RAAHEN SEUDUN KEHITYS
POHJOIS-POHJANMAA
COUNCIL OF OULU REGION
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto
Uuden kemianteollisuuden mahdollisuudet
Pohjois-Pohjanmaalla P2X-tulokulmasta
SWECO

Sisältö

1. Tausta ja tavoitteet
2. Hiilidioksidi
3. Vety
4. Vedyn jatkojalostus
5. Sidosryhmäyhteistyö
6. Johtopäätökset

1. Tausta ja tavoitteet

Tausta ja tavoitteet

- Tässä selvitystyössä tarkastellaan uuden kemianteollisuuden mahdollisuuksia Pohjois-Pohjanmaalla P2X-tulokulmasta. Selvitystyö on osa Raahen seudun kehityksen hallinnoimaa R4H2 – REACTions for Hydrogen –hanketta.
- Tavoitteena on kartoittaa Pohjois-Pohjanmaan mahdollisuuksia P2X-konseptoinnin saralla, tukien samalla alueellista kehitystyötä tuottamalla tietoa P2X-teknologiareiteistä sekä niihin liittyvistä vaihtoehtoisista lopputuotteista.
- Selvityksessä tarkastellaan alueen hiilidioksidin lähteitä (CO_2) P2X-laitoskonseptoinnin kannalta, huomioiden muun muassa hiilidioksidin talteenottoteknologioita sekä ratkaisuja hiilidioksidin varastointiin ja siirtoon. Selvitykseen kootaan myös asiakkaan kannalta merkittävää tietoutta hiilidioksidin saatavuudesta alueella. Lisäksi perehdytään vedyn (H_2) saatavuuteen ja soveltuviin logistisiin ratkaisuihin sekä tunnistetaan vedyn jatkojalostukseen (P2X) soveltuvia teknologioita ja tuotteiden käyttökohteita.
- Kirjallisuusselvityksen lisäksi haastateltiin Pohjois-Pohjanmaalla toimivia teollisuuden yrityksiä, jotka valittiin asiakkaan toiveiden mukaisesti.
- R4H2 – REACTions for Hydrogen –hanke on Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittama hanke ja rahoituksen on myöntänyt Pohjois-Pohjanmaan liitto.

RAAHEN SEUDUN KEHITYS

POHJOIS-POHJANMAA
COUNCIL OF OULU REGION

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

SWECO

2. Hiilidioksidi

Hiilidioksidipäästöt Pohjois-Pohjanmaalla

Kasvihuonekaasupäästöt maakunnittain muuttujina Vuosi, Päästökauppaan kuuluminen, Maakunta, Päästöluokka ja Tiedot

	Päästö, tuhatta tonnia CO2-ekv.
2020	
Yhteensä	
MK17 Pohjois-Pohjanmaa	
12 Energia, teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö	5 773
12(-1A3) Energia, teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö pl. liikenne	4 847

Kuva: Tilastokeskus (2023)

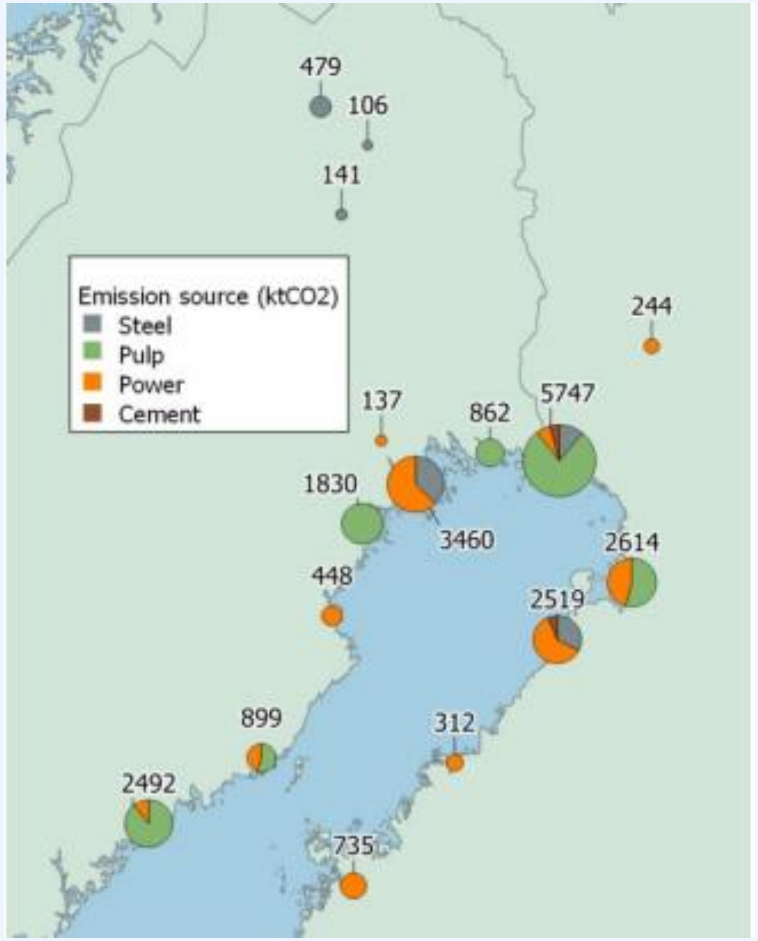
- Pohjois-Pohjanmaalla merkittävä päästölähde on maatalous, mutta tässä työssä on keskitytty teollisuuden päästöihin. Teollisuuden painottuessa vahvasti rannikolle, tässä selvityksessä tarkastellaan erityisesti Pohjois-Pohjanmaan rannikkoa ja sen potentiaalia P2X mahdollisuuksille.
- Tällä hetkellä suurimpia teollisuuden päästölähteitä ovat SSAB Europe Oy:n terästehdas Raahessa, Stora Enson sellu- ja paperitehtaat Oulussa, Nordkalk Oy Ab:n kalkkitehdas Raahessa sekä energiantuotanto.
  - SSAB suunnittelee uudistavansa Raahen terästehtaan vuoteen 2030 mennessä, jolloin Raahessa tuotettaisiin vetypelkistettyä eli fossiilivapaata terästä.

Energiavirasto (2022). Laitoskohtaiset todennetut päästöt [t CO2] vuosilta 2013-2021. Laitoskohtaiset päästöt

Karjunen, H. Lassila, J. Tynjälä, T. Laaksonen, P. Tuomaala, M. Vilppo, J. Taulasto, K. Karppanen, J. Laari, A. Kosonen, A. Ahola, J. (2021). *Bothnian Bay Hydrogen Valley – Research report.* LUT Scientific and Expertise Publications. Bothnian Bay Hydrogen Valley

Pulliainen M. (3.11.2022). *SSAB:n toimitusjohtajalta hyviä uutisia Raahen terästehtaalle, mutta saksalaisen kilpailijan miljardipotti langettaa varjon yhtiölle-"Kilpailukykymme kärsii ja paljon".* Tekniikka & Talous. Tekniikka & Talous

Tilastokeskus (2023). Kasvihuonekaasupäästöt maakunnittain, 2011-2022. Kasvihuonekaasupäästöt

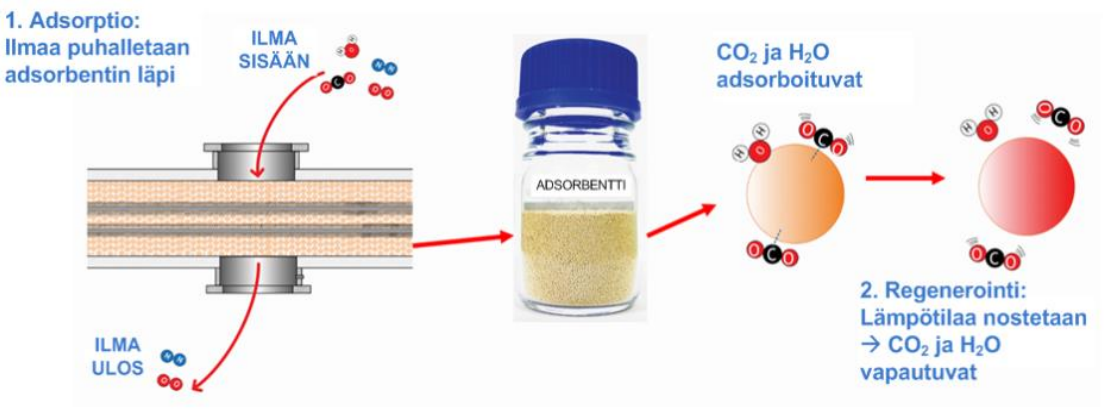


Kuva: Karjunen et. Al. (2021)

SWECO

Keskeiset hiilidioksidin talteenottoteknologiat

- Polton jälkeinen talteenotto (post-combustion).
  - Teollisuuden ja voimalaitosten polttoprosesseista syntyvästä savukaasusta puhdistetaan hiilidioksidi.
- Polttoa edeltävä talteenotto (pre-combustion).
  - Polttoaineita käsitellään siten, että niistä erotetaan hiili ennen polttoa.
- Happipoltto (oxy-fuel combustion).
  - Polttoainetta poltetaan lähes puhtaan hapen tai kierrätetyn savukaasun ja hapen seoksessa ilman sijaan eli savukaasuissa ei ole polttoilman sisältämää typpeä.
  - Menetelmä nostaa poistokaasun hiilidioksidipitoisuutta, jolloin hiilidioksidin erottaminen savukaasusta on helpompaa.
- Kuvassa esitettyyn DAC-prosessiin (direct air capture) eli hiilidioksidin talteenottoon suoraan ilmakehästä on teknologioita kehitteillä. DAC-prosessin lopputuloksena saadaan lähes puhdasta hiilidioksidia.
  - Pistelähteistä hiilidioksidin talteenotto on taloudellisempaa, koska hiilidioksidipitoisuus on merkittävästi korkeampi kuin ilmakehässä.



Kuva: Elfving, J. (2.6.2022)

Ilmasto-opas. (Julkaisuaika tuntematon). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Li, K. Leigh, W. Feron, P. Yu, H. Tade, M. (2016). Applied Energy. *Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO2 capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements.* (s.648-659). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.109

Teir, S. Pikkarainen, T. Kujanpää, L. Tsupari, E. Kärki, J. Arasto, A. Aatos S. (2011). *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)*. VTT. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

Elfving, J. (2.6.2022). *Hiilidioksidin kaappaus ilmasta – lupaava teknologia, joka vaatii kehitystyötä.* VTT. Direct air capture

SWECO

Polton jälkeinen talteenotto

- Polton jälkeinen talteenotto tapahtuu teollisuuden savukaasuista. Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista on hyvä vaihtoehto olemassa oleville laitoksille, sillä se on helpompi integroida teollisuuden tai energiantuotannon polttoprosesseihin kuin muut hiilidioksidin talteenoton vaihtoehdot.
- Hiilidioksidin pitoisuus savukaasuissa on yleensä matala, 8-15 til.-%, sisältäen inerttejä kaasuja, kuten typpeä, argonia ja vettä. Lisäksi savukaasut sisältävät epäpuhtauksia, kuten hiukkasia, rikkidioksidia (SO_2) ja typpidioksidia (NO_2).
- Polton jälkeisiä talteenottoteknologioita on useita, mutta kaupallisesti kypsimmät vaihtoehdot ovat:
  - Absorptio, suorituskykyinen teollisen kokoluokan teknologia, TRL (technology readiness level = teknologian kypsyysaste) on 9. Viimeaikaisen kirjallisuuden (Chao et al., 2020) perusteella, absorptio on teknologisesti kypsin vaihtoehto polton jälkeiseen hiilidioksidin talteenottoon.
  - Adsorptio, TRL 9, soveltuu erityisesti pienen kokoluokan kohteisiin (<100 tonnia savukaasua / päivä). Kaupallinen menetelmä on TSA = temperature swing adsorption = lämpötilan muutoksessa tapahtuva adsorptio, jossa hiilidioksidi adsorboidaan matalassa lämpötilassa ja adsorbentti regeneroidaan noin 30-50°C.
- Kehitys- ja demonstraatiovaiheessa olevia vaihtoehtoja polton jälkeiseen talteenottoon ovat muun muassa:
  - Jäähdytetty ammoniakkiprosessi (CAP)
  - Kaliumkarbonaattipohjainen absorptio
  - Kryogeeninen erotus
  - Membraanierotus
  - Vesipesu
- Hiilidioksidin talteenottoprosessin monimutkaisuus ja energian tarve riippuvat enimmäkseen sähkön ja höyryn kustannuksista, mutta myös CO_2 olosuhteista paineen, lämpötilan ja puhtauden osalta.

Chao, C., Deng, Y., Dewil, R., Baeyens, J., Fan, X. (2020). *Post-combustion carbon capture*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138, 110490. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110490

Vaz Jr., S., de Souza, A.P.R. & Baeta, B.E.L (2022). Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. Cleaner Engineering and Technology, 8, 100456. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456

Wang X. & Song, C. (2020). *Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective*. Frontiers in Energy Research, 8, 560849. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849

SWECO

Kaupalliset polton jälkeiset talteenottoteknologiat

- **Amiinipesu** on hiilidioksidin talteenottoteknologioista kypsin ja laajimmin hyödynnetty. Käytetyin liuotin amiineista on monoetanoliamiini (MEA).
- Prosessi jakautuu kolmeen päävaiheeseen: esikäsittely, hiilidioksidin talteenotto ja hiilidioksidin paineistaminen. Keskeisimmät komponentit talteenotossa ovat pesu- ja haihdutuskolonni sekä näitä yhdistävä lämmönvaihdin. Nämä komponentit muodostavat amiinipesurin.
  - Pesukolonnissa savukaasuissa oleva hiilidioksidi absorboituu matalassa lämpötilassa, noin 40-60 °C:ssa lähellä ilmanpainetta, amiiniliuottimeen. Lämmönvaihtimessa ja haihdutuskolonnissa korkeahiilidioksidisen liuottimen lämpötilaa nostetaan noin 120 °C:een höyryn avulla, jolloin hiilidioksidi vapautuu liuottimesta. Käytetty höyry voidaan tuoda esimerkiksi voimalaitokselta, jonka savukaasulinjaan pesuri on kytketty. Haihdutuskolonnista hiilidioksidi poistetaan ja paineistetaan varastointia varten korkeaan paineeseen. Liuotin palautetaan lämmönvaihtimen kautta pesurikolonnille ja prosessi alkaa alustaa.
- Amiinipesureita on hyödynnetty teollisuudessa vuosikymmenten ajan. Talteenottolaitos asennetaan polttolaitokseen (pistemäiseen lähteeseen) minimaalisilla vaikutuksilla. Lisäksi teknologia voidaan integroida esim. kaukolämpöverkkoon, jolloin saadaan parannettua energiatehokkuutta. Näistä syistä amiinipohjainen talteenottoprosessi soveltuu hyvin jälkiasennettavaksi.
  - Hiilidioksidin erottaminen liuottimesta vaatii suuren lämpömäärän. Lisäksi haasteena on liuottimien vaatima suuri regenerointienergia. Amiinipesureiden pääomakustannukset ovat myös merkittäviä.
- Tutkimus- ja kehitystyötä tehdään vaihtoehtoisten liuottimien kanssa. Tavoitteena on parantaa energian käyttöä ja madaltaa investointikustannuksia. Teknologian kypsyysaste, TRL, on kuitenkin vielä näissä vaihtoehdoissa alhainen.

Energistyrelsen, Danish Energy Agency (2021). Technology Data Carbon capture, transport and storage (s.1-151). Technology Data Carbon capture, transport and storage

Kaupalliset polton jälkeiset talteenottoteknologiat

- Adsorptiossa hiilidioksidi sidotaan kiinteään adsorbenttiin ja adsorboitu hiilidioksidi erotetaan talteen muuttamalla systeemin painetta tai lämpötilaa.
- **TSA**:ssa adsorbentti regeneroidaan lämpötilan muutoksella eli adsorptio ja desorptio perustuvat lämpötilaeroon.
  - Selektiivinen adsorptio tapahtuu matalassa lämpötilassa, kun taas desorptio tapahtuu nostamalla adsorbentin lämpötilaa.
  - Adsorboitunut aine vapautuu kaasuna adsorbentista. Adsorbentti voidaan hyödyntää uudelleen regeneroimalla.
  - Energiatehokkuus on noin 80%.

Gibson, J.A.A., Mangano, E., Shiko, E., Greenaway, A.G., Gromov, A.V., Lozinska, M.M., Friedrich, D., Campbell, E.E.B., Wright, P.A. & Brandani, S. (2016). Adsorption Materials and Processes for Carbon Capture from Gas-Fired Power Plants: AMPGas. Industrial & Engineering Chemistry Research, 55, 13, 3840-3851. http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.5b05015

Leung, D.Y.C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M.M (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 426-443. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093

Polttoa edeltävä talteenotto

- Polttoa edeltävässä talteenotossa kaasumaisesta polttoaineesta otetaan hiilidioksidi talteen ennen sen polttamista. Menetelmää voidaan hyödyntää myös kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kaasutuksen yhteydessä. Kaasutuksella polttoaine muutetaan kaasuseokseksi, jonka pääkomponentit ovat vety, hiilimonoksidi ja hiilidioksidi. Kaasuseos sisältää myös laitteistolle ja ympäristölle haitallisia komponentteja (esim. rikkiyhdisteitä), jotka täytyy erottaa.
- Polttoa edeltäviä talteenottoteknologioita hyödynnyttäessä on huomioitava, että polttoprosessin on sovelluttava vedylle. Tästä syystä integrointi suoraan olemassa oleviin laitoksiin on haastavampaa kuin polton jälkeisten talteenottoteknologioiden.
  - Investointikustannukset ja voimalaitosten monimutkaiset prosessit voivat myös olla esteenä polttoa edeltäville talteenottoteknologioille.
- Polttoa edeltävien teknologioiden olosuhteet ovat kuitenkin suotuisammat hiilidioksidin talteenotolle kuin polton jälkeiset teknologiat:
  - Kaasun hiilidioksidipitoisuus on huomattavasti korkeampi kuin savukaasun;
  - Kaasun paine on korkeampi kuin polton jälkeisissä teknologioissa;
  - Lisäksi savukaasu sisältää typpeä, joten polttoa edeltävän kaasun tilavuusvirta on pienempi.

Ilmasto-opas. (Julkaisuaika tuntematon). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Teir, S. Pikkarainen, T. Kujanpää, L. Tsupari, E. Kärki, J. Arasto, A. Aatos, S. (2011). *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)*. VTT. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

Wang X. & Song, C. (2020). *Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective*. Frontiers in Energy Research, 8, 560849. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849

SWECO

Happipoltto

- Happipolttoteknologiat soveltuvat polttoa edeltävien talteenottoteknologioiden tavoin paremmin uusille laitoksille kuin olemassa olevien laitosten hiilidioksidipäästöjen talteen ottamiseen.
- Happipolttoa varten tarvitaan erillinen happitehdas, jolloin happi voidaan ottaa talteen suoraan ilmasta (erotetaan typpi).
- Happipolton merkittävä haaste on lämpötilan säätö polttoprosessissa.
  - Ilman inertti kaasu, typpi, puuttuu polttohapesta.
  - Lämpötilan säätö ei aiheuta yhtä suuria haasteita kaasutusprosesseissa.
- Happipolton avulla voidaan vähentää NO_x –päästöjä.

