

Vedyn käyttökohteet ruokaketjussa ja vetylogistiikka

Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa –
selvityshanke (VEP)

Osaraportti, T1.1b

30.10.2023



Euroopan unionin
osarahoittama



ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO
Regional Council of South Ostrobothnia



Tämä raportti on laadittu osana Vetytalouden mahdollisuudet ruokaketjussa -selvityshanketta (VEP). Hanketta ovat rahoittaneet Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), Etelä-Pohjanmaan liitto, Etelä-Pohjanmaan korkeakoulusäätiö, Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Vaasan yliopisto ja Tampereen yliopistosäätiö.

Raportin laati

Kirsi Spoof-Tuomi  <https://orcid.org/0000-0002-6212-9630>
kirsi.spoof-tuomi@uwasa.fi



Sisältö

1 Johdanto	4
2 Vihreä vety lannoitetuotannossa	5
3 Vihreä vety elintarviketeollisuuden prosesseissa	7
3.1 Vety sähkön ja lämmön tuotannossa	7
3.2 Vedystä synteettisiä polttoaineita	8
3.3 Vedyn käyttö elintarvikkeiden valmistuksessa	9
4 Vihreä vety ruokaketjun logistiikassa	11
4.1 Vety kuljetuskaluston ja työkoneiden polttoaineena	11
4.2 Vedyn hyödyntäminen pakkausmuovien valmistuksessa	12
5 Vedyn varastointi ja siirto	14
5.1 Vedyn varastointi paineistettuna	14
5.2 Vedyn varastointi nesteytettynä	16
5.3 Kryopaineistettu vedyn varastointi.....	17
5.4 Materiaaleihin perustuvat varastointiratkaisut.....	17
5.4.1 Vedyn varastointi kiinteisiin materiaaleihin	17
5.4.2 Vedyn varastointi nestemäisiin vedynkantajiin	18
5.5 Varastoinnin tilantarpeet	20
5.6 Vedyn siirtomenetelmät.....	20
6 Lopuksi	23
Lähteet	25

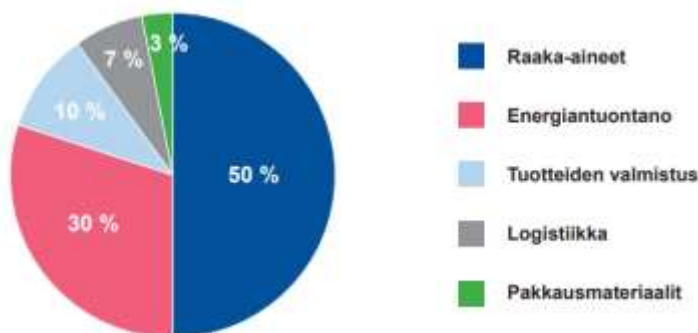
1 Johdanto

Vety on noussut keskeiseksi osaksi tulevaisuuden energia- ja ilmastokeskusteluja. Kestävästi tuotetulla vedyllä nähdään olevan tärkeä rooli hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä niin yhteiskuntien energiajärjestelmissä, teollisuudessa kuin vaikeasti sähköistettävässä liikenteessä. Ilmastotavoitteiden lisäksi tärkeitä ajureita kestävästi tuotetulle kotimaiselle vedylle ovat energiaomavaraisuuden, huoltovarmuuden ja energiajärjestelmän resilienssin kasvattaminen.

Vety on monipuolinen alkuaine ja sitä voidaan hyödyntää sellaisenaan tai monien erilaisten johdannustuotteiden valmistuksessa. Vety voidaan käyttää suoraan energiaksi polttamalla, jolloin ainoa siitä aiheutuva päästö on vesihöyry. Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan myös teollisuuden raaka-aineena esimerkiksi teräksen pelkistyksessä hiilen korvaajana. Merkittäviä vedyn käyttökohteita suomalaisessa teollisuudessa tänä päivänä ovat öljynjalostus ja biopolttoaineiden tuotanto (Laurikko ja muut, 2020). Yhdistettynä muihin raaka-aineisiin, esimerkiksi hiilen tai typhen lähteisiin, vedystä voidaan valmistaa erilaisia synteettisiä polttoaineita ja kemikaaleja. Yleisesti esitettyjä vetyä hyödyntäviä synteettisiä tuotteita ovat esimerkiksi metaani, metanoli ja ammoniakki (Sivill ja muut, 2022). Ammoniakkia käytetään laajasti lannoitteiden valmistukseen ja metanoli puolestaan on tärkeä lähtöaine kemianteollisuudessa. Elintarviketeollisuudessa vetyä käytetään tyydyttymättömien kasvirasvojen kovettamiseen ja jopa proteiinien valmistukseen.

Elintarvikeala on Suomen neljänneksi suurin teollisuuden ala, jonka tuotannon arvosta Etelä-Pohjanmaan osuus on lähes viidennes. Maakunnasta löytyy vahva elintarvikealan yrityskanta, tutkimus- ja kehittämisorganisaatioita ja tahto kehittää toimialaa (Junkkari, 2021). Ilmastonmuutoksen tullessa yhä nopeammaksi, voimakkaammaksi ja uhkaavammaksi, myös elintarvikealalla tarvitaan entistä ilmastoystävällisempiä tuotteita ja tuotantoteknologioita.

Elintarviketeollisuusliiton (ETL, 2020) mukaan elintarvikkeiden elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä suurin osa aiheutuu alkutuotannosta (50 %) ja energiantuotannosta (30 %). Lisäksi ilmastopäästöjä muodostuu tuotteiden valmistuksesta, logistiikasta ja pakkausmateriaaleista (kuva 1).



Kuva 1. Elintarvikkeen elinkaaren aikaiset hiilijalanjälkivaikutukset (ETL, 2020)

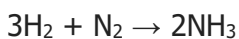
Vihreällä vedyllä voi olla merkittävä rooli kestävämmän elintarvikearvoketjun tavoittelussa. Tässä tutkimuksessa kartoitetaan kestävästi tuotetun vihreän vedyn hyödyntämismahdollisuuksia ruokaketjussa, alkaen alkutuotannosta teolliseen jalostukseen ja kuljetustoimintoihin. Esimerkiksi lannoiteteollisuus voi tulevaisuudessa olla suuri puhtaan vedyn hyödyntäjä. Tätä käsitellään raportin luvussa 2. Luku 3 keskittyy vedyn käyttöön elintarviketeollisuuden prosesseissa ja luvussa 4 kartoitetaan vedyn hyödyntämismahdollisuuksia ruokaketjun logistiikassa. Lopuksi kartoitetaan vielä vedyn varastointiin ja siirtoon liittyviä ratkaisuja.

