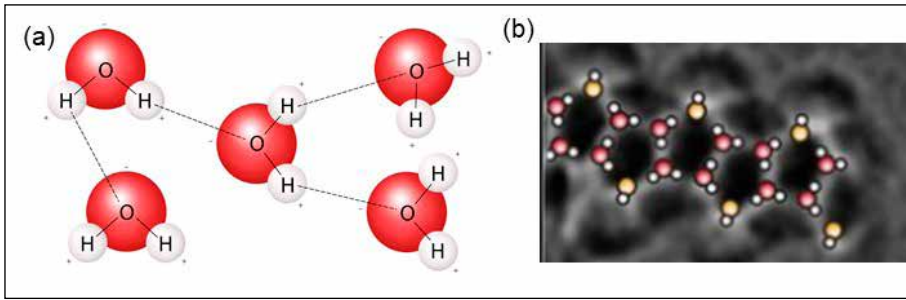
Vety toimii energian kantajana, jota voidaan valmistaa uusiutuvan energian avulla. Tällöin puhutaan jo alussa mainitusta "vihreästä vedystä". Vetyä voidaan käyttää esim. akkujen lataamiseen ja toisaalta se käyttäytyy fossiilisten polttoaineiden tapaan eli sitä voidaan polttaa. Sitä voidaan valmistaa hiilivedyistä tai hajottamalla vettä sähkövirran avulla. Sitä voidaan varastoida säiliöissä ja siirtää putkistoissa pitkiäkin matkoja aivan kuten muitakin kaasumaisia polttoaineita.

Yleisimmin vety on sitoutuneena hapteen eli tällöin puhutaan tietenkin vedestä (H2O), jota maapallolla on 1500 triljoonaa kiloa (1500 x 1020 kg!). Suurin osa tästä on merissä, mutta pieniä määriä on joissa, järvissä, jäätiköissä ja ilmakehässä (HS 2022). Osa vedystä on sitoutuneena hiilivetyihin, kuten maakaasuun, joka puolestaan on suurimmaksi osaksi metaania (CH4).

Kuten taulukosta 1 nähtiin, on vedyn energiasisältö massayksikköä kohden siis erittäin hyvä, lähes kolminkertainen bensiiniin ja dieselöljyyn verrattuna. Pienen tiheyden takia tilavuuteen suhteutettu energiatiheys on kuitenkin erittäin huono. Siksi vedyn varastoinnissa kaasumaisena on käytettävä erittäin korkeaa painetta; nykyisin jopa 700 bar on käytössä (Motiva 2022).



Kuva 1. Energiaksi käytettävän vedyn ja sen johdannaisten tuotantoteknologioiden osuudet ja niiden kasvuennuste (DNV 2022, 4).



Kuva 2. a) veden molekyylimalli ja b) AFM (atomic force microscope) mikroskooppilla otettu kuva vesimolekyyliverkosta.

Vedyn yleisin valmistustapa on vielä maakaasun höyryreformointi. Siinä vedyn ja hiilen väliset kemialliset sidokset rikotaan, ja hiili hapetetaan hiilidioksidiksi, joten reaktion tuotteena saadaan vetyä ja hiilidioksidia. Vetyä voidaan valmistaa myös kaasutamalla kiinteää biomassaa ja erottamalla vety tuotekaasusta. Tuotekaasun runsaista epäpuhtauksista johtuen tällä tavoin valmistetun vedyn puhtausaste on kuitenkin melko huono, ja tekniikka vaatii vielä paljon kehittämistä. Puhtainta vetyä saadaan hajottamalla vettä vedyksi ja hapeksi elektrolyysissä sähköenergian avulla. Reaktio on periaatteessa sama kuin polttokennossa, mutta käänteinen. Suuren sähkönkulutuksen vuoksi tuotetun vedyn hinta on kuitenkin paljon korkeampi kuin kemiallisilla tuotantotavoilla. Tulevaisuudessa voinee olla mahdollista valmistaa vetyä hajottamalla vettä lämpökemiallisissa prosesseissa käyttäen hyväksi ydin- tai aurinkoenergalaitosten korkeaa lämpötilaa. Myös biologinen tuotanto, jossa käytetään leviä ja bakteereita, on tutkimuksen kohteena (Motiva 2022).