Ilmasto-opas. (Julkaisuaika tuntematon). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Teir, S. Pikkarainen, T. Kujanpää, L. Tsupari, E. Kärki, J. Arasto, A. Aatos, S. (2011). *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS).* VTT. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

Wang X. & Song, C. (2020). *Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective*. Frontiers in Energy Research, 8, 560849. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849

SWECO

Talteenottoteknologioiden tunnistaminen ja valinta

- Viime vuosina hiilidioksidin talteenottoon on tullut suuri määrä uusia teknologioita, jotka ovat saavuttaneet teollisen mittakaavan ja ovat kaupallistumassa tai kaupallistuneet. Vaikka teknologiat ovat saavuttaneet teollisen ja kaupallisen mittakaavan, on niitä otettu vielä toistaiseksi hitaasti käyttöön, johtuen muun muassa kannustimien puutteesta.
- Sopivan teknologiavaihtoehdon tunnistaminen ja valinta on tapauskohtaista, jonka määräävät useat tekijät:
  - Haluttu talteenottokyky eli talteenoton tehokkuus ja hiilidioksidin puhtaus;
  - Kaasuvirran ominaisuudet, kuten CO_2-pitoisuus, koostumus, epäpuhtaudet, lämpötila ja paine;
  - Prosessin integrointitekijät eli onko alueella energiaa (sähkö/lämpö) riittävästi tarjolla ja onko laitteistolle riittävästi tilaa.
- Myös talteenoton kustannuksiin (pistemäisistä lähteistä) vaikuttavat monet seikat:
  - Kaasuvirran ominaisuudet;
  - Operointiolosuhteet;
  - Käytettävä tekniikka ja toiminnan laajuus.

Kujanpää, L. Reznichenko, A. Saastamoinen, H. Mäkikouri, S. Soimakallio, S. Tynkkynen, O. Lehtonen, J. Wirtanen, T. Linjala, O. Similä, L. Keränen, J. Salo, E. Elfving, J. Koponen, K. (29.3.2023). *Carbon dioxide use and removal.* Valtioneuvosto. Carbon dioxide use and removal : Prospects and policies (valtioneuvosto.fi)

Hiilidioksidin talteenottoprosessin jälkiasennus

- Mikäli hiilidioksidin talteenottoprosessi jälkiasennetaan laitokseen, on huomioitava seuraavat asiat:
  - Hiilidioksidin varastoinnin järjestäminen turvallisesti;
    - P2X prosesseissa hiilidioksidin välivarastointi ei ole aina välttämätöntä.
  - Talteenottoprosessille on riittävä ja sopiva tila laitosalueella;
  - Mikäli talteenotto tapahtuu savukaasuista, täytyy savukaasu puhdistaa riittävän hyvin ennen hiilidioksidin erotusta;
  - Prosessilla on jäähdytysvaatimuksia, jolloin on huomioitava esim. jäähdytysveden saatavuus ja lämpötila;
  - Talteenottoprosessin tarvitseman sähkö- ja lämpöenergian saatavuus ja käyttö;
  - Sopivan toimintastrategian löytäminen. Kun talteenottoprosessi integroidaan osaksi laitosta on mietittävä otetaanko energia suoraan laitoksesta vai tarvitaanko esim. erillinen lisäkattila tarvittavan energian tuottamiseksi. Syntyvälle ylijäämälämmölle on myös suositeltavaa miettiä soveltuvia käyttökohteita.

Gibbins, J. Chalmers, H. Lucquiaud, M. Li, J. McGlashan, N. Liang, X. Davison, J. (2011). *Techno-economic assessment of CO_2 capture retrofit to existing power plants.* (s. 1835-1842). https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.061

SWECO

Epäpuhtaudet

- Erityisesti savukaasuissa on hiilidioksidin talteenoton kannalta haastavia epäpuhtauksia, kuten hiilivetyjä, typen oksideja (NO_x) ja rikkioksideja (SO_x), jotka ovat haasteellisia erityisesti amiinipesun kannalta
- Mitä puhtaampaa hiilidioksidi on sitä laajempi on sen hyödyntämismahdollisuudet.
  - P2X näkökulmasta puhtaudella on merkitystä valitun teknologian kannalta. Esim. katalyyttinen metanointi ei kestä juurikaan reagenssikaasujen epäpuhtauksia, kun taas biologinen metanointi ei ole yhtä herkkä epäpuhtauksille, kuten rikkivedylle (H_2S).
- Myös hiilidioksidin kuljetuksen kannalta puhtaudella on merkitystä.

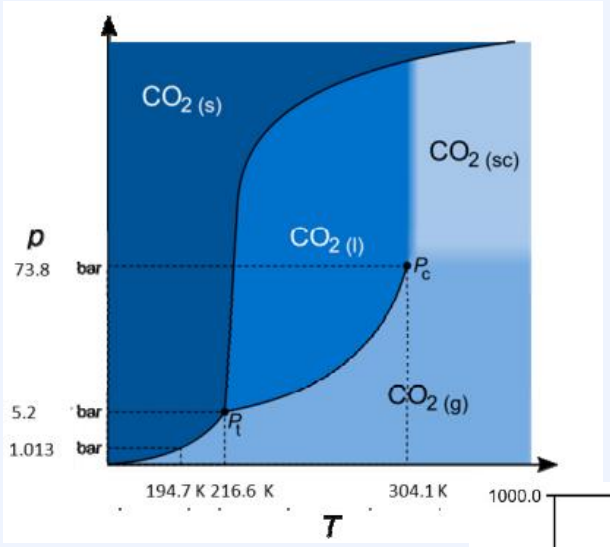
IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (elokuu 2004). Impact of Impurities on CO_2 Capture, Transport and Capture. leaghg

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renewable Energy 85, s.1371–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066

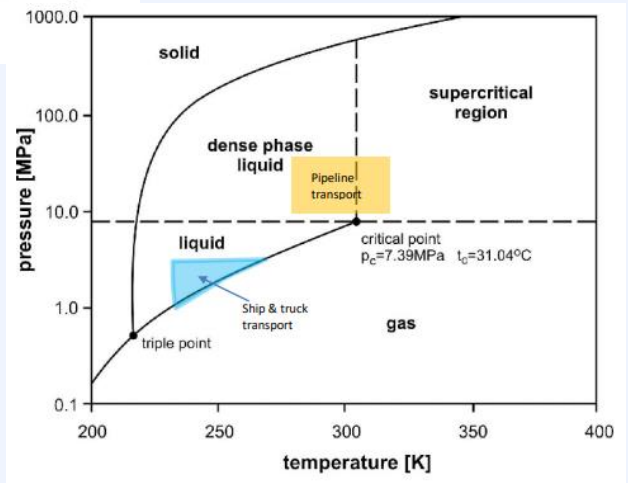
SWECO

Keskeiset ratkaisut hiilidioksidin siirtoon ja varastointiin

- Hiilidioksidia voidaan siirtää joko kaasuna tai nesteenä.
  - Hiilidioksidin faasidiagrammista (kuva 1) nähdään, että hiilidioksidi esiintyy nesteenä, kun paine ja lämpötila ovat vähintään 5.2 bar ja -56°C ... 31°C
- Hiilidioksidia voidaan siirtää esimerkiksi bulkkina maanteitse, rekoilla pulloissa/tankeissa tai (kaasu)putkissa. Kuvassa 2 on esitetty hiilidioksidin faasidiagrammi, johon on myös eritelty tyypilliset olosuhteet putki-, laiva- ja rekkakuljetuksille.
- Hiilidioksidin varastointi ja siirto on syytä tapahtua samoissa olosuhteissa eli esim. nesteenä.
- Hiilidioksidin varastoinnin tarpeisiin soveltuvilla säiliöillä on oltava riittävä paineenkesto, lämmöneristys sekä suuri kapasiteetti. Sopivia varastointiratkaisuja ovat muun muassa lieriömäiset tankit ja kallioperään louhitut luolat.



Kuva 1: Novak et al. (2017)



Kuva 2: Energistyrelsen, Danish Energy Agency (2021)

Energistyrelsen, Danish Energy Agency (2021). Technology Data Carbon capture, transport and storage. Technology Data Carbon capture, transport and storage

Työterveyslaitos (25.5.2022). Hiilidioksidi. Hiilidioksidi

Novak, S. Winter, M. (2017). *The Role of Sub- and Supercricital CO_2 as "Processing Solvent" for the Recycling and Sample Preparation of Lithium Ion Battery Electrolytes.* DOI: 10.3390/molecules22030403

Li, K. Leigh, W. Feron, P. Yu, H. Tade, M. (2016). Applied Energy. *Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO2 capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements.* (s.648-659). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.109

Teir, S. Pikkarainen, T. Kujanpää, L. Tsupari, E. Kärki, J. Arasto, A. Aatos S. (2011). *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS).* VTT. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

SWECO

Viitteet

Chao, C., Deng, Y., Dewil, R., Baeyens, J., Fan, X. (2020). *Post-combustion carbon capture*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138, 110490. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110490

Elfving, J. (2.6.2022). *Hiilidioksidin kaappaus ilmasta – lupaava teknologia, joka vaatii kehitystyötä.* VTT. https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/hiilidioksidin-kaappaus-ilmasta-lupaava-teknologia-joka-vaatii-kehitystyota

Energiavirasto (2022). Laitoskohtaiset todennetut päästöt [t CO2] vuosilta 2013-2021. https://energiavirasto.fi/documents/11120570/115455006/Laitoskohtaiset+tiedot+vuosien+2013-2021+p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf/3467319f-49bd-6170-2225-bb31a6f51a64/Laitoskohtaiset+tiedot+vuosien+2013-2021+p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf?t=1648813929223

Energistyrelsen, Danish Energy Agency (2021). Technology Data Carbon capture, transport and storage (s.1-151). https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_carbon_capture_transport_and_storage.pdf

Gibbins, J. Chalmers, H. Lucquiaud, M. Li, J. McGlashan, N. Liang, X. Davison, J. (2011). *Techno-economic assessment of CO_2 capture retrofit to existing power plants.* (s. 1835-1842). https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.061

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renewable Energy 85, s.1371–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066

IEA Greenhouse Gas R&D Programme. (elokuu 2004). Impact of Impurities on CO_2 Capture, Transport and Capture. https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/Ph4-32%20Impurities.pdf

Ilmasto-opas. (Julkaisuaika tuntematon). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi

Karjunen, H. Lassila, J. Tynjälä, T. Laaksonen, P. Tuomaala, M. Vilppo, J. Taulasto, K. Karppanen, J. Laari, A. Kosonen, A. Ahola, J. (2021). *Bothnian Bay Hydrogen Valley – Research report.* LUT Scientific and Expertise Publications. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163667/Bothnian_Bay_Hydrogen_Valley_Research_Report_Final.pdf?sequence=1

Kiviranta, K. Hopsu, J. Kanto, T. Saarikoski, A. Kärki, J. Lehtonen, J. (22.3.2023). *Pre-stude on transition to hydrogen economy, specifically in Northern Ostrobothnia.* BotH2nia. https://www.both2nia.com/application/files/6816/7949/3478/Pre-study_on_transition_to_hydrogen_economy_specifically_in_Northern_Ostrobothnia_final_16_3.pdf

Kujanpää, L. Reznichenko, A. Saastamoinen, H. Mäkikouri, S. Soimakallio, S. Tynkkynen, O. Lehtonen, J. Wirtanen, T. Linjala, O. Similä, L. Keränen, J. Salo, E. Elfving, J. Koponen, K. (29.3.2023). *Carbon dioxide use and removal.* Valtioneuvosto. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164795/VNTEAS_2023_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Li, K. Leigh, W. Feron, P. Yu, H. Tade, M. (2016). Applied Energy. *Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO2 capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements.* (s.648-659). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.109

Novak, S. Winter, M. (2017). *The Role of Sub- and Supercricital CO_2 as "Processing Solvent" for the Recycling and Sample Preparation of Lithium Ion Battery Electrolytes.* DOI: 10.3390/molecules22030403

Pulliainen, M. (3.11.2022). *SSAB:n toimitusjohtajalta hyviä uutisia Raahen terästehtaalle, mutta saksalaisen kilpailijan miljardipotti langettaa varjon yhtiölle "Kilpailukykymme kärsii ja paljon".* Tekniikka & Talous. https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/ssabn-toimitusjohtajalta-hyvia-uutisia-raahen-terastehtaalle-mutta-saksalaisen-kilpailijan-miljardipotti-langettaa-varjon-yhtiolle-kilpailukykymme-karsii-ja-paljon/2b6c6dc7-81f6-4720-8cea-21b41c67737f

Pulliainen, M. (3.11.2022). *SSAB:n toimitusjohtajalta hyviä uutisia Raahen terästehtaalle, mutta saksalaisen kilpailijan miljardipotti langettaa varjon yhtiölle "Kilpailukykymme kärsii ja paljon".* Tekniikka & Talous. https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/ssabn-toimitusjohtajalta-hyvia-uutisia-raahen-terastehtaalle-mutta-saksalaisen-kilpailijan-miljardipotti-langettaa-varjon-yhtiolle-kilpailukykymme-karsii-ja-paljon/2b6c6dc7-81f6-4720-8cea-21b41c67737f

Teir, S. Pikkarainen, T. Kujanpää, L. Tsupari, E. Kärki, J. Arasto, A. Aatos, S. (2011). *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS).* VTT. https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf

Tilastokeskus (2023). Kasvihuonekaasupäästöt maakunnittain, 2011-2022. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__khki/statfin_khki_pxt_122d.px/table/tableViewLayout1/

Työterveyslaitos (25.5.2022). Hiilidioksidi. https://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi

Vaz Jr., S., de Souza, A.P.R. & Baeta, B.E.L (2022). Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. Cleaner Engineering and Technology, 8, 100456. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456

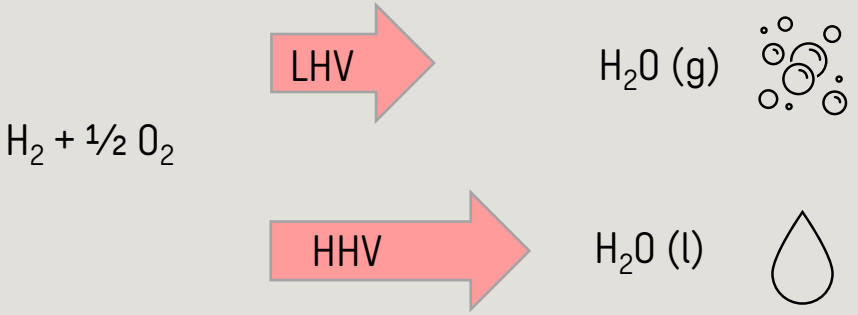
Wang X. & Song, C. (2020). *Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective.* Frontiers in Energy Research, 8, 560849. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849

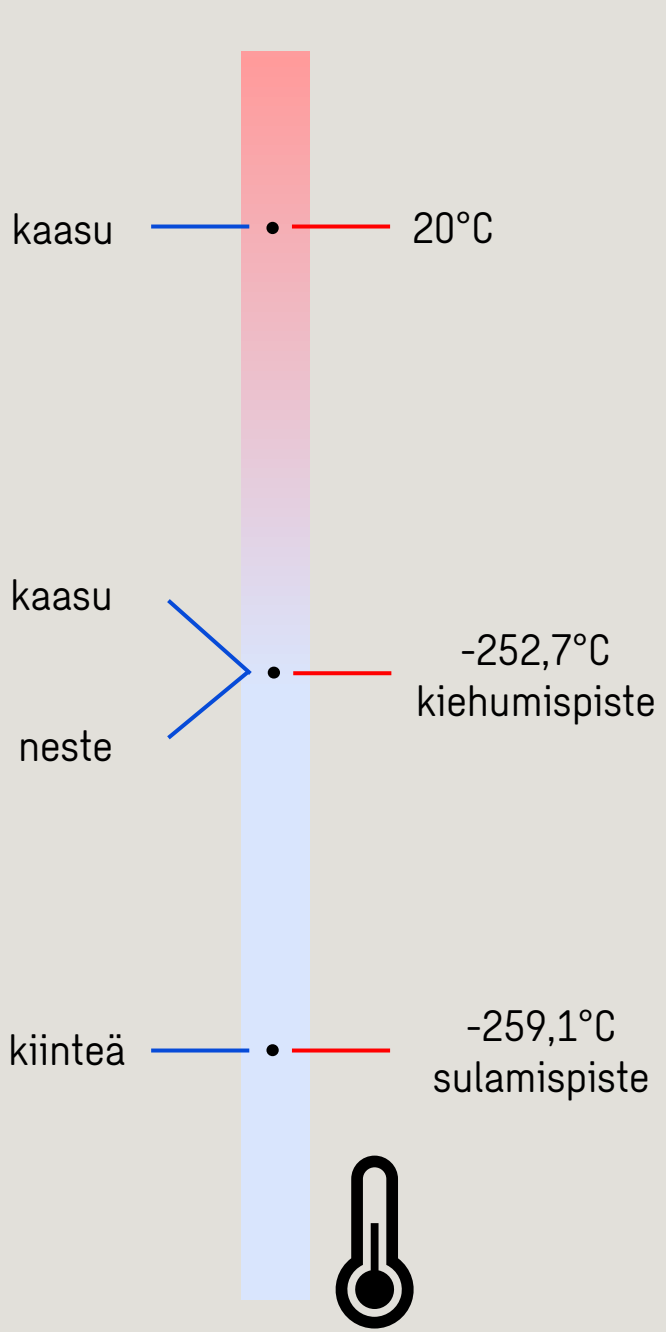
3. Vety

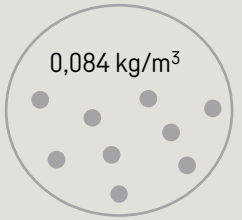
SWECO

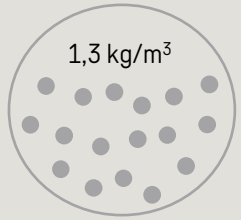
Vedyn ominaisuuksia

Polttoarvot	MJ/kg	MJ/Nm³
Alempi polttoarvo (LHV)	119,97	10,79
Ylempi polttoarvo (HHV)	141,80	12,75









- Hajuton, näkymätön, mauton
- Erittäin reaktiivinen
- Pienin molekyyli → läpäisee materiaaleja →haastava varastoida
- Heikentää ja haurastuttaa materiaaleja
- Laimenee ja hajaantuu nopeasti ulkotilassa

Bates, S. C. (2002). Compilation of the engineering properties of solid hydrogen. Thoughtventions Unlimited LLC.