2 Vihreä vety lannoitetuotannossa

Kaikki kasvit tarvitsevat ravinteita kasvaakseen. Lannoitteet antavat kasveille kasvuvoimaa ja lisäävät satomääriä. Lannoitteet sisältävät yleensä ennen kaikkea typpeä, fosforia ja kaliumia. Määrällisesti eniten kasvit tarvitsevat typpeä. Typpilannoituksella on siksi tärkeä rooli ruoantuotannossa.

Alkutuotannossa vihreän vedyn ilmeisin käyttökohde onkin typpilannoitteiden valmistus. Jopa puolet kaikesta maailmassa tuotetusta vedystä kulutetaan nykyään typpilannoitteiden päärakennusaineen, ammoniakkin, tuotantoon. Lannoiteteollisuuden lisäksi ammoniakkin ja ammoniakista valmistettujen tuotteiden käyttökohteiden kirjo ulottuu mm. kaivosteollisuuteen, metallien jalostukseen ja veden puhdistukseen (Kankaanpää, 2022). Lisäksi ammoniakkia voidaan käyttää teollisten ureatuotteiden valmistuksessa (Ylinen, 2023), pesu- ja puhdistusaineissa sekä jäähdytyslaitteissa (Sweco, 2023). Ammoniakki on myös vaihtoehto kantaja-aineeksi, jos vetyä halutaan kuljettaa tai varastoida.

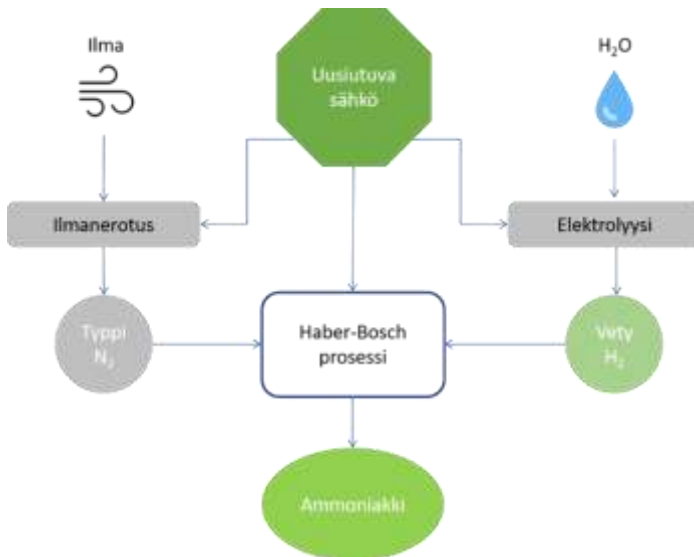
Tärkeimpien teollisten typpilannoitteiden valmistus alkaa muuntamalla typpeä ammoniakiksi. Ammoniakki on yksinkertainen typen ja vedyn yhdiste, NH_3 , jossa on yksi osa typpeä ja kolme osaa vetyä (kaava 1). Ammoniakki valmistetaan näistä kaasuista samassa annostelusuhteessa, kolme osaa puhdasta vetyä ja yksi osa puhdasta typpeä.



(kaava 1)

Kaavan 1 mukaisesti yhden ammoniakkitonnin tuottamiseksi tarvitaan 177 kg vetyä ja 823 kg typpeä. Vety ja ilmasta tislattu typpi yhdistetään ammoniakiksi Haber-Bosch reaktorissa korkeassa lämpötilassa ja paineessa (400–450 °C, 15–25 MPa) (Smith ja muut, 2020). Katalyyttinä toimii tyypillisesti rauta tai raudan oksidit, esimerkiksi magnetiitti. Ammoniakkia voidaan käyttää sellaisenaan tai siitä voidaan valmistaa edelleen esim. ammoniumnitraattia, ureaa tai rikkihapon kanssa ammoniumsulfaattia. Läntisessä Euroopassa yleisimmät typpilannoituksen lähteet ovat ammoniumnitraatti ja ammoniumnitraatin sekoitukset muiden lannoitteiden kanssa. Ammoniumnitraatti soveltuu erinomaisesti typpilannoitteeksi, koska sillä korkea typpipitoisuus, 33–35 %, josta 17,5 % ammoniumtyppeä ja 17,5 % nitraattityppeä (Ervasti ja muut, 2018).

Perinteisesti ammoniakkin tuotannossa tarvittava vety tuotetaan maakaasun höyryreformoinnilla. Fossiilisen maakaasun käyttö ammoniakkin tuotannossa aiheuttaa jopa 2,6 tonnin kasvihuonekaasupäästöt tuotettua ammoniakkitonnia kohti (Liu ja muut, 2020), mikä tekee siitä yhden eniten päästöjä aiheuttavista kemiallisista tuotantoprosesseista. Maakaasua käytettäessä vedyn tuotannon hiilidioksidipäästöt muodostavat yli puolet ammoniakkin tuotantoprosessin hiilidioksidipäästöistä (Ryske ja Åhlström, 2022). Ammoniakkia voidaan kuitenkin tuottaa myös huomattavasti ekologisemmin korvaamalla maakaasun vety vihreällä vedyllä. Jos elektrolyysin lisäksi ilmanerotuksen ja Haber-Bosch prosessin energiantarpeet tuotetaan uusiutuvalla sähköllä, voidaan ammoniakkia tuottaa hiilidioksidivapaasti (kuva 2).



Kuva 2. Hiilidioksidipäästötön ammoniakkin tuotanto.