Poltettaessa vety käyttäytyy eri tavoin kuin perinteiset polttoaineet, kuten maakaasu. Käytännössä vedyn hyödyntäminen polttamalla vaatii infrastruktuurin, koneiden ja laitteiden sekä turvallisuusstandardien kehittämistä (DNV 2022, 10).

Maakaasuun ja esim. bensiiniin verrattuna vedyn syttyminen vaatii erittäin vähän energiaa ja sillä on laaja syttymisalue. Sen

leviäminen polttotilassa eroaa muista kaasuisista vetyatomien pienen koon ja keveyden takia. Vety on väritön, mauton ja hajuton kaasu ja sen palaessa syntyvä liekki on myös väritön ja näin ollen näkymätön. Nämä ominaisuudet aiheuttavat turvallisuusriskejä vetyä käsiteltäessä.

Paineistettu vetykaasu on periaatteessa kustannustehokkain tapa kuljettaa vetyä pitkiäkin matkoja. Tämä vaatii kuitenkin massiivisten putkilinjojen rakentamista ja tiettyjen teknisten haasteiden ratkaisemista, jotka liittyvät mm. materiaalien vedynkestävyyteen. Kuvassa 3 on esitetty DNV:n tekemä ennuste vedyn siirtoverkoston kapasiteetin kasvusta vuoteen 2050 mennessä.

Vedyn nesteyttäminen vaatii erittäin matalan lämpötilan, koska sen kiehumispiste on $-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Näin matalan lämpötilan saavuttaminen ja ylläpito vaatii paljon energiaa. Nesteytettyllä vedyllä on erilaiset turvallisuusnäkökohdat kuin paineistetulla vetykaasulla. Höyrystyessään se muodostaa raskasta kaasua, joka voi konsentroitua, kun taas paineistettu vetykaasu laajenee ja haihtuu esim. vuodon yhteydessä.

Vetyä voidaan sitoa kemiallisesti esim. ammoniakkiin, jota taas voidaan varastoida nestemäisenä pienessä paineessa suhteellisen korkeissa lämpötiloissa. Esimerkkinä 1 bar paineessa oleva ammoniakki nesteytyy jo $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Nestemäistä ammoniakia on helppo siirtää putkilinjoissa, laivoilla, ajoneuvoilla ja muilla massateknologioilla.

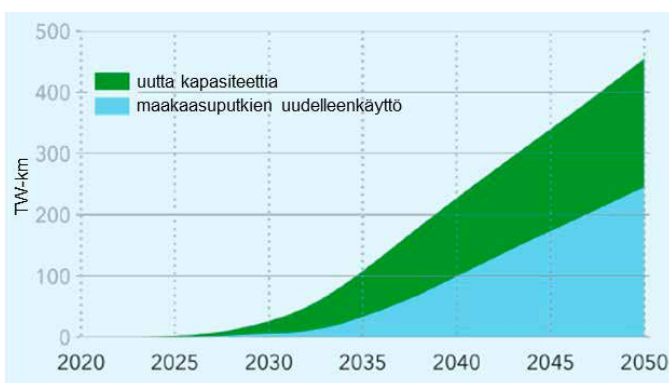
Valitettavasti ammoniakkin synteesi ja vedyn erottaminen ovat paljon energiaa vaativia prosesseja. Vetyä voidaan sitoa myös hydraamalla (engl. hydrogenation) orgaanisia kantajaneiteitä (LOHC = Liquid Organic Hydrogen Carriers), tällaisia ovat mm. tolueni (C_7H_8), metyyliisykloheksaani (C_7H_{14}) ja dibensyyli-tolueni ($\text{C}_{20}\text{H}_{21}$).

Vedyn kuljetus ja siirto

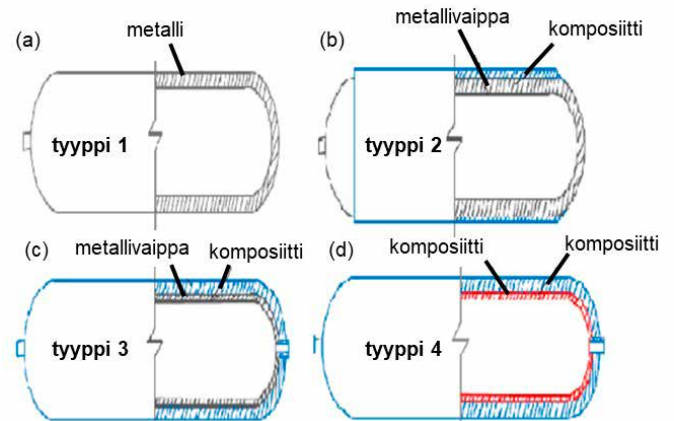
Vetyä voidaan kuljettaa paineistettuna siirto-putkistoissa tai sylinterissä. Paineistetut, kaasumaisen vedyn kuljetukseen soveltuvat sylinterit jaetaan standardissa EN 17533 (Gaseous hydrogen. Cylinders and tubes for stationary storage) rakenteensa mukaan neljään (4) tyyppiin:

1. Tyyppi, metallista valmistetut sylinterimäiset painesäiliöt, (kuva 4 a).
2. Tyyppi, vaipan osalta komposiittivahvisteiset metallista valmistetut sylinterimäiset painesäiliöt (engl. hoop wrapped cylindrical pressure vessel with load-sharing metal liner, (kuva 4 b).
3. Tyyppi, koko rakenteen osalta komposiittivahvisteiset metallista valmistetut sylinterimäiset painesäiliöt (engl. fully wrapped cylindrical pressure vessel with a load-sharing metal liner, (kuva 4 c).
4. Tyyppi, kokonaan komposiittirakenteiset sylinterimäiset painesäiliöt (engl. fully wrapped cylindrical pressure vessel with a non-load-sharing liner and composite reinforcement, (kuva 4 d). (SFS-EN 17533 2020, 12-13).

Yleinen tapa vedyn kuljettamiseen maanteitä ja rautateitä pitkin on käyttää saumattomia painesylinteriä. Nämä voivat olla standardisoitujen kaasupullojen kokoisia (50 – 150 l) tai suurempia yli 150 l sylinteriä. Tyypillisesti näitä kootaan "nipuksi" esim. puoli-perävaunuun, kuva 4. Metallista tehtyihin sylintereihin (tyypin 1 sylinterit) voidaan va-



Kuva 3. Vedyn siirto kapasiteetin kasvuennuste, TW-km = terawatti kilometri (DNV 2022, 5 muokattu).



Kuva 4. EN 17533 standardin mukaiset painesäiliötyypit. (Hlaing & Win 2014, 1874 muokattu).



Kuva 5. BOC kaasusylinteri puoliperävaunuyhdistelmä.

rastoida esim. 350 kg vetyä 228 bar paineesa. Suuret paineet (350-700 bar) vaativat tyypin 3 tai 4 sylinterien käyttöä.

Euroopan unionin tekemän tutkimuksen mukaan paineistetun vetykaasun siirtokustannukset putkilinjoissa nousevat voimakkaasti muihin kuljetusmuotoihin verrattuna siirtomatkan ollessa yli 2500-3000 km, kuva 6. Laskelma perustuu vedyn siirtomäärään 1 miljoona t/a sillä oletuksella, että sähkön hinta on luokkaa 20 €/MWh. Näiden laskelmien perusteella Euroopan unionin sisäalueella vedyn siirtäminen on kustannustehokkainta siirtoputkistoja käyttämällä (JRC 2021).

Putkistot on tarkoitettu siirtämään suuria määriä vetyä pitkäaikaisesti. Vetyputkiston rakentaminen on kustannuksiltaan ja työmäärältään suuri hanke, jota voidaan virtaviivaistaa hyödyntämällä olemassa olevia maakaasuputkistoja. Maakaasuputkis-

ton uudistamiseen on useita vaihtoehtoja. Ongelmaksi voi muodostua teräsputkien ja hitsausliitosten haurastuminen vedyn vaikutuksesta (Matikainen 2021, 45-46).

Vedyn vaikutus metallisiin materiaaleihin

Teräksen vetyhauraus on monimutkainen ilmiö, missä vaurion syntyamiseen tarvitaan kolme samanaikaisesti vaikuttavaa tekijää: vetyhauraudelle altis teräs, vetojännitystilä ja vetyä sisältävä ympäristö. Teräkseen voi päästä vetyä jo valmistusvaiheessa, hitsauksen yhteydessä tai käyttöympäristöstä. Vety on välisija-atomi ja liikkuu teräksessä diffuusion avulla kerääntyen nk. vetyloukkuihin (engl. hydrogen trap). Atomaarinen vety