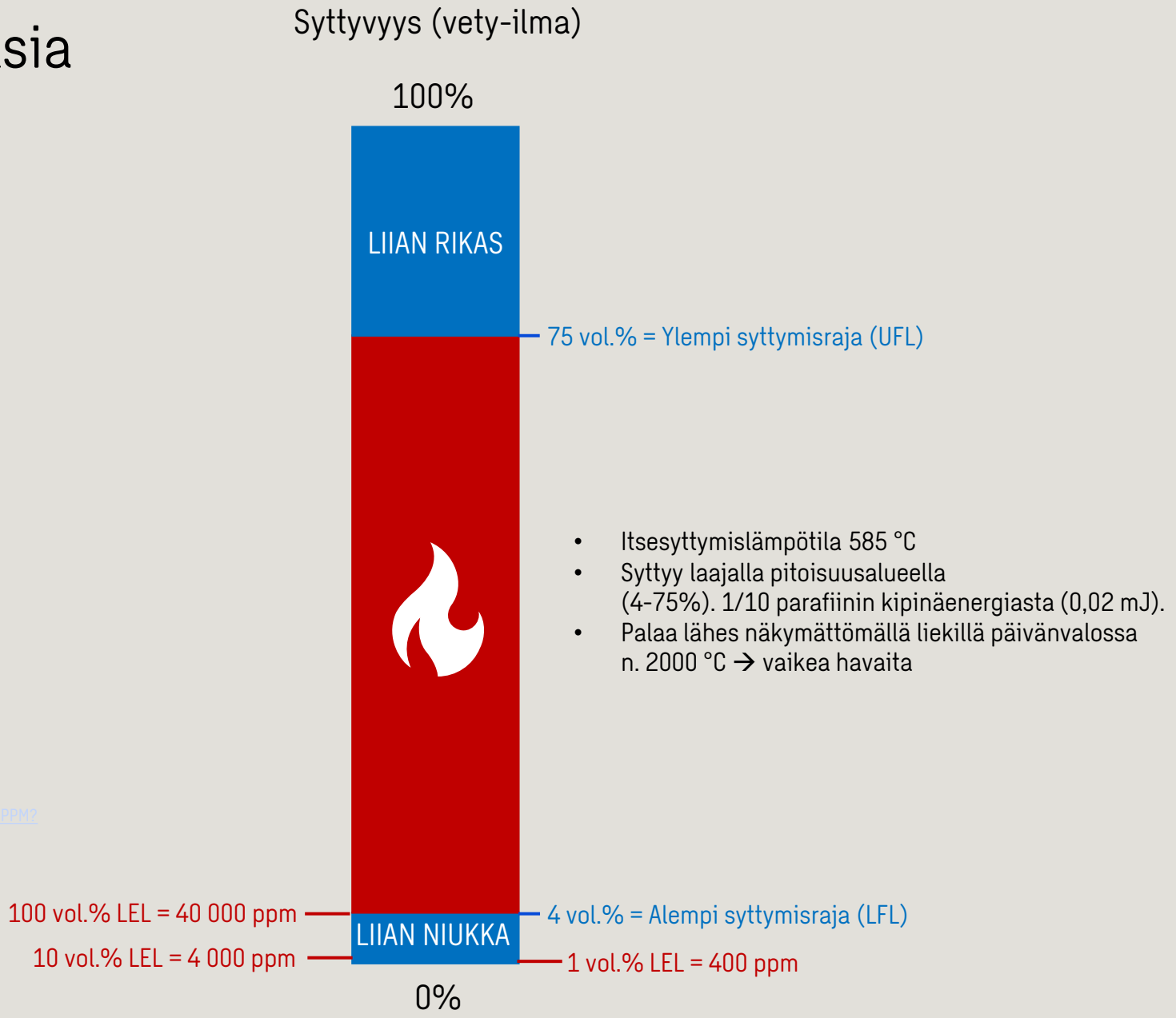
Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th ed. (1997).

Sweco database.

United States Department of Energy (2001) *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies.*

SWECO

Vedyn ominaisuuksia



- Itsesyttymislämpötila 585 °C
- Syttyy laajalla pitoisuusalueella (4-75%). 1/10 parafiinin kipinäenergiasta (0,02 mJ).
- Palaa lähes näkymättömällä liekillä päivänvalossa n. 2000 °C → vaikea havaita

Honeywell. (2023). What is the equivalent reading of Hydrogen LEL to PPM?

Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th ed. (1997)

Sweco database.

SWECO

Vety polttoaineena

- Palaa vedeksi
- Hyvä lämpöarvo massan suhteen – heikompi tilavuuden suhteen
- Liikkuu nopeasti
  - Diffuusivuus ilmassa 0,611 cm^2/s
  - Äänen nopeus vedyssä > 1250 m/s
  - Liekki 283 cm/s
- Vuotaa ja syttyy helposti, palaa kuumasti, liekki on lähes väritön ja säteilee niukasti → haastava havaita
- Alhainen tiheys, kuljetetaan ja varastoidaan paineistettuna, nesteytettynä (-253°C) tai sidottuna kantaja-aineeseen (tai jatkojalosteeseen)
- Heikentää ja haurastuttaa rakennemateriaaleja
  - Putkistot, säiliöt, pumput, venttiilit, tiivisteet

Bates, S. C. (2002). Compilation of the engineering properties of solid hydrogen. Thoughtventions Unlimited LLC.

Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th ed. (1997).

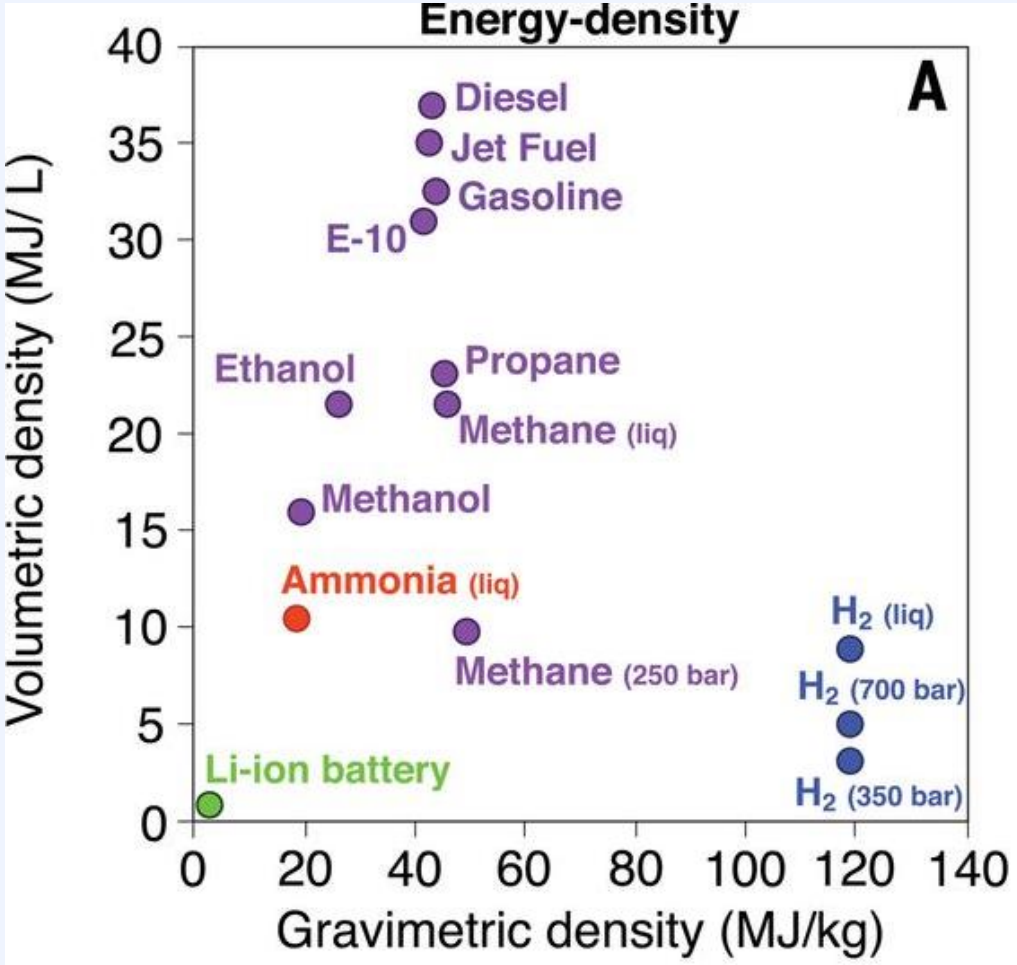
Sweco database.

United States Department of Energy (2001) *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*

SWECO

Vety energian kantajana

- Normaali paineessa 1 kg ~11 m^3; tiheys n. 90 g/m^3
- Nesteytettynä; tiheys n. 71 kg/m^3
- Paineistettuna, esim. 700 bar; tiheys n. 42 kg/m^3
- Hiilivedyillä alle puolet energiatiheydestä massaa kohti
- Nesteytetyillä hiilivedyillä moninkertaisesti vedyn energiatiheys tilavuutta kohti.
- Metanolilla, etanolilla ja ammoniakilla alle neljäsosa vedyn energiatiheydestä massaa kohti.
- Nesteytetyillä metanolilla, etanolilla ja ammoniakilla enemmän energiatiheyttä kuin vedyllä tilavuutta kohti.



Airliquide. (2023) *Storing Hydrogen.* Storing Hydrogen | Air Liquide Energies

Davis, S. J. et al. (2018). *Net-zero emissions energy systems.* Science, 360, eaas9793. https://doi.org/10.1126/science.aas9793

SWECO

Vedyn tuotanto nyt ja huomenna

- Vedyn yleisin valmistustapa on maakaasun höyryreformointi, jossa hiilen ja vedyn väliset sidokset hajotetaan.
  - Hiili hapetetaan, jolloin lopputuotteena syntyy vedyn lisäksi fossiiliperäistä hiilidioksidia.
- Teollisessa mittakaavassa vetyä hyödynnetään eniten öljynjalostuksessa ja ammoniakin valmistuksessa. Arviolta noin 90% vedystä menee näihin.
  - Loput 10% vedystä hyödynnetään esim. metanolin tuotannossa, metalliteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa ja muissa kohteissa, kuten liikennepolttoaineena.

- Vetyä voidaan valmistaa myös sähkö-, bio- ja lämpökemiallisin menetelmin.
- Biokemiallisia prosesseja ovat biofotolyysi, pimeäfermentointi ja muut mikrobien aineenvaihduntareaktiot.
- Lämpökemiallisia vaihtoehtoja ovat pyrolyysi, kaasutus ja reformointi.
- Sähkökemialliset teknologiat, kuten elektrolyysi, joka on tällä hetkellä merkittävin teknologia:
  - AEL (Alkaline electrolysis) = Alkalielektrolyysi = kehittyneintä teknologiaa, joka on kaupallisesti saatavilla. Vahvuutena on, että yksiköitä voidaan lisätä modulaarisesti, jolloin skaalaus on helppoa.
  - PEM (Proton exchange membrane electrolysis) = Protoninvaihtomembraanielektrolyysi = AEL:n tavoin kehittynyttä teknologiaa. Vahvuutena myöskin modulaarisuus.
  - SOEC (Solid oxide electrolysis cells) = Kiinteäoksidielektrolyysikenno = Vielä uusi markkinoilla.

Satyapal, S. (2017). *Hydrogen and Fuel Cells Overview.* U.S. Department of Energy. Hydrogen and fuel cells overview

Motiva (4.8.2020). *Vety.* Motiva - Vety

Vedyn tuotanto ja tuulivoima Pohjois-Pohjanmaalla

- Pohjois-Pohjanmaalla vetyä tuotetaan ja hyödynnetään nykyisin erityisesti Oulussa:
  - Eastman/Taminco Finland Oy Laanilan teollisuusalueella tuottaa vetyä osittaishapetuksella noin 4000 t/a.
  - Laanilan teollisuusalueella toimiva Kemira Chemicals käyttää vetyä raaka-aineena vetyperoksidin tuotannossa.
  - Nuottasaaressa toimivan Nouryon Chemicals Finland Oy:n prosessissa syntyy sivutuotteena vetyä noin 2200 t/a. Nuottasaaressa sijaitseva Stora Enso hyödyntää vetyä polttoprosessissa meesauunissa.
- Suomen hallitus antoi vetyä koskevan periaatepäätöksen helmikuussa 2023, jonka mukaan tavoitteena on tuottaa 10 % EU:n vihreästä vedystä vuonna 2030. Tämä tarkoittaisi, että Suomessa tuotetaan vetyä 1 Mt/a tai 33,6 TWh/a.
- VTT:n toteuttamassa selvityksessä ”*Pre-study on transition to hydrogen economy, specifically in Northern Ostrobothnia*” (julkaistu maaliskuussa 2023) todetaan, että Pohjois-Pohjanmaalla voitaisiin tuottaa tarpeeksi vetyä koko Suomen vedyntuotantotavoitteiden saavuttamiseksi.
- Erityisesti Pohjois-Pohjanmaan tuulivoimakapasiteetti tekee alueesta erittäin lupaavan vedyn tuotannolle. Nykyinen tuulivoimakapasiteetti Pohjois-Pohjanmaalla on noin 2,3 GW, kun rakenteilla oleva alueellinen kapasiteetti on noin 0,8 GW (valmistuu 2023-2025).
  - Alueelle suunniteltujen tuulivoimahankkeiden maksimikapasiteetti vuoteen 2030 mennessä on 30 GW, mukaan lukien kaikki alueelliset käynnissä, eri vaiheissa, olevat tuulivoimahankkeet. Suunnitellut merituulivoimahankkeet ovat laskettu mukaan.

Kiviranta, K. Hopsu, J. Kanto, T. Saarikoski, A. Kärki, J. Lehtonen, J. (22.3.2023). *Pre-study on transition to hydrogen economy, specifically in Northern Ostrobothnia.* BotH2nia. Pre-study on transition to hydrogen economy

Vedyn varastointi

- Vety varastoidaan tyypillisesti painekaasuna tai nesteytettynä kaasuna. Vedyn varastointi perustuu vedyn tiheyden kasvattamiseen. Tiheyttä voidaan kasvattaa esim. paineistuksella, lämpötilan laskulla alle kriittisen lämpötilan tai vetymolekyylien välistä hylkimistä vähentämällä hyödyntäen eri materiaaleja.
- Vety tulee varastoida viileässä, kuivassa, auringonvalolta suojattuna, hyvin tuuletetussa ja paloturvallisessa paikassa. Lisäksi varastointi on hyvä toteuttaa mahdollisimman kaukana syttymislähteistä, lämmönlähteistä kuten höyryputkista sekä palavista ja yhteensopimattomista aineista.
- Vedyn varastointiratkaisuja:
  - Painekaasu: kehittynyttä teknologiaa ja melko edullinen vaihtoehto. Vaatii kuitenkin suuren varastointitilavuuden johtuen alhaisesta volumetrisesta energiatiheydestä. Hyödynnetään esimerkiksi pullopattereissa, säiliöissä ja putkivarastoissa.
  - Kryogeeninen neste: kaupallisesti saatavilla olevaa teknologiaa, mutta menetelmällä on korkea energiatarve ja teknologia on kalliimpi verrattuna painekaasuun. Lisäksi tarvitsee erillisen nesteytyslaitoksen. Hyödynnetään muun muassa laivauksen yhteydessä.
  - Kryogeeninen paineistettu hybridivarasto: kehitysvaiheessa olevaa teknologiaa. Varastointiolosuhteet ovat kuitenkin helppo saavuttaa, joten se on potentiaalinen varastointivaihtoehto.
- Materiaaleihin perustuvat varastointiratkaisut ovat vielä kehitysvaiheessa.
- Vetyä voidaan varastoida myös jatkojalosteena, esim. ammoniakkina tai metanolina.
- Varastona voidaan käyttää pulloja/säiliöitä, joiden materiaali voi olla esim. polyamidia (PA), polyetyleeniä (PE) tai polyeteenitereftalaattia (PET). Myös erilaisia komposiittirakenteita on käytössä, kuten hiilikuitu, aramidikuitu ja lasikuitu.
  - Vetyhaurastuminen johtuu metalliseoksen altistumisesta vedylle ja vedyn pääsystä materiaaliin. Vetyhaurastuminen voidaan jakaa sisäiseen vetyhaurastumiseen ja ympäristön aiheuttamaan vetyhaurastumiseen. Sisäinen vetyhaurastuminen tapahtuu, kun vety on jo materiaalin sisällä, kun taas ympäristön aiheuttamassa vetyhaurastumisessa vety on peräisin ympäristöstä. (Ruostumattomalle) Teräkselle ja nikkeliseoksille vetyhaurastuminen on tyypillistä.

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Logistiikkaselvitys*. Kiertotalouskeskus. Uudet avaukset

Hydrogen Embrittlement (2012). *Hydrogen embrittlement (HE) refers to mechanical damage of a metal due to the penetration of hydrogen into the metal causing loss in ductility and tensile strength.* Hydrogen Embrittlement

Työterveyslaitos (12.7.2022). *Vety*. Vety

SWECO

Vetyhauraus

- Vetyhauraus (hydrogen embrittlement, HE)
  - Vety haurastuttaa metallien mekaanisia ominaisuuksia alentamalla plastista venymää ja murtojännitystä.
  - Nopeuttaa väsymissärön kasvua.
- Ilmiö:
  - H_2 adsorboituu metallin pinnalle
  - Dissosioituminen H_2 → 2 H
  - Vetyionien diffuusio metallin hilarakenteeseen (konsentraatiogradientti) välisijoja, dislokaatioita tai raerajapintoja pitkin ansatiloihin.
- Välisijoihin kulkeutuva osuus haurastuttaa, irreversiibelisti ansoihin jäävä ei.
- Vetyä metallirakenteeseen esim.
  - Valmistuksessa
  - Ympäristöstä (kaasu, neste)
  - Korroosioreaktioissa
  - Sähkökemiallisesti
- Vetyputkistoja on kuitenkin ollut käytössä pitkään yleisesti saatavilla olevilla materiaaleilla.