Suomessa ei ole omaa ammoniakkituotantoa, joten maamme typpilannoiteteollisuus on täysin riippuvainen ammoniakkin tuonnista. Tämä on suuri haaste maatalouden huoltovarmuudelle. Tuontiriippuvuuden riskit konkretisoituivat Venäjän aloitettua hyökkäyssodan Ukrainaan. Lannoiteraaka-aineiden osalta Venäjän tuonti oli normaaliaikana logistiikkaedun vuoksi edullinen toimintatapa ja noin 80 % lannoiteteollisuuden käyttämästä ammoniakista oli aiemmin peräisin Venäjältä (Niskanen, 2022). Hyökkäyssodan alkamisen jälkeen venäläisen ammoniakkin tuonti on vähentynyt puoleen (Yara, 2023) ja korvaava tuonti on pitänyt järjestää globaaleilta markkinoilta, mikä on näkynyt korkeina hintoina. Myös ammoniakkin saatavuuteen liittyvät riskit kasvavat sodan jatkuessa.

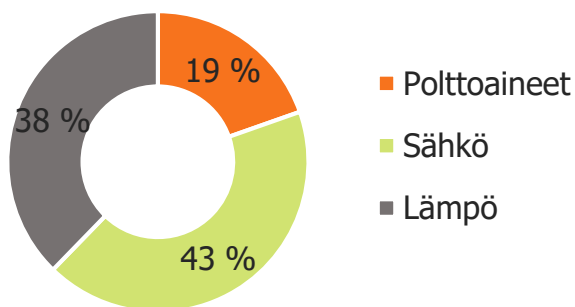
Ruokajärjestelmä on riippuvainen ennustettavasta ja tasaisesta lannoiteteuotannosta. Kotimaisen ammoniakkin tuotanto parantaisi lannoitehuoltovarmuuttamme ja ruokatuotantomme luotettavuutta merkittävästi. Valmistamalla uusiutuvalla sähköllä tuotettua vihreää ammoniakkiä meidän olisi mahdollista, paitsi saavuttaa omavaraisuus typpilannoitteiden suhteen, myös vähentää lannoiteteollisuuden aiheuttamia ilmastopäästöjä.

Kotimainen ammoniakkin valmistus saattaa käynnistyä lähivuosina. Suomalainen projektikehitysyritys Flexens suunnittelee Kokkolaan noin 350 megawatin kokoista vedyntuotantolaitosta. Laitoksen päätuotteeksi on suunniteltu vihreää ammoniakkiä. Kaksiosainen laitos tuottaa vihreää vetyä elektrolyysillä hyödyntäen uusiutuvaa sähköä. Tämän jälkeen vety jatkojalostetaan typen avulla vihreäksi ammoniakiksi. Laitoksen on tarkoitus olla tuotantokäytössä vuoden 2027 lopulla (Flexens, 2023). Toukokuussa 2023 yhdysvaltalainen Plug Power julkaisi suunnittelevansa Suomeen kolmea vihreän vedyn tuotantolaitosta, joista Kokkolan tehtaassa myös jalostettaisiin vedystä ammoniakkiä. Gigaluokan tuotantolaitoksen odotetaan tuottavan 85 tonnia nestemäistä vihreää vetyä ja jopa 700 000 tonnia vihreää ammoniakkiä päivässä. Plug Power tekee lopullisen investointipäätöksen vuosien 2025–2026 aikana (Sipilä, 2023). Ammoniakkin tuotantoa kaavailee myös Naantaliin 280 megawatin vihreän vedyn tuotantolaitosta suunnitteleva Green North Energy. Tuotannon on suunniteltu käynnistyvän vuonna 2026 (Green North Energy, 2023).

3 Vihreä vety elintarviketeollisuuden prosesseissa

Elintarviketeollisuus on Suomen suurin kulutustavaroita valmistava teollisuudenala. Ruokaa ja juomaa valmistetaan maassamme yli 1700 yrityksen voimin. Vaikka elintarviketeollisuus kuluttaa maamme teollisuudenaloista neljänneksi eniten energiaa, on sen energiankulutus kuitenkin melko maltillinen, noin 3 % Suomen teollisuuden energiankäytöstä. Maltillisista ilmastovaikutuksista huolimatta ala on sitoutunut kunnianhimoisiin toimenpiteisiin. Tavoitteena on, että vuonna 2035 elintarviketeollisuus tuottaa liikevaihtoon suhteutettuna 75 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä nykytasoon verrattuna. (ETL, 2020)

Tilastokeskuksen (2022) datan mukaan suurin energiamuoto elintarviketeollisuudessa on sähkö (kuva 3). Eniten sähköenergiaa kuluu jäähdytykseen ja pakastamiseen. Sähköenergiaa käytetään myös tuotteiden valmistamisessa ja esimerkiksi toimitilojen ilmanvaihdossa. Lähes yhtä suuri osa käytettävästä energiasta menee lämmitystä vaativiin osaprosesseihin. Lämpöä tarvitaan esimerkiksi kypsytysprosesseissa, pastöroinnissa, pesuvesien lämmityksessä, kuivaamisprosesseissa ja haihduttamisessa. Korkeimmat lämpötilavaateet ovat tyypillisesti erilaisissa uuneissa, esimerkiksi leipomouuneissa lämpötila voi olla 250 °C. Lihan jalostuksessa ja eineisten valmistuksessa lämpötilavaatimukset ovat tyypillisesti 100–200 °C välillä. (Motiva, 2021) Lämpöä hyödynnetään myös höyrynä. Höyryä käytetään paitsi kypsennykseen myös mm. keittokattiloiden lämmitykseen, lämpökäsittelyyn ja sterilointiin.



Kuva 3. Elintarviketeollisuuden energiankäytön kulutusjakauma vuonna 2021

Valtaosa elintarviketeollisuuden yrityksistä on pieniä tai keskisuuria yrityksiä. Suurten yritysten käyttämä energia käsittää kuitenkin valtaosan koko alan käyttämästä energiasta, joten niiden toimilla on suuri merkitys vähähiilisemmän tulevaisuuden toteutumisessa (ETL, 2020). Tärkein toimi vähähiilisyteen pääsemiseksi on energiatuotannon muuttaminen fossiilisista uusiutuviin. Vaihtoehtoisin polttoaineisiin ja päästöttömään energiaan siirtymisessä vety voi olla yksi osaratkaisu.