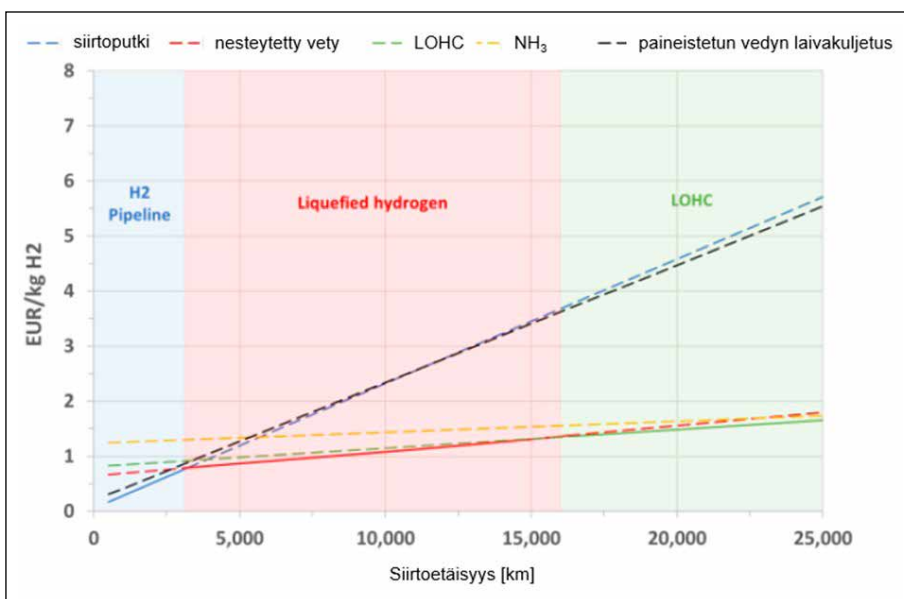
liikkuu herkästi alueille, missä on vetojännitystilä. Kriittisen vetypitoisuuden ylittyessä syntyy riski rakenteen äkilliselle murtumiselle (Materia 2021, 37).

Vety voi siirtyä metalliin atomaarisena (H) tai ioneina (H⁺), ei siis molekyyliomuotoisena (H₂). Korkeissa lämpötiloissa vetymolekyylit voivat dissosioitua eli muodostuu atomaarisista vetyä ja näin käy esim. hitsauksen yhteydessä valokaareissa olevalle kosteudelle. Muita vaihtoehtoja atomaarisen vedyn muodostumiseen ovat erilaiset korrosioreaktiot, elektrolyttinen pinnoitus (esim. galvanointi) ja katodinen suojaus (TWI 2022).

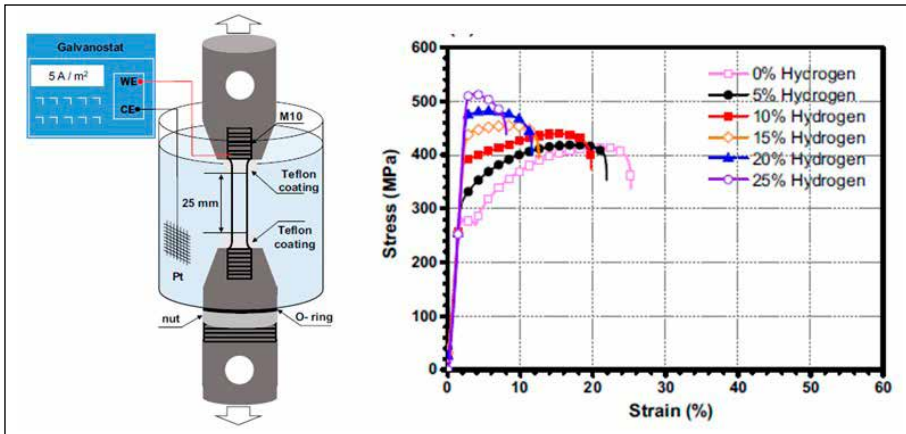
Kun vety pääsee tunkeutumaan teräkseen, se haurastuttaa teräksen. Vedyn metalleja haurastuttava vaikutus havaittiin ensimmäisen kerran jo v. 1874, mutta vasta 1976 Hirth & Johnson julkaisivat ensimmäisen kerran tutkimuksen, jossa oli tehty yhteenveto erityyppisistä vedyn aiheuttamista haurausilmiöistä. Hirth & Johnsonin mukaan vety aiheuttaa teräksissä mm. seuraavia haurausilmiöitä: 1. vety-ympäristön aiheuttama haurastuminen (HEE = Hydrogen Environmental Embrittlement), 2. vedyn aiheuttama jännitysmurtuma (HSC = Hydrogen Stress Cracking) ja 3. vetyhyökkäys (HA = Hydrogen Attack). Muita vedyn aiheuttamia haurausilmiöitä ovat mm. vedyn aiheuttama murtuma (HIC = Hydrogen Induced Cracking), jännityksen suuntaama vedyn aiheuttama murtuma (SOHIC = Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking) ja sulfidien aiheuttama jännityskorrosio (SSCC = Sulphide Stress Corrosion Cracking). (Gavriljuk ym. 2022, 201).