Alvaro, A., Wan, D., Olden, V., Barnoush, A. (2019). *Hydrogen enhanced fatigue crack growth rates in a ferritic Fe-3 wt%Si alloy and a X70 pipeline steel.* Engineering Fracture Mechanics, 219, 106641. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106641

Lapytova, R. (2022). *Development and application of a novel tuning-fork test in studying hydrogen-induced fracture in as-quenched martensitic steels.* Acta Univ. Oul. C 856. http://urn.fi/urn:isbn:9789526235103

Pallaspuro, S. (2018) *On the factors affecting the ductile-brittle transition in as-quenched fully and partially martensitic low-carbon steels.* Acta Univ. Oul. C 655. http://urn.fi/urn:isbn:9789526218977

SWECO

Vedyn siirto

- Vedyn kuljetusmenetelmää valitessa otetaan huomioon muun muassa kysyntä, kuljetuskulut ja –etäisyydet.
  - Painekaasuna siirto soveltuu vähäisille tai kohtalaisille määrille. Soveltuvia vaihtoehtoja ovat kaasupullot- tai putkiperävaunut. Esimerkiksi kaasupulloihin soveltuvia materiaaleja on useita, kuten polyamidi (PA), polyetyleeni (PE), polyeteenitereftalaatti (PET) ja erilaiset komposiittirakenteet. Kuljetuspaine alkaen 180 bar.
  - Nesteytetty vety (1-4 bar) soveltuu pitkille välimatkoille ja kohtuullisen kysynnän kohteisiin. Nesteytettyä vetyä voidaan kuljettaa esim. trailereissa kuorma-autoilla tai pitkillä etäisyyksillä laivakuljetus on mahdollinen. Vedyn nesteytys tapahtuu jäähdyttämällä vety lähelle sen normaalia kiehumispistettä ja tyypillisesi lähelle ilmanpainetta (kryogeeninen neste).
  - Vetyputkistot soveltuvat kohteisiin, joissa on suurta kysyntää ja jos välimatkat ovat pitkiä. Putkistot ovat maakaasuputkilinjaa vastaavia, joita on käytössä muun muassa teollisuudessa. Nykyiset vetyputkistot on valmistettu pääsääntöisesti teräksestä, mutta uusia vaihtoehtoja tutkitaan myös. Nykyisissä vetyputkistoissa operointipaine on noin 1-2 MPa.
- Ensimmäinen vedyn laivakuljetus toteutettiin vuonna 2022.
  - *”Suiso Frontier lähti Japanista joulukuussa 2021 ja saapui Australiaan tammikuussa 2022. Alus vastaanotti kivihiilestä valmistettua nesteytettyä vetyä Victoriassa, Australiassa, ja palasi Japaniin helmikuussa 2022 purkamalla lastin Koben satamassa.”*
- Vedyn toimitusketjut eroavat toisistaan riippuen siitä, missä muodossa vety kuljetetaan tai hyödynnetäänkö vedyn kantajaa esim. ammoniakkia.

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Logistiikkaselvitys.* Kiertotalouskeskus. Uudet avaukset

Howard, K. (12.5.2022). *World’s first liquefied hydrogen ship completes voyage in Japan.* Pinsent Masons. World’s first liquefied hydrogen ship completes voyage in Japan

SWECO

Vedyn varastointi ja siirto

- Vedyn siirron päätekijät ovat varastointimuoto sekä kuljetustapa.
  - Vety voidaan varastoida nesteytettynä, paineistettuna tai kemiallisesti sidottuna, esim. ammoniakkiin, metanoliin, orgaanisiin vedyn kantajiin (LOHC) tai metallihydrideihin.
    - Fysikaalinen varastointi = paineistus, kryogeeniset sovellukset, adsorptiomateriaalit
    - Kemiallinen varastointi = metallihydridit, LOHC:t, ammoniakki, metanoli, jne.
    - Nykyisin yleisimpiä varastointiratkaisuja ovat vedyn varastointi kaasuna tai nesteenä paikallisissa varastoissa.
  - Vedyn kuljetustapoja ovat maantie-, rautatie- ja laivakuljetukset sekä putkistot.
- Vedyn energiatiheys on alhainen, joten se kannattaa paineistaa, nesteyttää tai kemiallisesti sitoa muihin aineisiin (molekyyleihin tai materiaaleihin) kuljetusta varten.
- Kemiallisesti varastoituna vetyä voidaan kuljettaa esimerkiksi ammoniakkina. LOHC (*Liquid organic hydrogen carriers)* on nestemäinen vedynkantaja, joka nähdään potentiaalisena vaihtoehtona vedyn varastointiin ja siirtoon. LOHC ovat orgaanisia ja nestemäisiä yhdisteitä, joihin voidaan hydrogenoinnin avulla sitoa vetyä. Dehydrogenoinnin aikana vetyä vapautuu ainoana tuotteena. Kantajaneste palautetaan alkuperäisen tilaan ja se voidaan käyttää uudelleen.
  - Menetelmä nähdään potentiaalisena, mutta se on vielä kehitysvaiheessa.

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Logistiikkaselvitys.* Kiertotalouskeskus. Uudet avaukset

IEA (2019). *The Future of Hydrogen.* The future of hydrogen

Howard, K. (12.5.2022). *World's first liquefied hydrogen ship completes voyage in Japan.* Pinsent Masons. World's first liquefied hydrogen ship completes voyage in Japan

Hurskainen, M. (2.12.20219). *Liquid organic hydrogen carriers (LOHC): Concept evaluation and techno-economics.* VTT. LOHC

SWECO

Julkistetut investoinnit

- Taulukossa kuvatut investoinnit ovat julkaistuja projekteja, jotka YLE listasi tammikuussa 2023.
  - Osa projekteista sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla tai Pohjois-Pohjanmaan lähialueilla.
- Uudet julkistukset vetylaitoksista ja vedyn jatkojalosteita valmistavista laitoksista vauhdittavat alueen vetytalouden syntymistä.
  - Julkistettujen investointisuunnitelmien lisäksi on oletettavaa, että yrityksillä on omia sisäisiä suunnitelmia.
- Pohjois-Pohjanmaan lopullinen osuus kansallisesta vetytalouden ”potista” määräytyy paljolti alueen kaupunkien ja kuntien houkuttelukyvyllä saada uusia teollisuuden ja energiantuotannon investointeja.

Projekti	Investointi, €	Rakentaminen	Mitä?
Ranua, ET Fuels	800 milj. €	Ei tiedossa	Vihreästä vedystä synteettisen metanolin valmistus.
Raahe, SSAB	2000 milj. €	2030 tuotannossa	Päästöttömän teräksen valmistus vihreällä vedyllä.
Kokkola, Flexens	500 milj. €	2024-2027	Vihreästä vedystä ammoniakin tuotanto kemianteollisuuden tarpeisiin.
Mustasaari, Westenergy	90 milj. €	2024-2025	Vihreästä vedystä metaanin tuotanto polttoaineeksi.
Vaasa, EPV Energia	35 milj. €	2024 tuotanto	Vihreää vetyä.
Kristiinankaupunki, CPC Finland	450 milj. €	2024-2026	Vihreästä vedystä metaania polttoaineeksi.
Pori, Ren-Gas	160 milj. €	2024-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metaania polttoaineeksi.
Harjavalta, P2X Solutions	60 milj. €	2022-2024	Vihreää vetyä ja synteettistä metaania teollisuuden raaka- ja polttoaineeksi.
Tampere, Ren-Gas	162 milj. €	2023-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metaania polttoaineeksi.
Mikkeli, Ren-Gas	160 milj. €	2024-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metaania polttoaineeksi.
Joensuu, P2X Solutions	-	2024-2026	Vihreää vetyä ja synteettistä metaania teollisuuden raaka- ja polttoaineeksi.
Kouvola, Solvay Chemicals	40 milj. €	2026-2028	Vihreän vedyn tuotanto ja maakaasun korvaaminen vetyperoksidin tuotannossa.
Lahti, Ren-Gas	250 milj. €	2023-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metaania polttoaineeksi.
Lappeenranta, ST1	125 milj. €	2024-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metanolia polttoaineeksi.
Hamina, STR Tecoil	3-5 milj. €	2024-2025	Moottoriöljyjen kierrätys ja uudelleenkäyttö vihreää vetyä hyödyntäen.
Kotka, Ren-Gas	160 milj. €	2024-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metaania polttoaineeksi.
Vantaa, Solar Foods	40 milj. €	2021-2023	Vihreää vetyä ja siitä elintarvikkeisiin proteiinia.
Kerava, Keravan Energia	60 milj. €	2024-2026	Vihreää vetyä ja siitä synteettistä metaania polttoaineeksi.
Vantaa, Vantaan Energia	85 milj. €	2023-2025	Synteettistä metaania maakaasun korvikkeeksi ja polttoaineeksi.
Porvoo, Neste	-	2024-2025	Nesteen jalostamolle vihreää vetyä.
Helsinki, Helen	12 milj. €	2023-2024	Vihreää vetyä teollisuuden raaka-aineeksi ja polttoaineeksi.
Inkoo, Blastr Green Steel	4000 milj. €	2026 tuotanto	Päästöttömän teräksen valmistus vihreällä vedyllä.
Naantali, Green North Energy	250 milj. €	2024-2026	Vihreää vetyä ja siitä ammoniakkia teollisuuden raaka- ja polttoaineeksi.

Pohjois-Pohjanmaan liitto (11.4.2023). *Uusiutuvan energiatuotannon ja siihen kytkeytyvän vihreän vetytalouden mahdollisuudet ja maankäytön reunaehdot Pohjois-Pohjanmaalla.* EMMI-hanke

Mäntylä, J.-M. (30.1.2023). Suomessa on tapahtumassa kaikessa hiljaisuudessa vetyvallankumous – katso kartalta, yltääkö vihreä siirtymä kotikuntaasi. YLE. YLE Uutiset

SWECO

Kustannusten muodostuminen

- Vihreän vedyn tuotantokustannukset riippuvat erityisesti sähkön hinnasta ja näin ollen tuotantorakenne on merkittävin tuotantokustannustekijä. Tuotantorakenteita on kolme:
  1. Sähköverkkoon yhdistetty elektrolyysi
  2. Suoraan sähköntuotantolaitokseen kytketty elektrolyysi, joka on osana esim. tuulipuistoa
  3. Ylläkuvattujen yhdistelmä
- Lopulliseen hintaan vaikuttavat myös mahdolliset logistiikkakustannukset. Vedyn viennin kannattavuus taloudellisesti ja kilpailukyky kohdealueella riippuvat useista tekijöistä, kuten vienti- ja tuontialueen kustannuserosta sähkön hinnassa sekä kuljetuskustannuksista.
- Nykyisin suurin osa vedystä tuotetaan vielä maakaasusta eli kyseessä on harmaa vety tai sininen vety, jos hiilidioksidipäästöt otetaan talteen.

Grahn, M. Malmgren, E. Korberg, A. Taljegard, M. Anderson, J.E. Brynolf, S. Hansson, J. Skov, I.R. Wallington, T.J. (2022). *Review of electrofuel feasibility – cost and environmental impact* https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7937

Valtioneuvosto (2022). *Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet.* Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja

SWECO

Nordic Hydrogen Route

- Gasgrid Finland ja Nordion Energi julkistivat keväällä 2022 Nordic Hydrogen Route-hankkeen. Hankkeen tavoitteena on rakentaa Perämeren alueelle rajat ylittävä infrastruktuuri ja avoin vetymarkkinan verkosto vuoteen 2030 mennessä.
  - Toteutuessaan tämä toimii merkittävänä vetytalouden kiihdyttäjänä erityisesti Perämeren alueella, johon Pohjois-Pohjanmaan kunnat, esim. Kalajoki, Raahe ja Oulu kuuluvat.
  - Lisäksi Nordic Hydrogen Route olisi ensimmäinen Suomen ja Ruotsin konkreettinen askel kohti Euroopan laajuista European Hydrogen Backbone initiative –hanketta.
    - European Hydrogen Backbone (EHB) initiative –hankkeen tavoitteena on nopeuttaa Euroopan hiilidioksidipäästöjen vähentämistä rakentamalla 2050-luvulle mennessä koko Euroopan Unionin laajuinen vetyverkosto. Lisäksi tavoitteena on edistää markkinoiden kilpailua, toimitusvarmuutta sekä edistää rajat ylittävää yhteistyötä.
- Pohjois-Pohjanmaan potentiaali on merkittävä kansallisessa ja rajat ylittävässä vetytaloudessa. Vetytalouden luomiseen ja kiihdyttämiseen on olemassa tahtotila koko Perämeren alueella.

Kuva: Schönberg, K. (2022)

Pohjois-Pohjanmaan liitto (11.4.2023). *Uusiutuvan energiatuotannon ja siihen kytkeytyvän vihreän vetytalouden mahdollisuudet ja maankäytön reunaehdot Pohjois-Pohjanmaalla.* EMMI-hanke

European Hydrogen Backbone (2022). *A HYDROGEN INFRASTRUCTURE VISION COVERING 28 COUNTRIES.* European Hydrogen Backbone

Gasgrid (2022). *Gasgrid Finland ja Nordion Energi ovat julkistaneet Nordic Hydrogen Routen – Euroopan ensimmäisen laajamittaisen rajat ylittävän vetyverkoston.* Gasgrid Finland ja Nordion Energi

Schönberg, K. (10.6.2022). *Kaasuverkkoyhtiö Gasgrid Finland haluaa rakentaa Suomeen jättimäisen putkiston kuljettamaan vetyä.* YLE. YLE uutiset

SWECO

Putkisuunnitelmat aluekehityksen kannalta

- Itämeren maissa suunnitellaan vetykaasuputken vetämistä Suomesta ja Ruotsista Saksaan. Lisäksi suunnitellaan vetyinfran rakentamista Suomesta Baltian maiden ja Puolan kautta Saksaan.
- Saksassa aiotaan muuttaa maakaasuputkia siten, että niissä voidaan kuljettaa vähähiilistä vetyä Itämeren alueelta Saksan eteläosiin vuoteen 2025 mennessä. 2030 mennessä vetyputkiverkosto voisi yltää jo pitkälle Ranskaan.
  - Tämä voisi tarkoittaa, että Suomessa tuotettu vety voisi päätyä (teollisuuden) käyttöön Keski-Euroopassa.
- Vetyputkihankkeissa ollaan esiselvitysvaiheessa, joissa selvitetään muun muassa EU-rahoitusvaihtoehtoja.
- Tämän hetken suunnitelmien pohjalta vetyverkosto voisi kasvaa jopa 5000 km pituiseksi. Vetyputki takaisi vedyn saatavuuden myös Suomessa, sillä putkia pitkin saadaan siirrettyä suuria määriä energiaa edullisesti.
  - Taloudellisesta näkökulmasta merkittävässä roolissa ovat pääomakustannukset. Lisäksi huomionarvoista on käyttöaste eli mitä suurempi käyttöaste on sitä alhaisemmiksi kulut muodostuvat.
- Vetyputkisuunnitelmat tukevat EU:n REPowerEU-suunnitelmaa, jonka tavoitteena on lopettaa Euroopan riippuvuus Venäjän fossiilisista polttoaineista ennen vuotta 2030. Keskeisimmät suunnitelman teemat ovat:
  - Energiansäästö;
  - Puhtaan energian tuottaminen;
  - Energiatoimitusten monipuolistaminen.
- Vetyä voitaisiin tuottaa sähköntuotantoalueilla ja kuljettaa putkea pitkin alueille, joissa on (biogeenistä) hiilidioksidia tarjolla. Vedystä ja hiilidioksidista voitaisiin tuottaa synteettisiä polttoaineita.

Euroopan komissio. (18.5.2022). *REPowerEU-suunnitelma: kohtuuhintaista, varmaa ja kestävää energiaa Euroopalle.* REPowerEU-suunnitelma

Noronen, V. (22.12.2022). *Suomen vetyputket yhdistyvät Saksan uusiin vetyputkiin.* Both$_2$nia. Suomen vetyputket yhdistyvät Saksan uusiin vetyputkiin (both2nia.com)

SWECO

Viitteet

Airliquide. (2023) *Storing Hydrogen.* Storing Hydrogen | Air Liquide Energies

Alvaro, A., Wan, D., Olden, V., Barnoush, A. (2019). *Hydrogen enhanced fatigue crack growth rates in a ferritic Fe-3 wt%Si alloy and a X70 pipeline steel*. Engineering Fracture Mechanics, 219, 106641. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106641

Bates, S. C. (2002). *Compilation of the engineering properties of solid hydrogen*. Thoughtventions Unlimited LLC.

Davis, S. J. et al. (2018). *Net-zero emissions energy systems*. Science, 360, eaas9793. https://doi.org./10.1126/science.aas9793

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Logistiikkaselvitys.* Kiertotalouskeskus. https://www.digipolis.fi/kiertotalouskeskus/uudet-avaukset

Euroopan komissio. (18.5.2022). *REPowerEU-suunnitelma: kohtuuhintaista, varmaa ja kestävää energiaa Euroopalle.* https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_fi

European Hydrogen Backbone (2022). *A HYDROGEN INFRASTRUCTURE VISION COVERING 28 COUNTRIES.* ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf

Gasgrid (2022). *Gasgrid Finland ja Nordion Energi ovat julkistaneet Nordic Hydrogen Routen – Euroopan ensimmäisen laajamittaisen rajat ylittävän vetyverkoston.* https://gasgrid.fi/2022/04/22/gasgrid-finland-ja-nordion-energi-ovat-julkistaneet-nordic-hydrogen-routen-euroopan-ensimmaisen-laajamittaisen-rajat-ylittavan-vetyverkoston/

Grahn, M. Malmgren, E. Korberg, A. Taljegard, M. Anderson, J.E. Brynolf, S. Hansson, J. Skov, I.R. Wallington, T.J. (2022). *Review of electrofuel feasibility – cost and environmental impact*. https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7937

Honeywell. (2023). What is the equivalent reading of Hydrogen LEL to PPM?

Howard, K. (12.5.2022). *World's first liquefied hydrogen ship completes voyage in Japan.* Pinsent Masons. https://www.pinsentmasons.com/out-law/news/worlds-first-liquefied-hydrogen-ship-completes-voyage-in-japan

Hurskainen, M. (2.12.2019). *Liquid organic hydrogen carriers (LOHC): Concept evaluation and techno-economics.* VTT. https://cris.vtt.fi/en/publications/liquid-organic-hydrogen-carriers-lohc-concept-evaluation-and-tech

IEA (2019). *The Future of Hydrogen.* https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

Lapytova, R. (2022). *Development and application of a novel tuning-fork test in studying hydrogen-induced fracture in as-quenched martensitic steels.* Acta Univ. Oul. C 856. http://urn.fi/urn:isbn:9789526235103

Motiva (4.8.2020). *Vety.* https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety

Mäntylä, J.-M. (30.1.2023). Suomessa on tapahtumassa kaikessa hiljaisuudessa vetyvallankumous – katso kartalta, yltääkö vihreä siirtymä kotikuntaasi. YLE. https://yle.fi/a/74-20014811

Noronen, V. (22.12.2022). *Suomen vetyputket yhdistyvät Saksan uusiin vetyputkiin.* BothH_2nia. Suomen vetyputket yhdistyvät Saksan uusiin vetyputkiin (both2nia.com)

Pallaspuro, S. (2018) *On the factors affecting the ductile-brittle transition in as-quenched fully and partially martensitic low-carbon steels*. Acta Univ. Oul. C 655. http://urn.fi/urn:isbn:9789526218977

Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th ed. (1997).