3.1 Vety sähkön ja lämmön tuotannossa

Vetyä voidaan ottaa käyttöön melkein missä tahansa energiantuotannon sovelluksessa, jossa nykyään hyödynnetään fossiilisia polttoaineita, kuten polttokattiloissa ja kaasuturbiineissa. Esimerkiksi saksalainen Bosch tarjoaa 100-prosenttisen vedyn käyttöön soveltuvia teollisuuskattiloita kuumaa vettä ja höyryn tuotantoon eri tehoalueilla (Bosch, 2023). Myös Viessmannin höyry- ja kuumavesikattilat ovat valmiita vetykäyttöön (Viessmann, 2023). Hydrogen Technologiesin innovatiivinen cleanH2steam DCC™ (Dynamic Combustion Chamber) kauppa- ja teollisuuskokoluokkaan skaalautuva kattila on myös suunniteltu polttamaan puhdasta vetyä. DCC™-prosessi tuottaa joko kuumaa

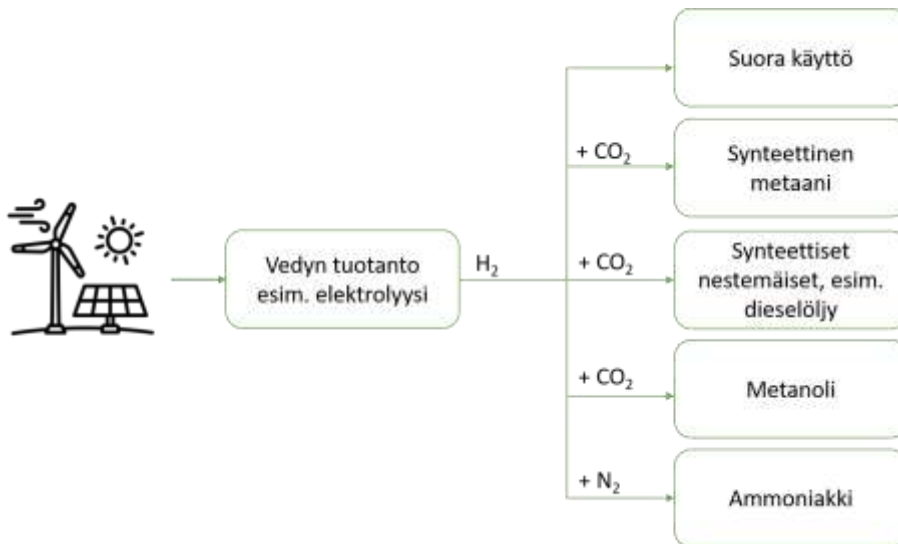
vettä tai höyryä. Prosessihöyryntuotannon lisäksi DCC™ voidaan yhdistää turbiinigeneraattoriin sähkön tuottamiseksi (Hydrogen Technologies, 2023). Suomalainen Aurelia Turbines kehittää, valmistaa ja kaupallistaa pienen kokoluokan (400 kW) turbiineita erityisesti pienten ja keskisuurten teollisuusprosessien tarpeisiin. Aurelian kaasuturbiinit voivat käyttää polttoaineena myös vetyä, mikä on kansainvälisesti ainutlaatuista. Aurelian turbiinit sopivat esimerkiksi kaupallisille ja teollisille loppukäyttäjille, jotka tarvitsevat prosessissaan sekä sähköä että lämpöä, samoin kuin niille, jotka tarvitsevat höyryä ja/tai jäähdytystä (Aurelia, 2023).

Vetyä voidaan muuntaa sähköksi ja lämmöksi myös polttokennojen avulla. Kennossa ei tapahdu varsinaista palamista vaan hapetus- ja pelkistysreaktioita, joiden reaktiotuotteina syntyy sähköä, lämpöä ja vettä. Polttokennoteknologian etuna on korkea sähköntuotannon hyötysuhde. Ehkä suurimman huomion vetypolttokennojen mahdollisista käyttösovelluksista on saanut niiden hyödyntäminen ajoneuvoissa, mutta ne soveltuvat myös kiinteisiin sovelluksiin. Esimerkiksi vuonna 2021 maailmassa asennettiin noin 350 MW uutta kiinteää polttokennokapasiteettia (FCHO, 2023). Kiinteitä polttokennoja käytetään pääasiassa primääri- ja varavirtalähteenä datakeskusten, kriittisen infrastruktuurin ja energiahuollon sekä prosessiteollisuuden tarpeisiin (FCHEA, 2023). Päivittäisten toimintojen saumaton ylläpitäminen myös elintarviketeollisuuden jalostus-, tuotanto- tai pakkaus-/pulloslaitoksessa vaatii luotettavan voimanlähteen. Tämän vuoksi esimerkiksi Yhdysvalloissa useat elintarviketeollisuuden yritykset ovat siirtymässä polttokennoihin turvatakseen sähkön ja/tai lämmön/jäähdytyksen keskeytyksettömän saannin (Sturm, 2017).

3.2 Vedystä synteettisiä polttoaineita

Fossiilisten polttoprosessien päästöjen leikkaus on tulevaisuudessa mahdollista myös Power-to-x reittien kautta. Tällöin vetyä tuotetaan uusiutuvalla sähköllä ja jalostetaan edelleen synteettiseksi polttoaineeksi yhdistämällä vety hiilen lähteen, tai ammoniakkin kohdalla typen, kanssa. Näiden polttoaineiden tärkeä etu on, että monissa tapauksissa niitä voidaan käyttää suoraan fossiilisia polttoaineita korvaavina ns. drop-in-polttoaineina: niitä voidaan varastoida, jakaa ja kuluttaa olemassa olevan infrastruktuurin kanssa, jolloin uusia investointeja näihin ei tarvita.