Hitsauksen yhteydessä vedyn aiheuttamista haasteista tunnetuin on vety- eli kylmähalkeama. On arvioitu, että lähes 90 % terästen hitsausliitosten halkeamista on vetyhalkeamia. Vetyä joutuu hitsiin kaariatmosfääristä vetyyhdisteiden hajotessa valokaaren kuumuudessa. Vetyyhdisteitä on mm. lisäaineissa (kosteus, H₂O) ja epäpuhtauksissa rallojen pinnoilla (Lukkari ym. 2019).

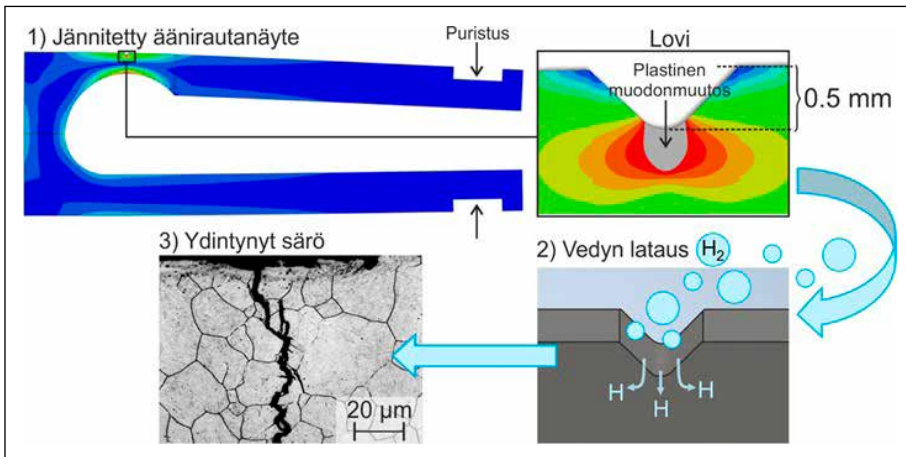
Vedyn aiheuttamaa haurastumista voidaan testata lukuisilla menetelmillä. Hidasnopeusvetokoe (SSRT = Slow Strain Rate Test) on yleisesti käytetty testimenetelmä, jolla tutkitaan vedyn vaikutusta metallien mekaanisiin ominaisuuksiin. Testaus voidaan tehdä esim. standardien EN ISO 7539-7 (Corrosion of metals and alloys. Stress corrosion testing. Part 7: Method for slow strain rate testing) tai ASTM G 129 (Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking) vaatimusten mukaisesti. Kokeessa ladataan tutkittavaan koesauvaan vetyä joko ennen testausta tai testauksen yhteydessä (in situ). Vetyä voidaan ladata koesauvaan elektrolyttisesti tai korkeassa paineessa esim. autoklaavissa. Vetonopeudet ovat luokkaa 10⁻⁵-10⁻⁷ s⁻¹, kun ne normaalissa standardin SFS-EN ISO 6982-1 vaatimusten mukaisessa vetokokeessa ovat luokkaa 10⁻³-10⁻⁵ s⁻¹. Kuvassa 7 näh-



Kuva 6. Vedyn siirto-/kuljetuskustannukset eri kuljetusmuodoilla (1 Mt/a vetyä, sähkön hinta 20 €/MWh). (JRC 2021, muokattu).



Kuva 7. Periaatekuva in situ SSRT koejärjestelystä ja katodisesti ladatun vedyn vaikutuksesta EH36 teräksen jännitys-venymä käyriin (Park ym. 2018, 586-587).