Pohjois-Pohjanmaan liitto (11.4.2023). *Uusiutuvan energiatuotannon ja siihen kytkeytyvän vihreän vetytalouden mahdollisuudet ja maankäytön reunaehdot Pohjois-Pohjanmaalla.* https://www.pohjois-pohjanmaa.fi/wp-content/uploads/2023/04/EMMI_TP1_Uusiutuva-energiantuotanto-ja-vetytalous_loppuraportti_11042023.pdf

Satyapal, S. (2017). *Hydrogen and Fuel Cells Overview*. U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/fcto-h2-fc-overview-dla-worldwide-energy-conf-2017-satyapal.pdf

Schönberg, K. (10.6.2022). *Kaasuverkkoyhtiö Gasgrid Finland haluaa rakentaa Suomeen jättimäisen putkiston kuljettamaan vetyä.* YLE. https://yle.fi/a/74-20014811

Työterveyslaitos (12.7.2022). Vety. https://ova.ttl.fi/vety

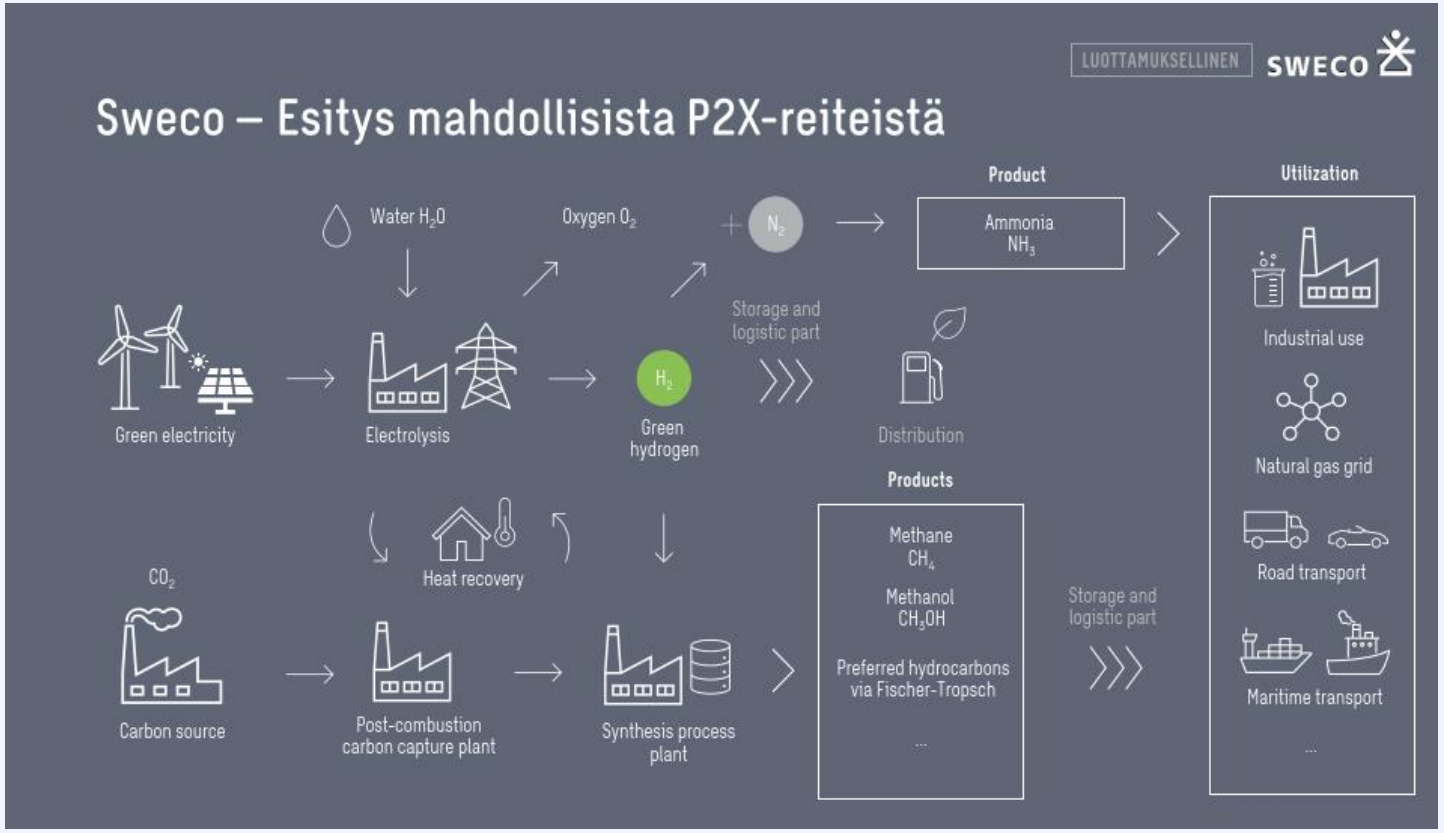
United States Department of Energy (2001) Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies.

Valtioneuvosto (2022). *Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet.* https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf

SWECO

4. Vedyn jatkojalostus

P2X



- Power-to-x eli P2X-teknologioita voidaan hyödyntää muun muassa metaanin, metanolin ja ammoniakin valmistuksessa. Näillä tuotteilla on jo nykyisellään käyttökohteita muun muassa kemianteollisuudessa, mutta tulevaisuudessa niillä nähdään olevan merkittävä rooli myös liikenteen polttoaineena.
- Raaka-aineeksi tarvitaan hiilidioksidia savukaasuista tai ilmasta, vetyä vedestä ja typpeä ilmasta. Hyödyntämällä uusiutuvaa energiaa, kuten aurinko- tai tuulisähköä, valmistusprosessi on täysin päästötön.
- Lähteessä Wulf et al. (2018) on esitelty kattava listaus (128 kpl) erilaisista Power-to-Gas tutkimus- ja demonstraatioprojekteista Euroopassa, joista osa on saatu jo päätökseen.

Metanointi

- Metaani, CH_4

  $H_2 + CO_2$ (+ katalyytit) → $CH_4 + H_2O$

- Metanointi tapahtuu joko katalyyttisen tai biologisen reaktion avulla.
  - Katalyyttinen prosessi on kaupallisessa käytössä. Katalyyttivaihtoehtoja on monia, mutta yleisimmin käytetään nikkelipohjaista katalyyttiä. Tyypillisesti nikkeliä pidetään optimaalisena katalyyttinä sen suhteellisen korkean aktiivisuuden, hyvän CH_4 selektiivisyyden ja alhaisen raaka-ainehinnan vuoksi. Prosessi kuitenkin vaatii reagenssikaasujen (H_2 ja CO_2) suurta puhtautta, koska metallikatalyytit ovat alttiita myrkyttymiselle, mikä aiheuttaa deaktivoitumista. Tämä johtaa heikompaan suorituskykyyn ja lyhentää katalyytin käyttöikää.
    - Hiilidioksidin hydrogenointi metaaniksi, Sabatier-reaktio, on katalyyttinen prosessi. Tyypillisesti prosessi toimii korkealla lämpötilatasolla noin 200-550 °C, riippuen katalyytin aktiivisuudesta, ja korkeassa paineessa aina 100 baariin asti. Reaktio on termodynaamisesti edullisempi korkeassa käyttöpaineessa.
    - Yleisin katalyytti on Ni-pohjainen, mutta myös muita metallikatalyyttejä voidaan hyödyntää, kuten Ru, Rh ja Co.
  - Biologinen metanointi on vielä demonstraatiovaiheessa. Biologisessa metanoinnissa hyödynnetään biologisia katalyyttejä, metanogeenisiä mikro-organismeja, jotka katalysoivat metanointireaktiot. Mikro-organismit kestävät reagoivan kaasun syötteen vaihteluita ja epäpuhtauksia, kuten rikkivetyä, paremmin kuin metallikatalyytit.
    - Biologinen metanointi tapahtuu noin 35-65 °C ja normaalipaineesta 15 bar asti. Näissä olosuhteissa on optimaaliset kasvuolosuhteet mikro-organismeille.

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renewable Energy 85, s.1371–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066

Metaanin käyttökohteita

- Metaania voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineena teollisuudessa ja liikenteessä sekä useiden kemikaalien synteesin lähtöaineena.
- Synteettinen metaani vastaa ominaisuuksiltaan maakaasua, joten metaania voidaan hyödyntää olemassa olevassa kaasuinfrastruktuurissa tuotannossa, jakelussa ja loppukäytössä.
    - Maakaasun käyttökohteita löytyy muun muassa teollisuudesta, kaukolämmön ja sähkön yhteistuotannosta, merenkulusta sekä raskaasta liikenteestä.

P2X Solutions. (Julkaisuaika tuntematon). *Tuotteemme ja palvelumme.* P2X - Tuotteemme ja palvelumme

Gasum. (Julkaisuaika tuntematon). *Maakaasumarkkina Suomessa.* Gasum - Maakaasumarkkina Suomessa

Metanolin valmistus

- Metanoli, CH_3OH

  $H_2 + CO_2$ (+ katalyytit) → $CH_3OH + H_2O$
- Metanolin tuotantoon hiilidioksidista on olemassa kaksi katalyyttistä reittiä:
  - Suora hiilidioksidin hydrogenointi,
  - Hiilidioksidin muuntaminen hiilimonoksidiksi (häkä, CO), jonka jälkeen hiilimonoksidi hydrogenoidaan, CAMERE-prosessi.
- Hiilidioksidin suorassa hydrogenoinnissa metanolia tuotetaan käyttämällä raaka-aineena puhdasta hiilidioksidia ja vetyä. Prosessissa on kolme pääreaktiota:
  1) Hiilidioksidin hydrogenointi: $CO_2 + 3H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$
  2) Käänteinen vesikaasun siirtoreaktio: $CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$
  3) Hiilimonoksidin hydrogenointi: $CO + 2H_2 \leftrightarrow CH_3OH$

Jadhav, S. G., Vaidya, P. D., Bhanage, B. M., Joshi, J. B. (2014). *Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies*, Chemical Engineering Research and Design, 92 (11), s. 2557-2567. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.03.005

Pérez-Fortes, M. & Tzimas, E. (16.6.2016) *Techno-economic and environmental evaluation of carbon dioxide utilisation for fuel production*. Synthesis of methanol and formic acid; EUR 27629 EN; doi: 10.2790/981669

Metanolin valmistus

- Metanolia voidaan valmistaa myös metaanista.
- Metaanin suoraa hapetusta tutkitaan ja kehitetään, eikä se ole vielä kaupallisesti käytössä, koska sopivaa katalyyttiä korkean reaktiolämpötilan alentamiseksi ja metanolin selektiivisyyden lisäämiseksi ei ole vielä löydetty.
  - Metaanin suora konversioreitti vaatii melko korkean lämpötilan (> 200°C) metaanin kemiallisesta stabiilisuudesta johtuen.
    - Metaani on erittäin stabiili yhdiste, jota on vaikea aktivoida. Metaanissa oleva CH-sidos saadaan aktivoitua kineettisesti ja termodynaamisesti hapettamalla. Metanolissa on kuitenkin heikompi CH-sidos, jolloin metanoli voi hajota helposti hapen läsnä ollessa muodostaen formaldehydiä tai hiilidioksidia.
  - Suurin haaste suorassa metaanista metanoliksi –reitissä on saavuttaa parempi metanolin selektiivisyys kohtuullisella metaanin konversionopeudella.

Salahudeen, N., Rasheed, A.A., Babalola, A., Moses, A. U. (2022). Review on technologies for conversion of natural gas to methanol, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 108, 104845. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104845

Sharma, R. Poelman, H. Marin, G. Galvita, V. (2020). Chemical Looping for Catalyst. *Approaches for Selectivity Oxidation of Methane to Methanol.* MPDI. https://doi.org/10.3390/catal10020194

Metanolin käyttökohteita

- Metanolilla on nykyisellään tärkeä rooli kemianteollisuuden lähtöaineena.
- Vihreällä metanolilla on laaja käyttökohdemarkkina. Sitä voidaan hyödyntää meriliikenteen polttoaineena tai sekoitekomponenttina, joko sellaisenaan tai jalostettuna tieliikenteen polttoaineissa.
  - Olemassa olevaa logistiikka- ja jakeluinfrastruktuuria voidaan hyödyntää synteettisen metanolin tuomisessa markkinoille.
  - Meriliikenteen polttoaineena metanolin potentiaaliksi on tunnistettu erityisesti pitkät merimatkat.
- Polttoainekäytön lisäksi synteettistä metanolia voidaan käyttää kemianteollisuuden raaka-aineena.
  - Jatkojalosteena esim. liimoissa, liuottimissa ja muoveissa.

ST1. (2.11.2022). *Tutkimuksen kohteena Power-to-X.* ST1 - Power-to-X

Tanskanen, J. (11.1.2023). *Merillä alkaa mullistus – vihreästä ammoniakista on tulossa laivojen uusi polttoaine.* YLE. Vihreästä ammoniakista on tulossa laivojen uusi polttoaine

SWECO

Ammoniakin valmistus

- Ammoniakki, NH_3

  H_2 + ilmasta erotettu N_2 (+ katalyytti) → NH_3
- Ammoniakkia valmistetaan pääsääntöisesti Haber-Bosch –menetelmällä. Ammoniakkireaktorissa vety ja typpi reagoivat katalyyttisesti korkeassa paineessa ja lämpötilassa.
  - Haber-Bosch-menetelmässä vety on pääsääntöisesti tuotettu maakaasua reformoimalla, jolloin syntyy hiilidioksidipäästöjä.
    - Hiilidioksidipäästöt maakaasun reformoinnista on mahdollista ottaa talteen ja hyödyntää muissa prosesseissa.
  - Vedyn valmistus esimerkiksi elektrolyysillä tarjoaa toteuttamiskelpoisen tuotantoreitin vihreän ammoniakin valmistukseen.
  - Haber-Bosch-menetelmä vaatii korkean lämpötilan reaktiossa >400 °C ja yli 150 bar:n paineen.

Danish Energy Agency. (2017). *Technology Data – Renewable fuels* Renewable fuels

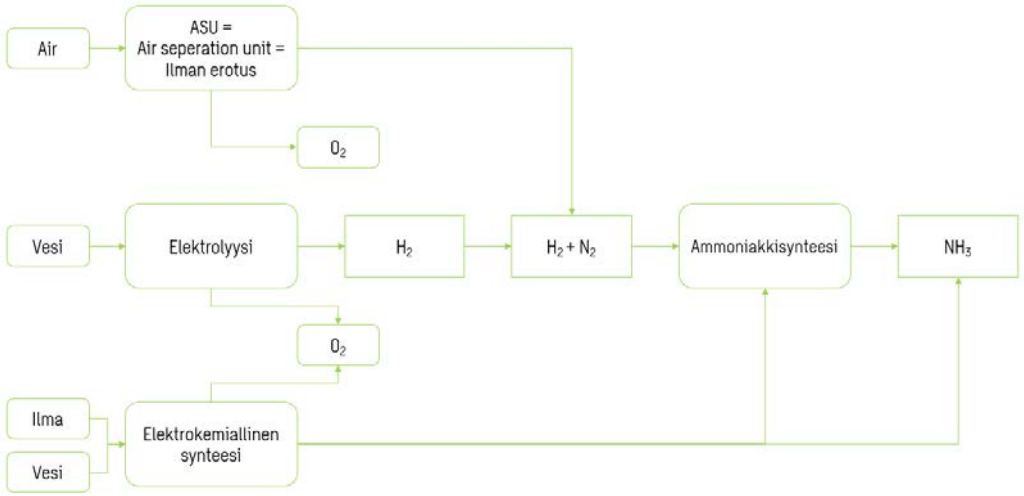
Gfavam, S. Vahdati, M. Wilson, I.A.G. Styring, P. (29.3.2021). *Sustainable Ammonia Production Processes.* Sustainable ammonia production processes

Shi, J. Zhu, Y. Feng, Y. Yang, J. Xia, C. (2023). *A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in marine Engines.* Research Gate . A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping

SWECO

Ammoniakin valmistus

- Kuvassa on esitetty vihreän ammoniakin tuotanto. Prosessi sisältää vedyn tuotannon elektrolyyserillä, ilman erotusyksikön (ASU), josta saadaan typpeä sekä ammoniakkisynteesin.
- Ammoniakkia voidaan valmistaa myös elektrokemiallisella prosessilla, joka voidaan jakaa kolmeen kategoriaan operointi lämpötilan mukaan:
  - Matalat lämpötilat alle 100 °C
  - Keskilämpötilat 100-400 °C
  - Korkeat lämpötilat 400-750 °C
- Prosessi tapahtuu esimerkiksi kaksikammioisessa reaktorissa. Kammioiden välillä on puolijohtava kalvo, jonka tehtävänä on kuljettaa vetyprotoneita vetykammiosta typpikammioon, jossa vetyprotoni reagoi typen kanssa. Vetykammion puoleinen kalvo toimii anodina ja jännitteen avulla vetykaasu muutetaan vetyprotoneiksi ja elektroneiksi. Typpikammion puoleinen kalvo toimii puolestaan katodina, jonka pinnassa protonit yhdistyvät typpiatomeihin muodostaen ammoniakkia.
  - Verrattuna laajasti käytössä olevaan Haber-Bosch –reaktioon, elektrokemiallinen prosessi vaatii alhaisemman operointilämpötilan ja –paineen. Lisäksi elektrokemiallisen prosessin etuja ovat korkea hyötysuhde ja selektiivisyys sekä modulaarisuus, joka helpottaa laitoksen skaalautumista.
  - Sivureaktiossa syntyy myös vetyä, joka voidaan hyödyntää esim. Haber-Bosch -prosessissa
  - TRL 1–2
- NTP-synteesi (*Non-Thermal Plasma Synthesis)* tapahtuu matalissa lämpötiloissa (noin 50 °C) ja 1 atm:n paineessa. Menetelmä on vielä pääosin tutkimus- ja kehitysvaiheessa.



Kuva: mukaillen Danish Energy Agency (2017)

Danish Energy Agency. (2017). *Technology Data – Renewable fuels* Renewable fuels

Gfavam, S. Vahdati, M. Wilson, I.A.G. Styring, P. (29.3.2021). *Sustainable Ammonia Production Processes.* Sustainable ammonia production processes

Shi, J. Zhu, Y. Feng, Y. Yang, J. Xia, C. (2023). *A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in marine Engines.* Research Gate . A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping

SWECO

Ammoniakin käyttökohteita

- Nykyisellään ammoniakkia ei valmisteta Suomessa vaan sitä tuodaan muualta raaka-aineeksi. Flexens Oy ja KIP Infra Oy ovat allekirjoittaneet aiesopimuksen maanvuokrasta tarkoituksena rakentaa Kokkolaan Suomen suurin vedyntuotantolaitos, jonka päätuotteena vedyn lisäksi tulee olemaan vihreä ammoniakki.
  - Ammoniakkia käytetään jo nykyisellään lannoitteiden tuotannossa raaka-aineena ja typpihapon valmistuksessa. Myös typpihappo on lannoitetuotannon raaka-aine.
  - Näiden lisäksi ammoniakilla on nykyisellään paljon käyttökohteita pesu- ja puhdistusaineissa, jäähdytyslaitteissa, metallurgiassa ja niin edelleen.
- Vihreän ammoniakin lupaavaksi käyttökohteeksi on tunnistettu käyttö laivojen polttoaineena.
  - Laivoissa ammoniakki ja/tai metanoli nähdään käyttökelpoisempana polttoaineena kuin vety, koska vety vaatii enemmän tilaa ja näin vetytankit veisivät laivoista arvokasta hyötytilaa.
- Ammoniakki on myös vaihtoehto kantaja-aineeksi, jos vetyä halutaan kuljettaa tai varastoida.