Power-to-x reitit on kuvattu kuvassa 4. Synteettistä metaania voidaan valmistaa kahdella tavalla, kemiallisella tai biologisella metanoinnilla. Kemiallinen menetelmä hyödyntää ns. Sabatier-reaktiota, jossa hiilidioksidi ja vety muuntuvat korkean lämpötilan ja katalyytin vaikutuksesta metaaniksi ja vedeksi. Biologisessa metanoinnissa biokatalyytteinä toimii mikrobit, jotka muuntavat vedyn ja hiilidioksidin metaaniksi. (Koj ja muut, 2019) Nestemäisiä synteettisiä polttoaineita valmistetaan pääasiassa kahdella tavalla, Fischer–Tropsch-synteesisillä ja metanolisynteesisillä. Fischer–Tropsch-menetelmä on katalyyttinen kemiallinen reaktio, jossa hiilimonoksidia ja vetyä muunnetaan erilaisiksi nestemäisiksi hiilivedyiksi. Jos hiilen lähteenä käytetään hiilidioksidia, täytyy se muuttua ensin hiilimonoksidiksi. Menetelmän ensisijainen tarkoitus on tuottaa synteettistä öljyn korviketta käytettäväksi voiteluaineena tai synteettisenä polttoaineena. Metanolisynteesisissä vety ja hiilidioksidi tai hiilimonoksidi muunnetaan metanoliksi. Metanolia voidaan käyttää tietyissä sovelluksissa, esim. merenkulun polttoaineena, sellaisenaan tai se voidaan jatkojalostaa kemikaaleiksi tai muiksi nestemäisiksi polttoaineiksi, kuten kerosiiniksi tai dieselpolttoaineen korvikkeeksi dimetyylieetteriksi (DME) (Koj ja muut, 2019). Metanolia voidaan käyttää myös lämmön ja höyryn tuottamiseen teollisuuskattiloissa sekä sähköntuotantoon kaasuturbiineissa (IRENA, 2021). Vedyn jatkojalostamista ammoniakiksi käsiteltiin jo luvussa 2. Lannoitetuotannon lisäksi ammoniakki on vaihtoehto sekä täysin hiilivapaaksi polttoaineeksi että vedyn kantaja-aineeksi. Ammoniakki nähdään erityisesti merenkulun tulevaisuuden polttoaineena, mutta mm. Mitsubishi Power on ilmoittanut kehittävänsä ammoniakkipolttokattilaa ja ammoniakkipolttokennoita kaasuturbiinia teollisiin sovelluksiin (Atchison, 2021).



Kuva 4. Vihreä vety energian kantajana

Jotta synteettinen polttoaine voidaan luokitella täysin vihreäksi polttoaineeksi, tulee Power-to-x prosessien käyttää pelkästään uusiutuvaa energiaa. Lisäksi hiilen ja typen on myös oltava peräisin puhtaasta lähteestä, esimerkiksi biomassaa käyttävistä teollisuuden prosesseista tai ilmasta talteen otettuna (IRENA, 2020). Vaikka hiiltä sisältävät synteettiset polttoaineet tuottavat poltettaessa edelleen hiilidioksidipäästöjä, niiden tuotantoprosessi kuluttaa hiilidioksidia, mikä mahdollistaa niiden hiili-neutraaliuden.

Power-to-x-tekniologioiden haasteita ovat edelleen korkeat kustannukset ja tarve halvalle ja puhtaalle hiililähteelle (IRENA, 2020). Power-to-x teknologiatoimittajia on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Power-to-x teknologiatoimittajia (Sweco, 2023)

Metanointi	Metanolin tuotanto	Ammoniakin tuotanto
MAN Energy Solutions (katalyyttinen)	Topsoe	Thyssenkrupp
Hitachi Zosen Inova (katalyyttinen)	MAN Energy Solutions	Kapsom
Topsoe (katalyyttinen)	BSE Methanol	Stami
Thyssenkrupp (katalyyttinen)	Thyssenkrupp	Topsoe
HZI Schamck (biologinen)	Kapsom	Fuel Positive
QPower (biologinen)		AmmPower
Electroachea (biologinen)		
Biogasclean (biologinen)		

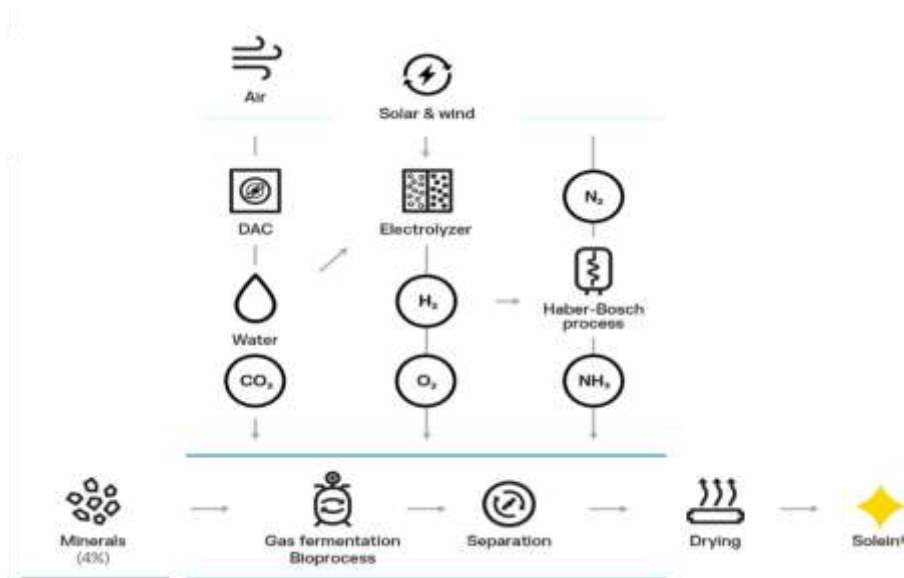
3.3 Vedyn käyttö elintarvikkeiden valmistuksessa

Perinteisimmin vetyä on käytetty elintarviketeollisuudessa margariinin valmistuksessa kasviöljyjen kovettamiseen. Margariinien ja kasvirasvavaihteiden valmistuksen keskeinen ongelma on, miten saada juoksevista kasviöljyistä kiinteitä rasiassa pysyviä ja levitettäviä tuotteita. Nykyään margariinin kovetus tapahtuu usein lisäämällä luontaisesti kovaa kasvirasvaa, kuten palmu- tai kookosrasvaa. Toinen tapa on katalyyttinen vaihtoesteröinti. Vaihtoesteröintiprosessissa kasviöljy ensin vetykäsittellään eli hydrataan kiinteäksi ja tuloksena syntynyt kiinteä rasva vaihtoesteröidään juoksevan kasvi-

öljyn kanssa. Näin syntynyt lopputuote pysyy pakkauksessa ja muistuttaa rakenteelta voipohjaisia tuotteita (Voutilainen, 2017). Elintarviketeollisuus käyttää kovetettua kasvirasvaa luontaisen kasvirasvan sijaan esimerkiksi leivonnaisissa, koska se pidentää tuotteiden säilyvyyttä ja parantaa niiden rakennetta.