Kuva 8. Äänirautakokeen vaiheet. (Materia 2021, 38).

dään esimerkkinä Park ym. 2018 julkaistussa tutkimuksessa esitetty periaatekuva in situ SSRT-testauksen koejärjestelystä ja kojeella määritetyistä jännitys-venymä käyristä katodisesti vedyllä ladatulla EH36 tyyppisellä teräksellä (termomekaanisesti valssattu 500 MPa myötölujuusluokan seostamaton C-Mn-teräs). Kuvasta nähdään selvästi, kuinka vety lujittaa ja haurastuttaa terästä.

Oulun yliopistolla on kehitetty uusi testimenetelmä vetyhaurauden tutkimiseen. Tämä "Tuning-Fork Test" (TFT, "äänirautakoe") perustuu tekniikkaan, jonka avulla yhdistetään vetojännitystilaa ja vety-ympäristöä. Lovettujen äänirautanäytteiden jalkoja puristetaan yhteen puristimella, jossa on voima-anturi. Näin saadaan aikaiseksi vetojännitystilaa hallitusti loven pohjalle. Kiristyksen jälkeen näytteeseen ladataan katodisesti vetyä. Jännityksen ja vedyn ansiosta loven pohjalle ydintyy särö, joka etenee näytteen läpi aiheuttaen murtuman, kuva 8. Suurin jännitys syntyy kuvassa 8 nähtävälle punaiselle alueelle. Särön etenemistä seurataan voima-anturin avulla. Anturista kerätystä tiedosta voidaan määrittää särön ydintymis-, etenemis- ja murtumisajat sekä särön keskimääräinen etenemisnopeus. Lopullisen murtumisen jälkeen murtopinnat analysoidaan makro- ja mikro-

skooppisesti murtumismekanismin varmistamiseksi (Materia 2021, 37).

Vedyn tunkeutumista teräkseen voidaan arvioida permeaatiomittauksilla, joilla saadaan selville mm. vedyn diffuusionopeus ja

arvio vetyloukkujen määrästä. Oulun yliopistolla on käytössä permeaatiokenno kuvassa 9 ja siitä saatavan datan käsittelyyn kehitetty "Permeator!" -sovellusohjelmisto.

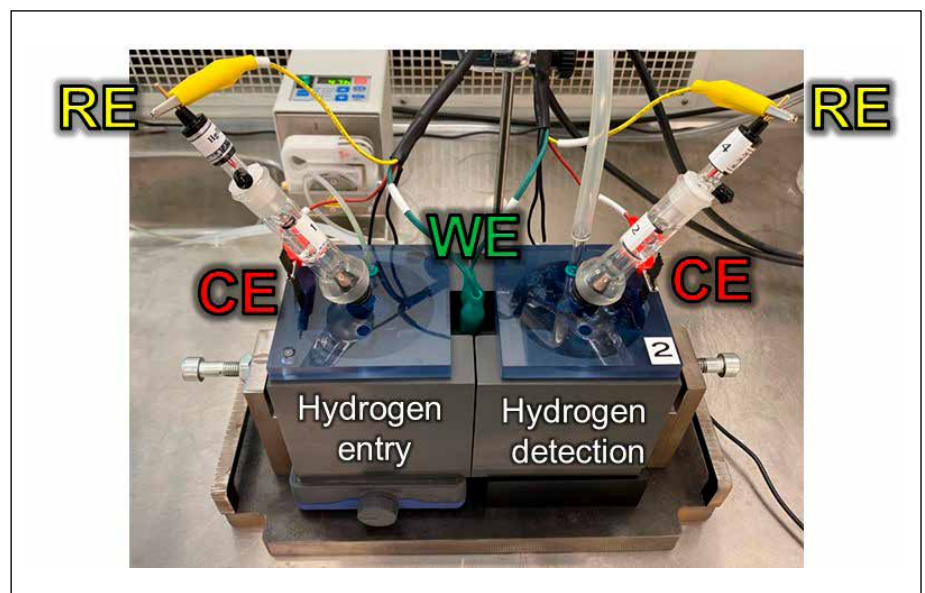
Vedyn tulevaisuus

Tällä hetkellä lähes kaikki maailmassa 90 Mt/a tuotetusta vedystä ei liity energiantuotantoon. Suurin osa käytetään rikinpoiston öljynjalostusprosesseissa, ammoniakkin varastointiin ammoniakkin ja metanolin valmistuksessa sekä raudan suorapelkistykseen. Tulevaisuudessa vetyyn ja sen käyttöön liittyy seuraavia asiakokonaisuuksia:

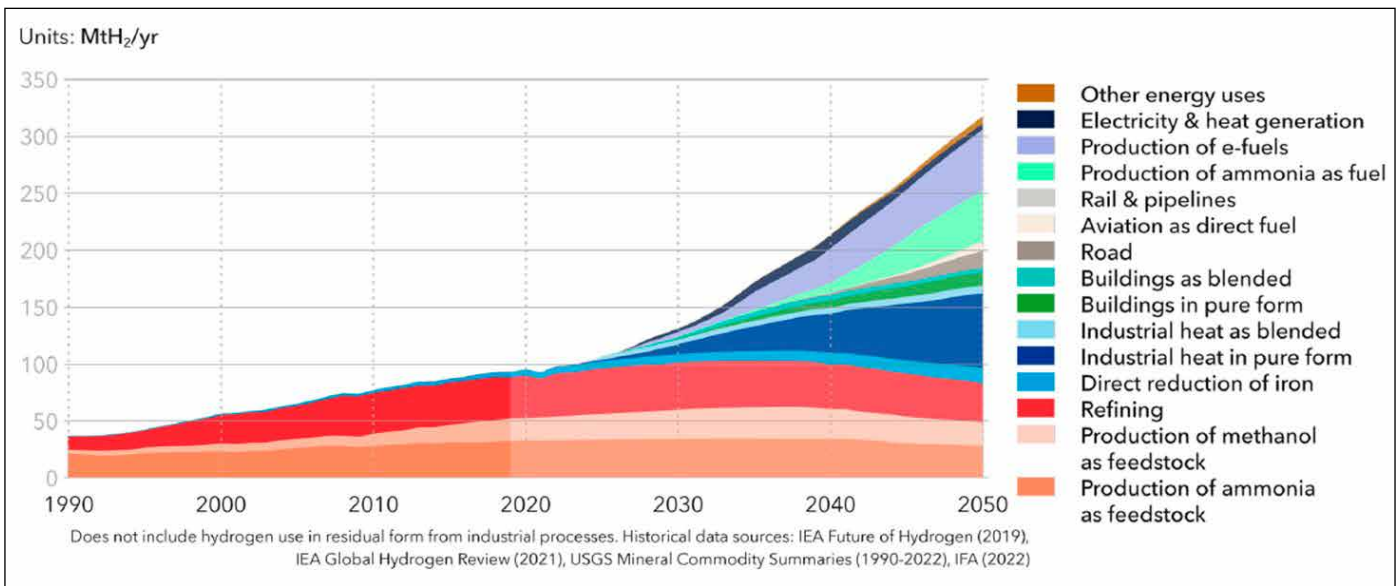
1. Pyrkiminen hiilineutraaliin vedyn valmistukseen, mikä koskee myös olemassa olevia vetylähteitä.
2. Siirtyminen vedyn ja sen johdannaisen käyttöön energiansitojana sekä siihen vaadittavat infrastruktuurin muutokset.
3. Vedyn uudet käyttökohteet ja niiden vaatima uusi infrastruktuuri (DNV 2022, 71).

Kuvasta 10 nähdään, miten vedyn käyttökohteet lisääntyvät vuoteen 2050 mennessä. Kuvan mukaan olemassa olevien vetysovellusten käyttö jatkuu samansuuruisena myös tulevaisuudessa. Uusia käyttökohteita syntyy paljon ja niistä merkittävimpiä ovat suoran prosessilämmön tuotto, ammoniakkin käyttö polttoaineena ja synteettisen sähköpolttoaineen (eFuel) valmistus (DNV 2022, 71).

Vety on noussut EU:ssa keskeiseksi osaksi tulevaisuuden energia- ja ilmastokeskusteluja. EU antoi heinäkuussa 2020 energiaintegraatiostrategian yhteydessä myös vetystrategian. Vedyn etuja ovat, ettei sitä käytettäessä synny lainkaan hiilidioksidipäästöjä ja vetyä voidaan käyttää monipuolisesti raaka-aineena, polttoaineena, energian



Kuva 9. Oulun yliopiston permeaatiokenno (Eurocorr 2022).