Tanskanen, J. (11.1.2023). *Merillä alkaa mullistus – vihreästä ammoniakista on tulossa laivojen uusi polttoaine.* YLE. Vihreästä ammoniakista on tulossa laivojen uusi polttoaine

Kankaanpää, T. (12.5.2022). *Ammoniakin merkitys Suomen teollisuudelle.* Yara Suomi Oy. Ammoniakin merkitys Suomen teollisuudelle

Muita sovelluksia: Etanolin valmistus

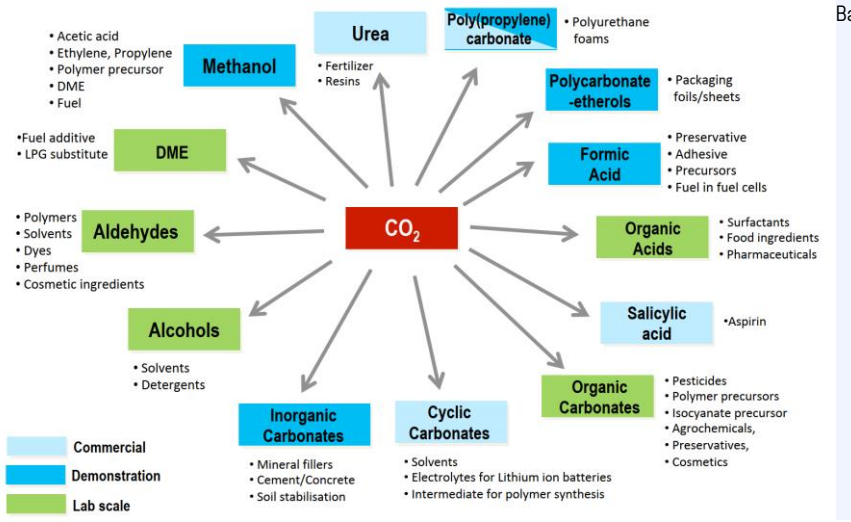
- Etanolin valmistus hiilidioksidista ja vedystä on mahdollista summareaktion ollessa:
  - $6\ H_2 + 2\ CO_2 \rightarrow C_2H_5OH + 3\ H_2O$
- Prosessit ovat vielä kehitysasteella ja ne perustuvat käänteiseen water gas shift – reaktioon:
  - $H_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO$
- Hiilimonoksidista etanolia tuotettaessa summareaktiot ovat:
  - $6\ CO + 3\ H_2O \rightarrow C_2H_5OH + 4\ CO_2$ Etanoli hiilimonoksidista (6 C → 1 EtOH)
  - $3\ CO + 3\ H_2 \rightarrow C_2H_5OH + CO_2$ Etanoli hiilimonoksidista ja vedystä (3 C → 1 EtOH)
  - $2\ CO + 4\ H_2 \rightarrow C_2H_5OH + H_2O$ Etanoli hiilimonoksidista ja vedystä(2 C → 1 EtOH)

- Etanolituotannon kaasureformointiprosesseja on kehitetty biomassan kaasutuksesta saatavalle synteesikaasulle ja terästeollisuuden hiilimonoksidia sisältäville poistokaasuille (Lanzatech).
- Etanolitehtaille mahdollisuus valmistaa etanolia hiilidioksidista ja vedystä olisi houkutteleva, koska tuotannossa syntyy sivutuotteena hiilidioksidia, jonka prosessointi etanoliksi nostaisi laitoksen etanolituotannon puolitoistakertaiseksi.

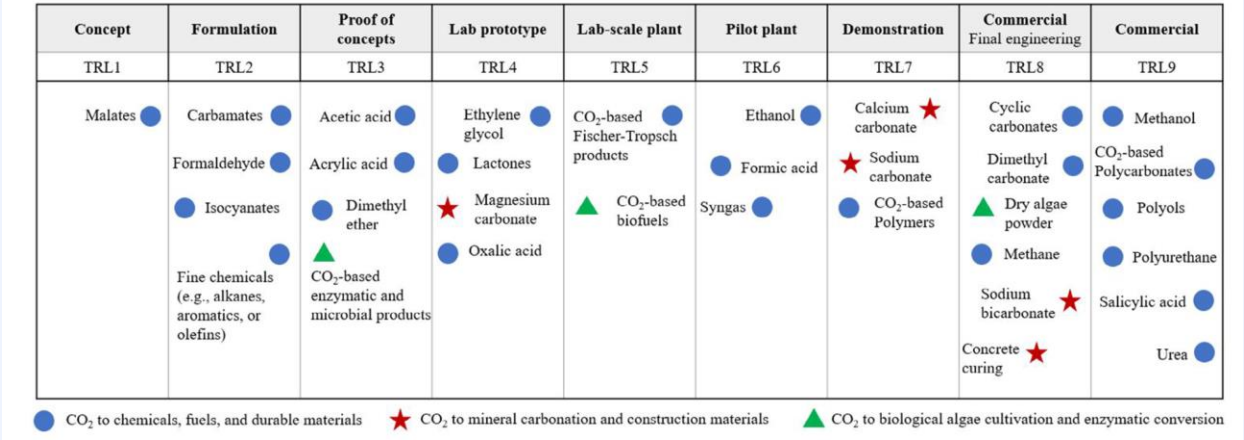
Muita sovelluksia: Biomassan valmistus

- P2X prosessit soveltuvat myös biomassan valmistukseen. Lopputuote voi olla biomassa sinänsä (yksisoluproteiini, Solar Foods) tai biomassan sisäinen komponentti, esimerkiksi polymeeri.
- Biomassan valmistuksessa tarvitaan vedyn ja hiilidioksidin lisäksi happea ja ravinteita, jolloin karkea summareaktio on:
  - $CO_2 + m\ H_2 + n\ O_2 + p\ NH_3 \rightarrow CH_xO_yN_p + z\ H_2O$
  - Prosessissa syntyy merkittävästi lämpöenergiaa, jonka hyödyntäminen on mahdollista lämpöpumppujen avulla.
  - Typen lisäksi ravinteina tarvitaan fosforia, kaliumia ja useita hivenaineita.
- Biomassan valmistukseen perustuvat P2X-prosessit ovat vielä kehitysasteella. Solar Foods on tekemässä tuotantomittakaavan demonstraatiolaitosta proteiinintuotantoon Vantaalle.
- Laajamittaisesti sovellettuna hiilidioksidiin, vetyyn ja ammoniakkiin perustuva proteiinituotanto voisi vapauttaa maata maatalouskäytöstä muuhun käyttöön.

Muita sovelluksia: CO_2 hyötykäyttö



Bazzanella & Krämer (2020)



Chauvy & De Weireld (2019)

- Kemiallisessa ja biokemiallisessa hyötykäytössä CO_2 toimii lähtöaineena eri kemikaaleille.
- Yli 100 reaktioreittiä eri lopputuotteiksi jo tunnistettu

Kaupallisia esimerkkejä:

UREA:

- $CO_2 + NH_3$, ureaa voidaan hyödyntää lannoitteena tai lähtöaineena, esim. hartsit

EPÄORGAANISET KARBONAATIT

- Esim. rakennusmateriaalit

SALISYYLIHAPPO:

- Kolbe-Schmitt –synteesi, aspiriinin tuotanto

SYKLISET KARBONAATIT:

- Käytetään liuottimina, elektrolyytteinä Li-akuissa ja raaka-aineina muoviteollisuudessa

Demonstraatio- ja/tai kaupallistamisvaiheessa:

POLYMEERIT:

- Polykarbonaattipolyolit, esim. polyuretaanin valmistus

MUURAHAISHAPPO

- Bulk-kemikaali

MUUT POLTTOAINEET JA KEMIKAALIT

- $CO_2 + H_2$
  - Fischer-Tropsch-synteesi:
    - Esim. bensiini, diesel, kerosiini
  - Hydrogenointi
    - Esim. formaldehydi
  - Fermentointi
    - Esim. PET-, PEF- ja PE-muovit

Teollisuuden ja liikenteen tarpeet

- Kuten edellä esiteltiin metaanilla, metanolilla ja ammoniakilla on jo nykyisellään laajasti käyttökohteita ja potentiaalisia käyttökohteita on tunnistettu sekä teollisuudessa että liikenteessä.
- Teollisuudessa on suuri potentiaali erityisesti kemianteollisuuden raaka-aineena.
- Metanolilla ja ammoniakilla nähdään merkittävää potentiaalia liikenteen polttoaineena raskaassa liikenteessä (esim. rekat ja laivat).
- Liikenteen päästöjen vähentäminen on erityisen tärkeää.
  - Liikenteen päästöt kuuluvat taakanjakosektoriin ja ovat sektorin suurimmat (noin 40%).
    - Taakanjakosektori = päästökaupan ulkopuoliset sektorit: liikenne, maatalous, rakennusten erillislämmitys, jätehuolto, työkoneet, päästökaupan ulkopuoliset pienet teollisuus- ja lämpölaitokset sekä fluoratut kasvihuonekaasut.
  - Vuonna 2021 liikenteen päästöt olivat noin 10,1 Mt CO_2-ekv, vuoteen 2020 verrattuna päästöt vähenivät noin 3 %. Vuoden 2021 liikenteen päästöistä noin 93% muodostui tieliikenteestä.
    - Liikenteen päästöt Pohjois-Pohjanmaalla 914 kt CO_2-ekv / 2020.
- Liikenteen päästöjä saadaan vähennettyä optimoimalla ja vähentämällä liikennettä, mutta myös edistämällä teknologioita, joilla voidaan vähentää liikenteen päästöjä, kuten biokaasun ja sähköpolttoaineiden lisääminen.

Liikenne- ja viestintäministeriö. (6.5.2021). *Hallitus päätti tieliikenteen päästöjen vähentämiskeinoista – päästöt puoleen 2030 mennessä.* Hallitus päätti tieliikenteen päästöjen vähentämiskeinoista

Tieto.Traficom (7.9.2021). *Liikenteen CO2-päästöt liikennemuodoittain sekä maakunnittain.* Liikenteen CO2-päästöt

Ympäristöministeriö. (Julkaisuaika tuntematon). *Kysymyksiä ja vastauksia keskipitkän ilmastopolitiikan suunnitelmasta.* Keskipitkän ilmastopolitiikan suunnitelma

SWECO

Sivutuotteiden käyttökohteita

- Vedyn ja synteettisten polttoaineiden valmistuksessa syntyy sivutuotteita, jotka kiertotalousteeman mukaisesti on hyvä hyödyntää.
- Viereisessä taulukossa on kuvattu hapen ja lämmön potentiaalisia käyttökohteita.
  - TCD-prosessi, *thermocatalytic decomposition of methane,* prosessissa syntyy (sivu)tuotteena myös hiiltä (esim. hiilinanoputki, grafiitti ja aktiivihiili). Syntyvälle hiilelle on useita potentiaalisia käyttökohteita esim. akkujen raaka-aineena.
- Sopivia käyttökohteita on paljon, joten tapauskohtaisesti on löydettävät soveltuvimmat ja potentiaalisimmat käyttökohteet.
  - Esim. Happea voidaan käyttää teollisuudessa voimakkaana hapettimena (teräs- ja kemianteollisuus) tai happivalkaisussa (sellu- ja paperiteollisuus). Elintarviketeollisuudessa happea hyödynnetään suojakaasupakkaamiseen sellaisenaan tai seoksena typen ja/tai hiilidioksidin kanssa. Näiden lisäksi käyttökohteita on monia muitakin vedenpuhdistusprosesseista aina lääkehapen valmistukseen ja kalankasvatukseen.

Happi	**Lämpö**
Vedenpuhdistusprosessit, aerobinen	Kaukolämpö ja lämpöpumput
Elintarvikepakkaukset, Laatuvaatimukset huomioitava	Kuivatusprosessit
Otsonin valmistus	Kasvihuoneet
Hitsauskaasu	Kalankasvatus
Lääkehappi, Laatuvaatimukset huomioitava	
Teräs- ja kemianteollisuus	
NO_x päästöjen vähentäminen	
Kalankasvatus	
Kasvihuoneiden kasteluvesistä	
Happivalkaisu	
Happipoltto	

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Teknologiaselvitys.* Kiertotalouskeskus. Uudet avaukset

Woikoski (julkaisuaika tuntematon). *Happi.* Happi - Woikoski

SWECO

P2X laitokselle soveltuvat sijainnit

- Metaanin ja metanolin tuotantolaitosten optimaaliset sijainnit ovat lähellä hiilidioksidilähdettä. Puolestaan ammoniakin valmistuksen optimaalisimmiksi kohteiksi nähdään erityisesti satamien läheisyydessä olevat teollisuusalueet.
- Mikäli vety valmistetaan samalla alueella, sijaintia pohdittaessa on huomioitava seuraavat asiat:
  - Laitoksen toimintaperiaate ja tuotantomäärät;
  - Sähkön saatavuus;
  - (Teollisuus)alueiden tarvitsema infra;
  - Hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet;
  - Kuluttajan ja/tai siirtolinjan läheisyys;
  - Mahdollisen vetyputken läheisyys.
- Ensisijaisesti alueet, jotka soveltuvat P2X laitoksille ovat:
  - Teollisuusalueet ja teollisuuden lähialueet, huomioiden sivutuotteiden potentiaaliset käyttökohteet;
  - Liikenne- ja logistiikka-alueet saavutettavuuden sekä polttoainekäytön ja kuljetusmahdollisuuksien näkökulmista;
    - Tulevaisuuden vetyputken/vetyverkon läheisyys;
  - Uusiutuvan energian, vesivarannon, CO_2:n saatavuus.
- Sopivaa aluetta valitessa on myös syytä huomioida: kaavoitus, veden saatavuus ja laatu (erityisesti vetyä valmistettaessa elektrolyysillä), mahdolliset vaatimukset suojarakenteille, maan muokattavuus, alueen luonnontilaisuus sekä luonnonsuojelu ja kulttuuriympäristö.
- Uuden P2X-laitoksen perusedellytyksenä on alueen kaavoitus, joka mahdollistaa sijoittamisen. Kohteen tulee olla teollisuus- ja varastoaluetta, jolloin kaavamerkintä on useimmiten ”T”. ”T/KEM” -kaavamerkintää suositellaan, kun laitoksen toimintaan liittyy suuronnettomuuden vaara. ”T/KEM” -kaavamerkintä mahdollistaa siis vaarallisia kemikaaleja valmistavan tai varastoitavan laitoksen teollisuus- ja varastointialueella.

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Teknologiaselvitys.* Kiertotalouskeskus. Uudet avaukset

Pohjois-Pohjanmaan liitto (11.4.2023). *Uusiutuvan energiatuotannon ja siihen kytkeytyvän vihreän vetytalouden mahdollisuudet ja maankäytön reunaehdot Pohjois-Pohjanmaalla.* EMMI-hanke

Raahen kaupunki (2022). *Selvitystyö vedyn tuotantolaitoksen sijoittumisesta Raahen kaupungin alueelle.* Saatavilla: toimittanut Raahen kaupunki 10.2.2023

Tukes (julkaisuaika tuntematon). *Maankäytön suunnittelu.* Maankäytön suunnittelu

SWECO

Esimerkkejä P2X laitokselle soveltuvista sijainneista Pohjois-Pohjanmaalla

- Pohjois-Pohjanmaalla P2X laitokselle soveltuvia alueita ovat esimerkiksi Nuottasaari Oulussa sekä Raahen teollisuusalue Raahen Sataman välittömässä läheisyydessä.
  + Sekä Nuottasaaressa että Raahen teollisuusalueella on teollisuutta eli potentiaalisia vedyn, P2X-tuotteiden ja sivutuotteiden hyödyntämismahdollisuuksia.
  + Alueet sijaitset päätiestön ja satamien läheisyydessä. Alueilla on satamien lisäksi paljon raskasta liikennettä, ja tulevaisuudessa alueiden välittömään läheisyyteen on suunniteltu vetyputkea. Raskas liikenne ja satamat ovat sekä potentiaalinen käyttökohde tuotteille, mutta tarjoavat myös kuljetusmahdollisuuden vetyputken lisäksi.
  + Uusiutuvan energian saatavuus, joka tulee suunnitelmien mukaan lisääntymään tulevaisuudessa.
  + Sekä Oulussa että Raahessa on panostettu vetytalouden kehittymiseen.

Pohjois-Pohjanmaan liitto (11.4.2023). *Uusiutuvan energiatuotannon ja siihen kytkeytyvän vihreän vetytalouden mahdollisuudet ja maankäytön reunaehdot Pohjois-Pohjanmaalla.* EMMI-hanke

Teknologiatoimittajia

Elektrolyysi	Metanointi	Metanolin tuotanto	Ammoniakin tuotanto
Nel hydrogen (AEL, PEM)	MAN Energy Solutions (katalyyttinen)	Topsoe	Thyssenkrupp
Hydrogenics / Cummins (AEL, PEM)	Hitachi Zosen Inova (katalyyttinen)	MAN Energy Solutions	Kapsom
ITM (PEM)	Topsoe (katalyyttinen)	BSE Methanol	Stami
Thyssenkrup (AEL)	Thyssenkrupp (katalyyttinen)	Thyssenkrupp	Topsoe
Green Hydrogen Systems (AEL)	HZI Schamck (biologinen)	Kapsom	Fuel Positive
Siemens (PEM)	QPower (biologinen)		AMMPower
Asahi Kasei (AEL)	Electroachea (biologinen)		
HydrogenPro AS (AEL)	Biogasclean (biologinen)		
MAN Energy Solutions			
H-Tec Systems (PEM)			
Elogen (PEM)			
Enapter (AEL			
Giner ELX (AEL)			
iGas energy (PEM)			
Sunfire (AEL, SOEC)			
Convion (SOEC)			
Fortescue Future Industries			

Kustannusten muodostuminen

- Synteettisten polttoaineiden tuotantokustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat elektrolyyseri ja sen teho, energian hinta ja vedyn varastoinnin kustannukset. Tuotantokustannukset vaihtelevat myös alueellisesti.
- Hintatason määrittävää tai sitä ohjaavaa sääntelyä ei tällä hetkellä ole.
- Korkean sähkön hinnan kohteissa synteettisten polttoaineiden taloudellinen kannattavuus voi laskea merkittävästi.
- Suomessa on kirjattu sähkömarkkinalakiin yhden hinta-alueen strategia. Aika ajoin kuitenkin Suomessa keskustellaan pitäisikö ottaa Ruotsista ja Norjasta mallia ja jakaa maa eri hinta-alueisiin.
  - Ruotsissa alueita on neljä (4) ja Norjassa viisi (5). Sähkön on siellä halvinta, missä sähkö tuotetaan eli pohjoisessa.
  - Myös Suomessa sähkön tuotanto keskittyy enemmän pohjoiseen merkittävien tuulivoimainvestointien myötä. Suunnitteilla olevista tuulivoimapuistoista merkittävä osa sijoittuu Pohjois-Pohjanmaalle.
  - Kun energiantuotanto sijoittuu etäälle kulutuksesta voi se aiheuttaa pullonkaulojen muodostumista sähköverkkoon. Pullonkaulojen estämiseksi ja poistamiseksi on rakennettava lisää siirtoyhteyksiä. Tuulivoiman lähelle sijoittuva kulutus pienentää tehon tarvetta muualta verkosta ja siirrosta aiheutuvat häviöt ovat vähäisempiä.