Vetyä käytetään myös polyolien eli sokerialkoholien, esimerkiksi ksylitolin, sorbitolin ja maltitolin, valmistuksessa. Sokerialkoholeja käytetään makeutusaineina monissa "sokerittomissa" tuotteissa. Suomessa Fazer Finland Oy valmistaa hydrausprosessilla ksylitolia kauran kuorista ksylitolitehtaassa Lahdessa.

Mielenkiintoinen "out of the box" -ratkaisu elintarvikkeiden ja rehujen proteiinilähteeksi on uusiutuvaan vetyyn ja hiilidioksidin talteenottoon perustuva mikrobi-proteiinien tuotanto. Teknologian tutkimuskeskus VTT:n ja LUT-yliopiston tutkimuksen pohjalta syntynyt elintarviketeknologian start-up yritys Solar Foods on kehittänyt tavan tuottaa uutta luonnollista proteiininlähdettä ilmasta, sähköstä ja mikrobeista. Tuotteen nimi on Solein®. Soleinia valmistetaan bioprosessilla, jossa mikrobeja syötetään kaasuilla (hiilidioksidi, vety ja happi) ja pienillä määrillä ravinteita. Valmistusta voi verrata viinin tekemiseen, jossa hiilidioksidi ja vety korvaavat sokerin hiili- ja energialähteenä (Solar Foods, 2023). Kuva 5 havainnollistaa Soleinin tuotantoprosessia. Tässä tyyppi lisätään tuotteeseen ammoniakin vesiliuoksen avulla, mutta yhtä hyvin voitaisiin käyttää ilmasta peräisin olevaa tyyppiä.



Kuva 5. Solein-proteiinin tuotantoprosessi. Muokattu lähteestä (Pitkänen, 2022).

Solein® sisältää 65-70 % proteiinia, 5-8 % rasvaa, 10-15 % ravintokuituja ja 3-5 % kivennäisravinteita. Ravinneoostumus on hyvin samanlainen kuin kuivatun soijan tai levien. Sitä voidaan käyttää perinteisten proteiininlähteiden korvaamiseen monissa eri elintarvikkeissa, kuten maidon ja lihan korvikkeissa, välipaloissa ja juomissa, nuudeli- ja pastatuotteissa tai leivissä ja levitteissä. Tämän tyyppisellä tuotantomenetelmällä on potentiaalia muuttaa ruoantuotannon kestävyttä, saatavuutta ja läpinäkyvyyttä. (Solar Foods, 2023)

Singapore on ensimmäinen markkina, joka on myöntänyt Solein®-proteiinille viranomaishyväksynnän. Lupaprosessi on käynnissä myös EU:ssa ja Britanniassa ja alkamassa Yhdysvalloissa. Solar Foodsin ensimmäinen kaupallinen tuotantolaitos rakentuu paraikaa Vantaan Vehkalaan. Yhtiön mukaan se aloittaa kaupallisen tuotannon vuonna 2024.

4 Vihreä vety ruokaketjun logistiikassa

Uusiutuvista lähteistä tuotettu vety mahdollistaa nollapäästöisen tavaroiden ja raaka-aineiden kuljettamisen. Puhtaan vedyn käyttö kuljetusten polttoaineena on mahdollista jo lähitulevaisuudessa. Lisäksi uusiutuvalla energialla tuotetusta vedystä on mahdollista johtaa erilaisia liikennepolttoaineita (metaani, metanoli, diesel, jne.), jotka ovat päästöneutraaleja ja joita voidaan hyödyntää kuljetuksen ja logistiikan tarpeisiin sellaisenaan. Ruokaketjussa vedyllä on kuljetusten lisäksi potentiaalia esimerkiksi maatalous- ja muiden suurten työkoneiden polttoaineena.

4.1 Vety kuljetuskaluston ja työkoneiden polttoaineena

Vedyn hyödyntäminen kuljetusten polttoaineena onnistuu kahdella tavalla: polttomoottorissa tai polttokennossa. Vetypolttokennoja käyttävien ajoneuvojen käyttövoima tuotetaan sähköllä. Polttokenno muuttaa vedyn ja ilman sisältämän hapen vedeksi tuottaen sähköä sähkömoottorin voimalliseksi, ja ainoat oheistuotteet ovat vesi ja lämpö – ei saasteita tai kasvihuonekaasuja (Mårtensson, 2020). Täyssähköajoneuvojen akustoon verrattuna vetypolttokennojen etu on niiden huomattavasti suurempi energiatiheys, joten niiden avulla voidaan pidentää ajoneuvon toimintamatkaa. Nykyisten polttokennokäyttöisten kaukoliikenteen kuorma-autojen toimintasäde on jopa 1100 kilometriä, kun täyssähköisten toimintasäde jää 400–800 kilometriin (IRENA, 2020). Korkea energiasisältö massayksikköä kohden tarkoittaa myös, että vetykäyttöiset ajoneuvot voidaan kuormata raskaammin. Lisäksi vetykäyttöisten ajoneuvojen tankkaaminen on huomattavasti nopeampaa kuin akkujen lataaminen (Mårtensson, 2020). Raskaaseen kalustoon polttokennotekniikkaa tarjoavat mm. Hyundai, Iveco, Hyzon ja Dayun. Myös Scania kehittää vetypolttokennotekniikkaa yhdessä Cummins Inc:n kanssa ja ensimmäiset rekat on tarkoitus toimittaa asiakkaille vuonna 2024. Myös MAN toimittaa ensimmäiset vetypolttokennoilla varustetut rekat vuonna 2024. Näiden lisäksi Volvo on aloittanut polttokennotekniikan testaamisen raskaaseen kalustoon.

Toinen käyttökohde polttokennoteknologialle löytyy ruokaketjun kylmäkuljetuksista. Polttokennoilla voidaan tuottaa virtaa ajoneuvon lisäksi myös jäähdytysyksikölle. Vetypolttokennoteknologiaan perustuvaa jäähdytystä lämpösäädelyihin maantiekuljetuspuoliperävaunuihin on kehittänyt esimerkiksi Carrier Transicold yhteistyössä Boschin kanssa (Giles, 2023).