Kuva 10. Vedyn käyttökohteet ja niiden kasvuennuste v. 2050 saakka (DNV 2022, 71).

kantajana ja energian varastointiin. Vedyllä on monia mahdollisia käyttökohteita teollisuudessa, liikenteessä, sähköntuotannossa ja rakennusalalla (Sivill ym.,17).

Toisaalta vedyn tuotanto vaatii paljon energiaa, joka olisi tehtävä vähäpäästöisillä tai kokonaan päästöttömillä energianlähteillä. Vedyn tuotanto ja käyttö tulisi siis rajoittaa sellaisiin kohteisiin, jossa se on ilmasto- ja energiatavoitteiden ja taloudellisuusnäkökulmien kannalta perusteltua muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Aktiivisen kansainvälisen tutkimus- ja kehitystoiminnan toivotaan osaltaan ratkaisevan vetyyn liittyviä teknisiä ja taloudellisia kysymyksiä (Sivill ym.,17).

Lähteet

Bellona. 2022. Hydrogen from methane reforming + CCS. Internet sivu. Luettu 28.9.2022. Luettavissa <https://www.frompollutiontosolution.org/hydrogen-from-smr-and-ccs>.

DNV. 2022. Hydrogen forecast to 2050. Energy Transition Outlook 2022. Project Report. Published by DNV AS.

Eurocorr. 2022. Latypova R. Nyo T.T., Seppälä O., Pallaspuro S., Mehtonen S., Hänninen H. & Kömi J. The effect of coatings on hydrogen permeation tests of a 500 HBW steel. Eurocorr 2022 European Corrosion Congress. 28.8. – 1.9.2022. Berlin.

Gavriljuk V. G., Shyvaniuk V. M. & Teus S. M. 2022. Hydrogen in Engineering Metallic Materials From Atomic-Level Interactions to Mechanical Properties. ISBN 978-3-030-98550-9 (eBook).

Hlaing T.Z.T. & Win H.H. 2014. International Journal of Scientific Engineering and Technology Research. Vol. 03. Issue 09. May 2014. Pp. 1874-1879.

HS. 2022. Helsingin sanomat. Tiede. Lasten tiedekysymykset. Luettu 28.9.2022. Luettavissa <https://www.hs.fi/tiede/art-2000002890585.html>.

Matikainen S. 2021. Vedyn käyttö energijärjestelmissä. Opinnäytetyö. JAMK. Pdf-dokumentti. Ladattu 7.10.2022. Luettavissa <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021121325537>.

Materia. 2021. Kajjalainen A., Latypova R., Tervo H. & Kauppi T. Kehittyneiden erikoislujien terästen kehitys Oulun yliopistossa. Materia lehti. Julkaistu 24.10.2021. Näköislehti. Sivut 36 – 42. Luettavissa https://vuorimiesyhdistys.fi/wp-content/uploads/2021/10/Materia_5-2021.pdf.

Motiva. 2022. Vety. Internet sivu. Luettu 28.9.2022. Luettavissa https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energiالاhteet/vety#:~:text=Vedyn%20valmistus,tuotteena%20saadaan%20vety%C3%A4%20ja%20hiilidioksidia.

Park. C., Kang N., Liu S., Lee J., Chun E. & Yoo S.-J. 2018. Effect of Prestrain on Hydrogen Embrittlement Susceptibility of EH 36 Steels Using In Situ Slow-Strain-Rate Testing. Metals and Materials International (2019) 25:584–593. Haettu 11.10.2022. Luettavissa <https://doi.org/10.1007/s12540-018-00221-y>.

Stetson N.T., McWhorter S. & Ahn C.C. 2016. Introduction to hydrogen storage. Pdf-dokumentti. Haettu 1.10.2022 <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00001-8>. 2016 Published by Elsevier Ltd.

Sivill L., Bröcl M., Semkin N., Ruismäki A., Piipola H., Laukkanen O., Lehtinen H., Takamäki S., Vasara P & Patronen J. 2022. Vetytalous - mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja. 2022:21. Pdf-julkaisu. Haettu 12.10.2022. Luettavissa https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf.

TWI. 2022. What is hydrogen embrittlement? Causes, effects and prevention. Internet sivu. Luettu 9.1.2022. Luettavissa <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-hydrogen-embrittlement>.

**Timo Kauppi, IWE, IWI-C, TkL
Oulun yliopisto / Lapin
ammattikorkeakoulu
timo.kauppi@lapinamk.fi**