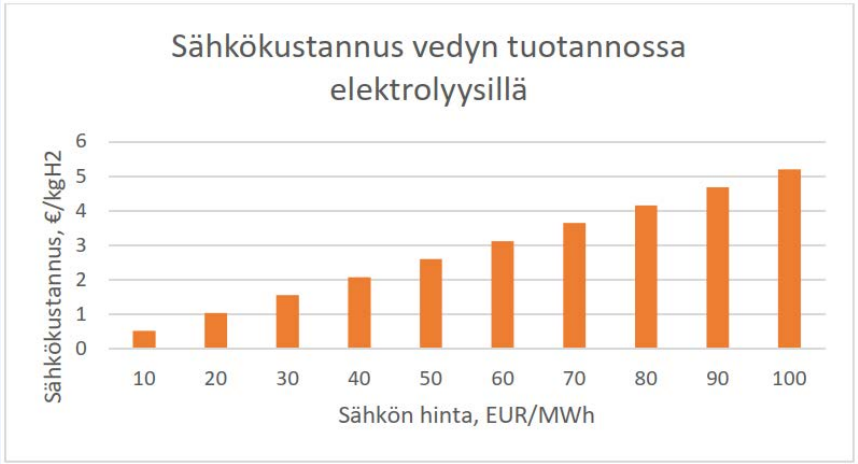
Vaara K. (19.8.2022). *Suomessa pörssisähkö on ajoittain jopa sata kertaa kalliimpaa kuin Pohjois-Ruotsissa – syynä hinnoitteluperiaate, jota Suomi ei halua.* YLE. Sähkön hinta - YLE

Grahn, M. Malmgren, E. Korberg, A. Taljegard, M. Anderson, J.E. Brynolf, S. Hansson, J. Skov, I.R. Wallington, T.J. (2022). *Review of electrofuel feasibility – cost and environmental impact.* https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7937

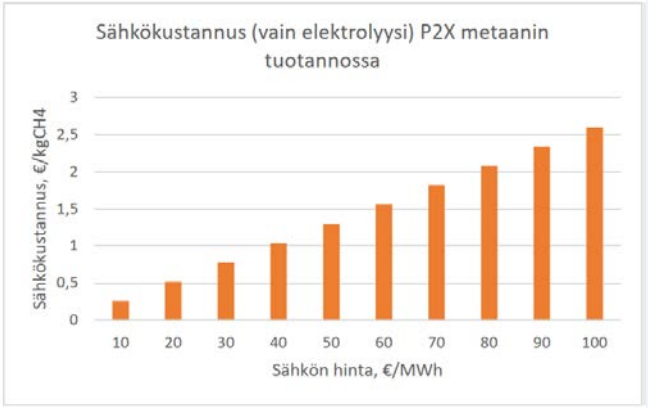
SWECO

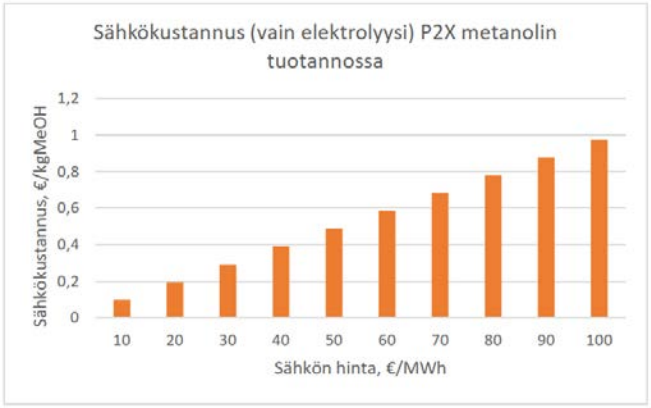
Kustannusten muodostuminen

- Elektrolyysillä valmistetun vedyn tuotantokustannus koostuu pääosin sähkön hinnasta ja pääomakustannuksista. Muiden kustannusten (kunnossapito, operointi ym.) osuus on vedyn tuotannossa vähäinen.
- Sähkön hinnan vaikutusta vetytuotannon kustannuksiin on tarkasteltu viereisessä kuvassa. Karkealla tasolla 20 €/MWh lisäys sähkön hintaan nostaa vedyn tuotantokustannusta noin 1 €/kg.
- Vetytuotannon pääomakustannus riippuu laitoksen investointikustannuksesta, laskennassa käytetystä kuoletusajasta ja korosta, sekä laitoksen vuotuisesta käyttöajasta ja kapasiteetin käyttöasteesta. Karkeasti voidaan arvioida vedyn tuotannon pääomakustannuksen olevan noin 1-2 €/kg tuotettua vetyä.
- Mahdollisuus myydä vedyn tuotannossa sivutuotteina syntyvää ylijäämälämpöä ja happea voi jossain määrin alentaa vedyn tuotantokustannusta.



- Myös P2X –tuotteiden tuotantokustannuksissa sähkön hinta on keskeinen tekijä. Viereiset kuvat esittävät pelkästään elektrolyysissä käytettävän sähkön kustannusta e-metaanin ja e-metanolin tuotannossa. Vertailu tuotteiden markkinahintoihin osoittaa, että e-metaanin ja e-metanolin laajamittainen kilpailukykyinen tuotanto voi ilman merkittäviä poliittisia kannustimia perustua ainoastaan hyvin edulliseen sähkön hintaan. Esimerkiksi metaanin (biokaasu) vähittäismyyntihinta tankkausasemilla on alle 2 €/kg, joten jo 70 €/MWh sähkön hinnalla pelkkä metaanituotannossa tarvittavan vetytuotannon sähkönkulutus maksaa yhtä paljon kuin metaanista saatava hinta. Metanolin markkinahinta on viime kuukausina ollut luokkaa 500 €/t. Jo 50 €/MWh sähkön hintana nostaa pelkän elektrolyysin sähkön kulutuksen kustannuksen metaanituotannossa samalle tasolle kuin metanolista saatava hinta.
- Hiilidioksidin talteenottokustannus savukaasuista on suuruusluokaltaan noin 100 € / t CO_2. Ison mittakaavan laitoksissa kustannus voi olla selvästi alempikin. Metaanituotannossa hiilidioksidin osuus metaanin tuotantokustannuksista on luokkaa 300 €/ t CH_4 eli huomattavasti pienempi kuin vedyn aiheuttama kustannus.





SWECO

Viitteet

AMMPower (julkaisuaika tuntematon). *Carbon Free Ammonia Production.* https://ammpower.com/technology/

Asahi Kasei (7.11.2022). *Asahi Kasei starts construction of alkaline water electrolysis pilot test plant for hydrogen production.* https://www.asahi-kasei.com/news/2022/e221107.html

Bazzanella, A. & Krämer, D. (2019) *Technologies for Sustainability and Climate Protection – Chemical Processes and Use of CO_2.* DECHEMA, Germany. ISBN 978-3-89746-200-7

Bioenergia (11.11.2022). *Biohiili.* https://www.bioenergia.fi/biohiili/

Biogasclean (2021). Solutions. https://biogasclean.com/solutions/

Convion (julkaisuaika tuntematon). Convion

Chauvy, R. & De Weireld, G. (2020) *CO_2 Utilization Technologies in Europe: A Short Review.* Energy Technol., 8, 2000627. https://doi.org/10.1002/ente.202000627

Danish Energy Agency. (2017). *Technology Data – Renewable fuels.* https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_renewable_fuels.pdf

Digipolis (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille Teknologiaselvitys.* Kiertotalouskeskus. https://www.digipolis.fi/kiertotalouskeskus/uudet-avaukset

Electrochaea (publication date unknwon). Technology. https://www.electrochaea.com/technology

Elogen (2023). Elogen

Enapter (2023). Enapter

Fortescue (2023). Fortescue Future Industries

FuelPositive (julkaisuaika tuntematon). *Green Ammonia System.* https://fuelpositive.com/green-ammonia-system/

Gfavam, S. Vahdati, M. Wilson, I.A.G. Styring, P. (29.3.2021). *Sustainable Ammonia Production Processes.* https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.580808/full

Grahn, M. Malmgren, E. Korberg, A. Taljegard, M. Anderson, J.E. Brynolf, S. Hansson, J. Skov, I.R. Wallington, T.J. (2022). *Review of electrofuel feasibility – cost and environmental impact* https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac7937

Green Hydrogen Systems (julkaisuaika tuntematon). *Accelerating the clobal energy transition with green hydrogen.* https://www.greenhydrogensystems.com/

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., Kolb, T. (2016). *Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review*. Renewable Energy 85, s. 1371–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066

H-tec systems (julkaisuaika tuntematon). *Hydrogen is now.* https://www.h-tec.com/en/

Hitachi Zosen INOVA. (2021). Power-to-Gas. https://www.hz-inova.com/renewable-gas/etogas

Hydrogenics / Cummins (julkaisuaika tuntematon). *Hydrogen engines.* https://www.cummins.com/engines/hydrogen

Hydrogen pro (julkaisuaika tuntematon). Hydrogen pro. https://hydrogen-pro.com/

ITM Power (2023). *World-class turn-key electrolysers from 600 kW to 100 MW.* https://itm-power.com/products

Jadhav, S. G., Vaidya, P. D., Bhanage, B. M., Joshi, J. B. (2014). Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies, Chemical Engineering Research and Design, 92 (11), s. 2557-2567. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.03.005

Kankaanpää, T. (12.5.2022). *Ammoniakin merkitys Suomen teollisuudelle.* Yara Suomi Oy. https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2022-AK-27061.pdf

Kapsom (julkaisuaika tuntematon). Green Ammonia Plant. https://www.kapsom.com/avada_portfolio/green-ammonia-plant/?gclid=EAIaIQobChMIrN7BvPPx_QIVi6kYCh0_wgouEAAYAiAAEgJsg_D_BwE

Liikenne- ja viestintäministeriö. (6.5.2021). *Hallitus päätti tieliikenteen päästöjen vähentämiskeinoista – päästöt puoleen 2030 mennessä.* https://www.lvm.fi/-/hallitus-paatti-tieliikenteen-paastojen-vahennyskeinoista-paastot-puoleen-2030-mennessa-1293954

SWECO

Viitteet

Man Energy Solutions (publication date unknown). Power-to-X: The key to decarbonization. https://www.man-es.com/energy-storage/solution/power-to-x/

Nel Hydrogen (2023). *Water electrolysers / hydrogen generators.* https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators/

New Energy and Industrial Technology Development Organization, INPEX CORPORATION, Hitach Zosen Corporation (16.10.2019). *Methane Synthesis Test Facility for Effective Utilization of CO2 Completed and Commissioning Started Full-scale Operation –Aiming to develop methanation technology, one of carbon recycling technologies–* Hitachi Zosen Corporation. Methane Synthesis Test Facility for Effective Utilization of CO2 Completed and Commissioning Started Full-scale Operation

Pérez-Fortes, M. & Tzimas, E. (16.6.2016) Techno-economic and environmental evaluation of carbon dioxide utilisation for fuel production. Synthesis of methanol and formic acid; EUR 27629 EN; doi: 10.2790/981669

Plug Power (2023). *Building the Clean Hydrogen Economy with Hydrogen Fuel.* https://www.plugpower.com/hydrogen/

Pohjois-Pohjanmaan liitto (11.4.2023). *Uusiutuvan energiatuotannon ja siihen kytkeytyvän vihreän vetytalouden mahdollisuudet ja maankäytön reunaehdot Pohjois-Pohjanmaalla.* https://www.pohjois-pohjanmaa.fi/wp-content/uploads/2023/04/EMMI_TP1_Uusiutuva-energiantuotanto-ja-vetytalous_loppuraportti_11042023.pdf

Qpower. (2023). Technology. https://qpower.fi/fi/teknologia/

Raahen kaupunki (2022). *Selvitystyö vedyn tuotantolaitoksen sijoittumisesta Raahen kaupungin alueelle.* Saatavilla: toimittanut Raahen kaupunki 10.2.2023

Salahudeen, N., Rasheed, A.A., Babalola, A., Moses, A. U. (2022). Review on technologies for conversion of natural gas to methanol, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 108, 104845. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104845

Sharma, R. Poelman, H. Marin, G. Galvita, V. (2020). Chemical Looping for Catalyst. *Approaches for Selectivity Oxidation of Methane to Methanol.* MPDI. https://doi.org/10.3390/catal10020194

Shi, J. Zhu, Y. Feng, Y. Yang, J. Xia, C. (2023). *A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in marine Engines.* Research Gate . https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/584

Siemens Energy (2023). *Green Hydrogen Production.* https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html

Stamicarbon (julkaisuaika tuntematon). Stami Green Ammonia. https://www.stamicarbon.com/our-business/stami-green-ammonia?gclid=EAIaIQobChMIrN7BvPPx_QIVi6kYCh0_wgouEAAYASAAEgK4nPD_BwE

ST1. (2.11.2022). Tutkimuksen kohteena Power-to-X. https://www.st1.fi/st1-stories-tutkimuksen-kohteena-power-to-x

Sunfire (2020). *Renewables everywhere.* https://www.sunfire.de/en/

Tanskanen, J. (11.1.2023). *Merillä alkaa mullistus – vihreästä ammoniakista on tulossa laivojen uusi polttoaine.* YLE. https://yle.fi/a/74-20010399

Thyssenkrupp Industrial Solutions (2020A). *Green chemicals – energy transition made easy.* https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/power-to-x/en/index-2.html

Thyssenkrupp Industrial Solutions. (2020B). Methanation for CO_2 recycling with synthetic natural gas (SNG). https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/power-to-x/en/green-sng

Thyssenkrupp Industrial Solutions. (2020C). Smart, sustainable, one-stop solution: Renewable methanol to mitigate greenhouse gases. https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/power-to-x/en/green-methanol

Tieto.Traficom (7.9.2021). *Liikenteen CO2-päästöt liikennemuodoittain sekä maakunnittain.* https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenteen-co2-paastot-liikennemuodoittain-seka-maakunnittain

Topsoe. (2023). https://www.topsoe.com/

Tukes (julkaisuaika tuntematon). *Maankäytön suunnittelu.* https://tukes.fi/teollisuus/maankayton-suunnittelu

Vaara K. (19.8.2022). *Suomessa pörssisähkö on ajoittain jopa sata kertaa kalliimpaa kuin Pohjois-Ruotsissa – syynä hinnoitteluperiaate, jota Suomi ei halua.* YLE. https://yle.fi/a/3-12580462

Woikoski (julkaisuaika tuntematon). *Happi.* https://www.woikoski.fi/hitsaus/hitsauskaasut/happi.html

Wulf, C., Linßen, J., & Zapp, P. (2018). Review of Power-to-Gas Projects in Europe. Energy Procedia, 155, 367-378. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.041

Ympäristöministeriö. (Julkaisuaika tuntematon). *Kysymyksiä ja vastauksia keskipitkän ilmastopolitiikan suunnitelmasta.* https://ym.fi/keskipitkan-aikavalin-ilmastopolitiikan-suunnitelma/kysymyksia-ja-vastauksia

SWECO

5. Sidosryhmäyhteistyö

Haastattelut

- Sidosryhmäyhteistyö tuotettiin haastatteluiden avulla. Haastatteluiden tavoitteena oli selvittää toimijoiden välistä yhteistyöhalukkuutta / halukkuutta laajentaa yhteistyötä P2X-mahdollisuuksiin sekä yleistä kiinnostusta P2X-mahdollisuuksiin, esim. CCU-kohteisiin.
- Haastatteluissa selvitettiin P2X-näkökulmasta yritysten taustaa, nykyistä ja tulevaisuuden yhteistyötä sekä julkisten toimijoiden roolia. Haastattelut toteutettiin huhtikuussa 2023 etäyhteydellä ja asiakkaalla oli mahdollisuus osallistua haastatteluihin.
- Haastateltavat tahot olivat Kraton Chemical Oy ja Nouryon Finland Oy. Molemmilla on toimintaa Pohjois-Pohjanmaalla, Oulussa, ja heillä nähtiin olevan potentiaalia P2X-liiketoimintaan nyt tai tulevaisuudessa.
    - *Kraton Chemical, Oulun tuotantolaitokset ovat mäntyöljyn tislaamo sekä hartsijalostetehdas. Pääasialliset mäntyöljytisleet ovat mäntyrasvahappo, mäntyhartsi sekä tislausjäännös mäntypiki. Rasvahappoa käytetään pääasiassa maaliteollisuuden raaka-aineena ja mäntyhartsin jalosteiden käyttöalueita ovat mm. liimat, tiemerkintämaalit ja synteettisen kumin valmistus. Pohjatuote mäntypien käyttö on pääasiallisesti vähärikkinen biopolttoaine. Kraton Chemical Oy tarjoaa tuotteitaan monipuoliselle asiakasryhmälle yli 70 maassa.*
    - *Nouryon on monikansallinen erikoiskemikaaleihin erikoistunut yritys, jolla on toimintaa yli 80:ssä maassa ja työntekijöitä n. 8000 ympäri maailman. Oulun Nuottasaaressa sijaitseva Nouryonin tehdas valmistaa valkaisukemikaaleja paperiteollisuuden käyttöön, pääasiallinen tuote kloraatti valmistetaan elektrolyysillä, jossa syntyy sivutuotteena myös vetyä.*