Vetyä voidaan käyttää myös polttomoottorin polttoaineena samaan tapaan kuin paineistettua maatai biokaasua käyttävässä CNG-moottorissa. Tällöin vety sekoitetaan ilman kanssa, puristetaan moottorin sylintereissä ja sytytystulppa sytyttää seoksen. Laajeneva palamiskaasu tuottaa mäntien avulla mekaanista energiaa. Polttomoottorikäytön etuna on, että se ei ole yhtä herkkä vedyn puhtaudelle kuin polttokennotekniikka. Lisäksi vetypolttomoottori on helpompi integroida olemassa oleviin ajoneuvoalustoihin kuin kehittää sähköajoneuvo tyhjästä. Tämä säästää kehityskustannuksia ja mahdollistaa nopeamman markkinoille pääsyn (EDAG, 2023). Vetyä polttomoottorikäytössä ovat tutkineet raskaan kaluston toimittajista ainakin Volvo, Kenworth, Hyundai, Scania ja DAF. Moottorivalmistaja Cummins kaavailee vetypolttomoottorin tuomista tuotantoon vuonna 2027. Cumminsin kehitystyö keskittyy keskiraskaaseen käyttöön, kuten jakeluautoihin sekä maatalous- ja rakennuskoneisiin, esimerkiksi pyöräkuormaajiin (EDAG, 2023). Lisäksi Cummins kehittää vetyalustaa myös raskaille kaukoliikenteen kuorma-autoille.

Vety on tulossa myös työkoneisiin. Englantilainen työkonevalmistaja JCB on jo esitellyt vetyä polttoaineena käyttävän polttomoottorin raskaisiin työkoneisiin. Vetypolttokennot puolestaan sopivat hyvin pienempien elintarvikelogistiikkatoiminnoissa, esimerkiksi varastoissa, tarvittavien siirto- ja nosto-

laitteiden voimanlähteeksi. Polttokennotrukkien etuja sähkötrukkeihin verrattuna on tasaisen tehon toimittaminen työvuoron aikana ilman suoritusviiveitä. Koska akkua ei tarvitse vaihtaa lataamista varten, käyttökatko aika lyhenee. Lisäksi akkujen varastointiin käytetty arvokas varastotila voidaan palauttaa aktiiviseen käyttöön. Yhdysvaltain energiaministeriö onkin raportoinut, että akkutruckeihin verrattuna polttokennotrukeilla on 80 % pienemmät tankkaustyökustannukset ja ne vievät 75 % vähemmän varastotilaa akkujen latausinfrastruktuuriin verrattuna (Sturm, 2017). Polttokennotrukkien käyttöönotossa Yhdysvallat on ollut edelläkävijä. Jo vuonna 2017 raportoitii maassa olevan käytössä yli 16 000 polttokennotrukkia, mukaan lukien monissa elintarvikelogistiikkatoiminnoissa.

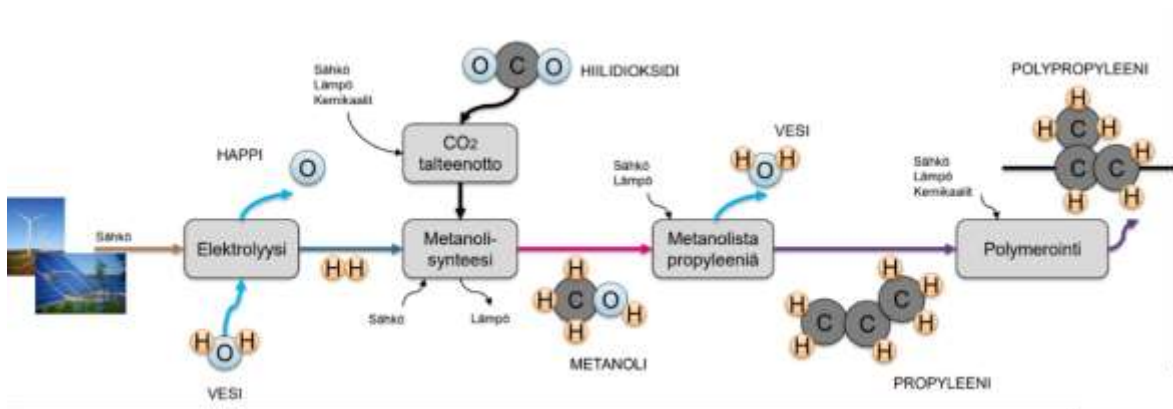
Vaikka vetykäyttöistä kuljetuskalustoa on jo saatavilla, on jakeluverkoston puute rajoittanut niiden käyttöönottoa Suomessa. Tällä hetkellä Suomessa on kaksi vetytankkausasemaa, joista toinen sijaitsee Vuosaaren satamassa Helsingissä ja toinen Voikoskella Etelä-Savossa. Suomen kansallisena tavoitteena kuitenkin on, että Suomeen rakennettaisiin vuoteen 2030 mennessä noin 20 vetyasemaa. Asemat kattaisivat kaikki suurimmat kaupungit. Vetyasemien etäisyys asemalta asemalle olisi noin 300 km ja kunkin aseman vaikutussäde 150 km. (Jääskeläinen, 2017)

Vedystä valmistettujen synteettisten polttoaineiden etuna kuljetuksissa on, että niiden hyödyntäminen onnistuu nykyisillä jakeluverkostoilla ja moottoreilla. Esimerkiksi tankkausverkostoa kaasulle on jo melko laajasti saatavilla, jolloin vihreä siirtymä uusiutuvalla sähköllä tuotetusta vedystä jalostetulla metaanilla voidaan aloittaa liikennekäytössä välittömästi, kun sitä on saatavilla.

4.2 Vedyn hyödyntäminen pakkausmuovien valmistuksessa

Elintarvikepakkausmuovit valmistetaan edelleen pääosin fossiilisesta raakaöljystä. Koska muovien poistaminen ei ole alalla realistinen vaihtoehto, on löydettävä uusia, kestäviä tapoja valmistaa muovia. Uusiutuvalla sähköllä tuotetun vedyn ja hiilidioksidin talteenoton avulla voidaan valmistaa myös muovia, jolloin puhutaan ns. Power-to-plastics teknologiasta. Power-to-plastics mahdollista muovin valmistusprosessin muuntumisen hiilidioksidin tuottajasta hiilinielukuksi.