Johtopäätökset haastatteluista

- Haastateltavat yritykset tunnistivat, että tulevaisuudessa heillä voisi olla roolia P2X-prosesseissa joko hiilidioksidin talteenotossa, vedyn tuotannossa tai vedyn jatkojalosteiden tuotannossa/käytössä.
- Yritykset tekevät yhteistyötä. Yhteistyökumppaneilta ostetaan raaka-aineita ja kumppaneille/asiakkaille toimitetaan tuotteita heidän prosesseihinsa. Tulevaisuudessa yhteistyöhön toivottaisiin uutta tai uusia toimijoita, joiden kanssa koko P2X-prosessi voitaisiin toteuttaa. Yhteistyön tulee olla jokapäiväistä toimintaa, mutta haasteeksi tunnistettiin riippuvuus muista toimijoista.
  - ► Potentiaalisia synergioita on tunnistettu ja uudet yhteistyöt nähtiin myös mahdollisuutena.
- Tulevaisuuden mahdollisista P2X-sovelluksista, esim. CCU-kohteista, ja niiden hyödyntämisestä haastateltavat eivät kommentoineet tarkemmin, koska selvitystyötä ei ole tehty vielä riittävällä tarkkuudella. Kehitystyötä kuitenkin tehdään ja uusia mahdollisuuksia kartoitetaan. Tulevaisuudessa voi olla tarvetta tehdä hankekehitystyötä yhteistyössä ulkopuolisen toimijan kanssa ja mahdollisten uusien kumppaneiden kanssa.
- Syntyville sivutuotteille, erityisesti lämmölle, on jo käyttökohteita omalla tehtaalla ja mahdollisia uusia käyttökohteita on kartoitettu.
- Sähkökapasiteetista keskusteltaessa ei tunnistettu merkittäviä haasteita, vaikka vuosi 2022 olikin haasteellinen. Kehitysideoita löytyi muun muassa sähkön hinnoitteluun liittyen. Mitä alhaisempi on sähkön hinta sen parempi se on kuluttajalle. Kun potentiaalisia säästökohteita aletaan tehdasympäristössä miettiä ensimmäisenä pyritään vähentämään energian kulutusta.
  - ► Tulevaisuus on jossain määrin vielä avoin, mutta kehitystyölle ollaan avoimia. Sivutuotteiden, kuten lämmön, hyödyntämistä toteutetaan ja muita mahdollisuuksia on kartoitettu. Sähkökapasiteettia ei nähty varsinaisena haasteena, mutta hinta on merkittävä tekijä. Voitaisiinko tulevaisuudessa ottaa mallia Ruotsista ja Norjasta, joissa maa on jaettu hinta-alueisiin? Pohjois-Ruotsin ja Pohjois-Norjan sähkönhinta on matalampi ja tämä voi olla merkittävä kilpailutekijä.
- Julkisten toimijoiden roolista (kunnat, kaupungit ja muut julkisen sektorin toimijat) keskusteltaessa nostettiin esiin investointien tukeminen, kuten myös oppilaitosyhteistyö. Oppilaitosyhteistyön avulla saadaan muun muassa opinnäyte- ja diplomitöiden kautta kerättyä uutta tietoa teknologioista. Yhteistyön kehittämiseksi julkiset toimijat voisivat entistä enemmän avata keskusteluja yritysten suuntaan, mitä he voisivat tarjota yritykselle.
- Jotta uusia investointeja saataisiin Pohjois-Pohjanmaan alueelle tunnistettiin julkisten toimijoiden tärkeäksi rooliksi varmistaa esimerkiksi toimiva infra. Jos kysyntää on tehtaan ulkopuolella, on sitä myös yrityksen mielekkäämpää tuottaa. Potentiaalisia synergioita on tunnistettu ja uudet yhteistyöt nähtiin myös mahdollisuutena – esim. lämmöntuotanto, kaasuntuotanto ja hapen talteenotto ja hyödyntäminen.
  - ► Julkisten toimijoiden rooliksi P2X-näkökulmasta nähtiin valtiollisella tasolla sähkön hinnan kilpailukyvyn varmistaminen. Haastatteluissa nostettiin myös esille, että yritysten lähtökohtana on huolehtia omasta liiketoiminnastaan, joten tiedon ja sparrausavun tarjoaminen ovat merkittäviä toimia, mitä yrityksille voidaan tarjota. Esimerkiksi polttoainenäkökulmasta, uusien toimijoiden ja investointien houkuttelemiseksi on julkisten toimijoiden varmistettava toimiva infra ja jakeluasemille soveltuvat alueet.

Muita sidosryhmiä

- Haastatteluiden lisäksi on tarkasteltu julkisista lähteistä saatavien tietojen pohjalta SSAB Europe Oy:n Raahen tehdasta sekä Haapavedellä toimivaa NordFuel Oy:ta.
- SSAB:n Raahen tehdas tuottaa niin sanottuja standardi-, premium- ja erikoisteräksiä. Raakarautaa valmistetaan kahdessa masuunissa, joka jatkojalostetaan terässulatolla teräkseksi. Teräksestä valmistetaan teräsaihioita, jotka kuumavalssaamolla valssataan tuotteiksi. Tehdasalueella toimii lisäksi koksaamo, voimalaitos, oma satama ja laboratoriokokonaisuus. Tehdasalueella työskentelee noin 2500 SSAB:n omaa työntekijä sekä merkittävä määrä urakoitsijoita ja yhteistyökumppaneita.
- NordFuel valmistelee modernin biojalostamon rakentamista Haapavedelle, Kanteleen Voiman entisen turvevoimalaitoksen alueelle. Biojalostamolla tullaan tuottamaan kotimaisista raaka-aineista bioetanolia, biokaasua ja ligniiniä. Rakentaminen on noin 400 miljoonan euron investointi ja tulevaisuudessa se työllistää noin 250 henkilöä. Tällä hetkellä on meneillään konsepti- ja perussuunnittelu, jonka jälkeen tarkoituksena on siirtyä rakentamiseen. Käyttöönotto on suunniteltu vuodelle 2026.

NordFuel (2023). *NordFuel Oy*. NordFuel Oy

NordFuel (2023). *Biojalostamo*. NordFuel Biojalostamo

SSAB (2023). *SSAB:n Raahen tehdas*. SSAB:n Raahen tehdas

SSAB Raahen tehdas

- 2020 SSAB:n Raahen tehtaalla aloitettiin tekninen suunnittelu tuotantoprosessin muuttamiseksi fossiilivapaaksi. Fossiilista hiiltä käytetään masuuniprosessissa pelkistysaineena ja liki 90% tehtaan hiilidioksidipäästöistä aiheutuu raakaraudan tuotannosta. Tulevaisuudessa fossiilisen hiilen sijaan pelkistysaineena käytetään vetyä.
- 2016 käynnistynyt HYBRIT-hanke, jossa ovat mukana SSAB, LKAB ja Vattenfall, keskittyy masuuniprosesseista aiheutuvien päästöjen poistoon. HYBRIT-teknologian avulla SSAB haluaa tuoda markkinoille vuonna 2026 fossiilivapaan teräksen maailman ensimmäisenä teräsyhtiönä. Noin vuonna 2030 SSAB:n toiminnassa on päästy suurilta osin eroon hiilidioksidipäästöistä. Minimill-tuotanto tulee korvaamaan Raahen tehtaan masuunit valokaariuuneilla. Minimill-tuotantoon sisältyy myös valssaamo.
    - HYBRIT-hankkeessa otettiin kesällä 2022 käyttöön pilottilaitos fossiilivapaan vedyn varastointia varten. Testausjakso kestää vuoteen 2024 saakka. SSAB:lle vetykaasu ja sen varastointi ovat tärkeässä roolissa. Tulevaisuudessa on tarkoitus tuottaa vetykaasu silloin, kun sähköä on runsaasti saatavilla (esim. tuulisina ajankohtina) ja käyttää varastoitua vetyä silloin, kun sähköjärjestelmä on kuormittunut. Näin varmistetaan teräksen raaka-aineen, sieniraudan, vakaa tuotanto.
- Raahen ja Luulajan tehtaat uusitaan limittäin. Ympäristöluvan ja sähkön saannin nopeammin varmistaneella aloitetaan työt ensimmäisenä. Raahen tehtaalle tarvitaan uusi 400 kV voimajohto ja myöhemmässä vaiheessa toinen samanlainen. Voimajohtohankkeen YVA-prosessi on vireillä ja hankealue sijoittuu Raahen kaupungin lisäksi Siikajoen ja Pyhäjoen kuntien alueelle.
- On arvioitu, että Suomen hiilineutraaliustavoite vuodelle 2035 ei ole mahdollinen ilman Raahen tehtaan uudistamista. Raahen terästehdas tuottaa Suomessa eniten hiilidioksidipäästöjä.

Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus (19.1.2023). *SSAB Europe Oy:n Raahen tehtaan 400kV:n voimajohtohanke, Raahe. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu.* Raahen tehtaan 400 kV:n voimajohtohanke

SSAB (22.9.2022). *HYBRIT: Virstanpylväs saavutettu – vetyvaraston pilottilaitos toiminnassa.* HYBRIT: vetyvaraston pilottilaitos toiminnassa

SSAB (2023). *HYBRIT. Uusi vallankumouksellinen teräksenvalmistuksen teknologia.* HYBRIT

SSAB (2023). *Kohti fossiilivapaata terästuotantoa.* Kohti fossiilivapaata terästuotantoa

SSAB (2023). *SSAB:n Raahen tehdas.* SSAB Raahen terästehdas

SWECO

NordFuel Oy

- NordFuelin tarkoituksena on tuottaa etanolia puuperäisestä raaka-aineesta Haapavedellä. Suunniteltu kapasiteetti on 65 000 t/a etanolia polttoainekäyttöön.
  - Sivutuotteena muodostuu raakabiokaasua, jatkojalostettuna nesteytettyä biometaania 11 000 t/a.
- Lisäksi etanolifermentointiprosessin sivutuotteena syntyy
  - Hiilidioksidia noin 60 000–65 000 t/a;
  - Ligniinijaetta, jota voidaan käyttää energiantuotannossa tai ligniinipohjaisten kemikaalien tuotannossa;
  - Myös muita sivutuotteita syntyy vähäisiä määriä, kuten raakatärpättiä ja tislauksen sivujakeita.
- Laitoksen tarvitseman lämpöenergian tuotanto on suunniteltu toteutettavan biopolttoainekattilalla.
- Projekti on vielä suunnitteluvaiheessa, eikä lopullista investointipäätöstä ole tehty. Helmikuussa 2023 hankkeen ympäristölupa on saanut lainvoiman.
- Tulevaisuudessa on mahdollisuus integroida etanolitehdas P2X-tuotantoon. Konkreettisia suunnitelmia ei kuitenkaan ole julkisuudessa esitetty.

NordFuel (2023). *Biojalostamo*. NordFuel Biojalostamo

NordFuel (2023). *NordFuel Oy*. NordFuel Oy

NordFuel (28.02.2023). *NordFuelin biojalostamon ympäristölupa lainvoimainen*. NorFuelin biojalostamon ympäristölupa lainvoimainen

NordFuel Oy

- Etanolitehdashankkeen prosesseissa syntyy kolme merkittäviä määriä hiilidioksidia sisältävää virtaa.
  - Etanolifermentointi: hiilidioksidia syntyy lähes sama määrä kuin etanolia; noin 60 000 t/a on otettavissa talteen.
    - Varsin puhdas hiilidioksidi, joka on helposti talteen otettavissa ja nesteytettävissä; erittäin edullinen hiilidioksidin lähde
    - Biopohjainen hiilidioksidi, soveltuu P2X-prosessien lisäksi esim. elintarvikekäyttöön
    - Tuotantopotentiaaliesimerkkejä P2X-prosesseissa:
    - ➢ Metaania 21 800 t/a, vedyn tarve 10 900 t/a (elektrolyysi 73 MW)
    - ➢ Metanolia 43 600 t/a, vedyn tarve 8 200 t/a (elektrolyysi 55 MW)
    - ➢ Etanolia 31 400 t/a, vedyn tarve 8 200 t/a (elektrolyysi 55 MW) → 50% lisäys etanolin tuotantokapasiteettiin
  - Biokaasuprosessi: tuotetusta raakabiokaasusta noin 40 til.-% on hiilidioksidia ja noin 60 til.-% metaania
    - Nesteytetyn metaanin tuotantoarvio 11 000 t/a (vastaa noin 15 300 Nm^3/a CH_4)
    - ➢ Hiilidioksidia raakabiokaasussa noin 10 200 Nm^3/a, noin 20 200 t/a
    - ➢ Hiilidioksidi prosessoitavissa metaaniksi, potentiaali noin 7 340 t/a, vedyn tarve 3 670 t/a (elektrolyysi 25 MW)
  - Biopolttoainekattila: ympäristöluvan mukainen höyryn kulutus 360 GWh/a (noin 45 MW, jos 8000 h/a)
    - Jos biomassan (kuiva-aine) energiasisältö 5 kWh/kg ja biomassan kuiva-aineesta 50% on hiiltä, 90% hyötysuhteella vuotuinen hiilidioksidimäärä savukaasussa on luokkaa 147 000 t. 90% talteenottoasteella määrä olisi noin 132 000 t/a
    - Tuotantopotentiaaliesimerkkejä P2X-prosesseissa:
    - ➢ Metaania 48 000 t/a, vedyn tarve 24 000 t/a (elektrolyysi 160 MW)
    - ➢ Metanolia 96 000 t/a, vedyn tarve 18 000 t/a (elektrolyysi 120 MW)

Viitteet

NordFuel (2023). *Biojalostamo*. https://nordfuel.fi/biojalostamo/

NordFuel (2023). *NordFuel Oy*. https://nordfuel.fi/nordfuel-oy/

NordFuel (28.02.2023). *NordFuelin biojalostamon ympäristölupa lainvoimainen.* https://nordfuel.fi/nordfuelin-biojalostamon-ymparistolupa-lainvoimainen/

Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus (19.1.2023). SSAB Europe Oy:n Raahen tehtaan 400kV:n voimajohtohanke, Raahe. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. https://www.ymparisto.fi/fi/osallistu-ja-vaikuta/ymparistovaikutusten-arviointi/ssab-europe-oyn-raahen-tehtaan-400-kvn-voimajohtohanke-raahe

SSAB (22.9.2022). *HYBRIT: Virstanpylväs saavutettu – vetyvaraston pilottilaitos toiminnassa.* https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2022/09/hybrit-virstanpylvs-saavutettu--vetyvaraston-pilottilaitos-toiminnassa

SSAB (2023). HYBRIT. Uusi vallankumouksellinen teräksenvalmistuksen teknologia. https://www.ssab.com/fi-fi/fossiilivapaa/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology

SSAB (2023). Kohti fossiilivapaata terästuotantoa. https://www.ssab.com/fi-fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/tuotantopaikkakunnat-suomessa/raahe/kohti-fossiilivapaata-terastuotantoa

SSAB (2023). SSAB:n Raahen tehdas. https://www.ssab.com/fi-fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/tuotantopaikkakunnat-suomessa/raahe/kohti-fossiilivapaata-terastuotantoa

SWECO

6. Johtopäätökset

Johtopäätökset

- Pohjois-Pohjanmaan alueella tuotetaan merkittävä osa Suomen uusiutuvasta energiasta tuulivoimalla. Alueelle suunnitellaan myös uusia tuulivoimaloita, niin maalle kuin merelle. Lisäksi Pohjois-Pohjanmaan rannikkoa koskevat vetyputkisuunnitelmat ovat puhtaan vedyn ja siitä johdettujen synteettisten polttoaineiden kannalta merkittäviä.
- Alkuvaiheessa synteettisten polttoaineiden tuotanto ja käyttö tulee sijoittumaan sinne missä on hiilidioksidia saatavilla sekä logistisiin solmukohtiin.
    - Esimerkiksi synteettinen metaani voi korvata suoraan maakaasun käyttökohteita, joten erityisiä muutoksia maakaasun hyödyntämiskohteisiin ei ole tarpeen tehdä.
    - Teollisuudessa ja raskaassa liikenteessä on jo julkistettujen investointienkin puolesta nähtävillä merkittävä hyödyntämispotentiaali. Pohjois-Pohjanmaan alueella on paljon teollisuusyrityksiä ja tärkeitä logistisia pisteitä, kuten Oulu ja Raahe, joista molemmista löytyy myös satamat. Myös merkittävät tuulivoiman lisäyssuunnitelmat ovat kilpailuvaltti.
    - Yleisesti on tunnustettu, että nykyisten liikenteen polttoaineiden rinnalle ja korvaajiksi tarvitaan uusia polttoaineita, kuten synteettisiä polttoaineita ja vetyä. Laivateollisuudessa potentiaalia nähdään metanolin ja ammoniakin lisäksi puhtaassa vedyssä.
    - Ammoniakin tuotantoa ei tällä hetkellä ole Suomessa. Kokkolaan suunnitellaan Suomen suurinta vedyntuotantolaitosta, jonka päätuotteena vedyn lisäksi tulee olemaan vihreä ammoniakki. Flexens ja KIP Infra Oy ovat allekirjoittaneet aiesopimuksen maanvuokrasta. Tämän kaltaisia investointeja on odotettavissa lisää, sillä ammoniakilla on merkittävä rooli maataloudessa.
- Myös kemianteollisuuden P2X-jatkojalosteiden, mm. erilaisten bulk-kemikaalien ja sitä kautta muovien tuotannossa, ollaan menossa kohti päästötöntä tuotantoa, joka avaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia.
        - Bulk-kemikaaleja ovat esim. formaldehydi, etikkahappo, butanoli, isopropanoli
        - Maakaasun korvaaminen kemikaalien tuotannossa
- Alueen yrityksillä on hiilineutraaliustavoitteita ja merkittäviä vetyyn liittyviä hankkeita, kuten SSAB:n fossiilivapaan teräksen tuotanto. Investointeja tehdään pitkälti tarpeen mukaan. Yritysten omien investointien lisäksi Pohjois-Pohjanmaan kunnilla ja kaupungeilla on tärkeä rooli siinä, kuinka hyvin he saavat houkuteltua alueelle uusia teollisuus ja energiantuotannon investointeja.
- Merkittävät tuulivoiman kapasiteetin kasvatussuunnitelmat ovat kilpailuvaltti alueelle.
- Vaikka Suomessa ei olekaan kuin yksi sähkön hinta-alue, on järkevää pyrkiä sijoittamaan laitoksia lähelle sähköntuotantoa. Toisaalta aika ajoin keskusteluissa on myös Suomen jakaminen sähkön hinta-alueisiin, kuten esimerkiksi Ruotsissa on tehty. Tämä johtaisi siihen, että sähkön hinta olisi niillä alueilla edullisempaa kuin alueilla, jossa sähköä ei tuoteta.
- Hinta-aluekeskustelulla lisätään toisaalta tietoisuutta siitä missä energiaa tuotetaan. Tämä voi edistää teollisuuden sijoittumista lähelle puhtaita energialähteitä ja/tai lisätä sähkön avulla jalostetun energian, esim. vedyn, vientiä.
- Paikalliset toimijat voisivat edistää kemian teollisuuden mahdollisuuksia osallistumalla entistä enemmän vetyalan tapahtumiin, verkostoitumaan eri toimijoihin ja tarkastelemaan omia tuotantoketjujaan – voisiko esimerkiksi raaka-ainekemikaaleja korvata P2X-reittejä hyödyntämällä tai lisätä tuotevalikoimaansa uusia P2X-jatkojalosteita.

Transforming society together

SWECO