Erlaisia teknologioita valmistaa muoveja vedystä ja hiilidioksidista on kartoitettu esimerkiksi Päijät-Hämeessä BIOSYKLI-hankkeessa. Hankkeessa tarkasteltiin propyleenin valmistusta metanolista (kuva 6). Methanol-to-propylene on kaupallistettu tekniikka, joka on laajalti käytössä ainakin Kiinassa (Muoviyhdistys, 2021). Toinen mahdollinen teknologia on methanol-to-olefins, jossa metanoli muunnetaan olefiineiksi, kuten eteeniksi ja propeeniksi. Olefiinien avulla voidaan tuottaa polyolefiineja, kuten yleisesti käytettyjä pakkausmuoveja polyeteeniä (PE) ja polypropeenaa (PP).



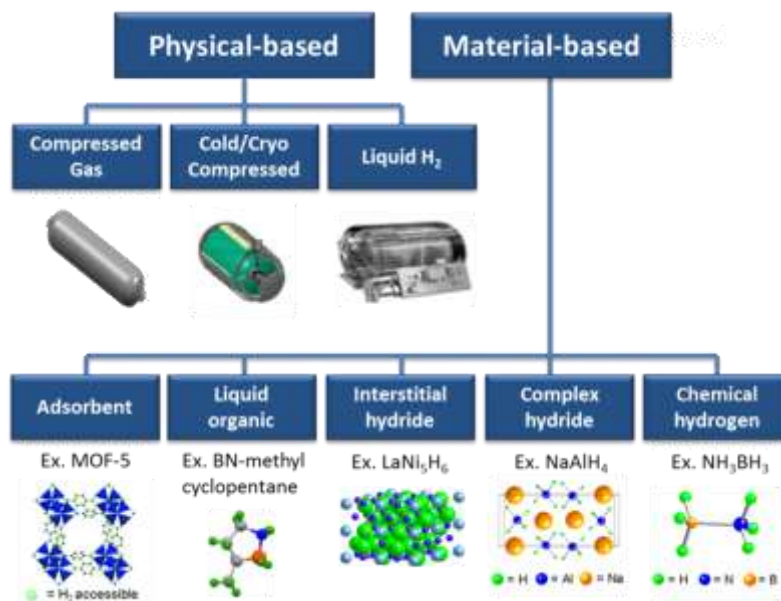
Kuva 6. Power-to-plastics prosessi (Uusitalo, 2021)

Power-to-plastics teknologia muovin tuotannossa on kuitenkin vielä suhteellisen vähän tutkittu vaihtoehto. Teknologian edistäminen ja sen roolin arvioiminen fossiilivapaassa taloudessa vaatii lisää tutkimusta ja kehitystä (Palm ja muut, 2016). Avainkysymyksiä on mm. tuotteiden hintakilpailukyky sekä niiden pitkäikäisyyden varmistaminen (Uusitalo, 2021).

5 Vedyn varastointi ja siirto

Jos vedyn tuotanto ja kulutus eivät kohtaa ajallisesti tai paikallisesti, syntyy tarpeita vedyn varastointiin ja siirtoon. Tässä haasteena on etenkin kaasumaisen vedyn pieni tiheys; normaalilämpötilassa ja -paineessa 1 kg vetyä vaatisi 11 m³ varastointitilavuuden. Pienen tiheyden vuoksi vedyn varastointi ja kuljetus vaatii erityisiä olosuhteita. Tässä luvussa käsitellään vedyn varastointiin ja siirtoon liittyviä ratkaisuja.

Vedyn energiasisältö massayksikköä kohden on korkea, lähes kolminkertainen esimerkiksi dieselöljyyn verrattuna. Vedyllä on kuitenkin normaaliolosuhteissa erittäin pieni tiheys (0.083 kg/m³ @ 1 bar, 20 °C), minkä vuoksi sen energiatiheys tilavuusyksikköä kohden on hyvin alhainen, noin 10 MJ/m³. Vedyn varastointiratkaisut perustuvat vedyn tiheyden, ja samalla sen volumetrisen energiatheyden, kasvattamiseen tilan säästämiseksi. Tiheyttä voidaan kasvattaa paineistamalla tai laskemalla lämpötilaa alle kriittisen lämpötilan, jolloin vety nesteytyy. Myös paineistetun ja jäähdetyn vedyn yhdistelmäratkaisuja on käytössä. Vety voidaan myös sitoa toiseen materiaaliin kemiallisten reaktioiden avulla varastointia varten. Kuvassa 7 nähdään yleiskuvaus vedyn varastointitekniikoista. Näiden lisäksi vetyä voidaan varastoida kemiallisesti myös esimerkiksi hiilivetyinä tai ammoniakkinä, joiden osalta voidaan hyödyntää niille ominaista ja olemassa olevaa infrastruktuuria.



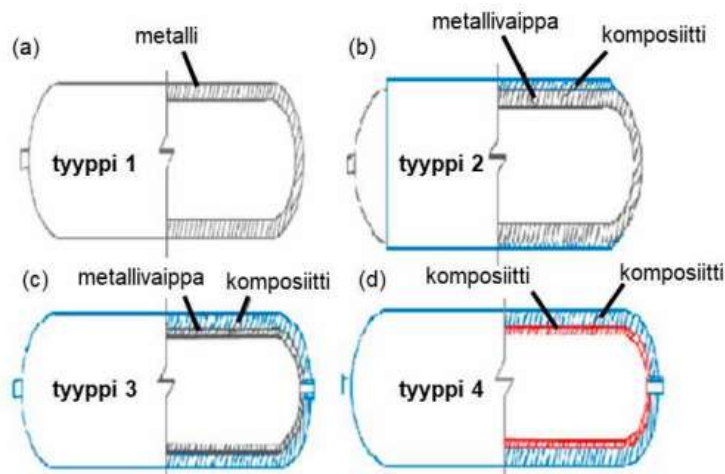
Kuva 7. Vedyn varastointitekniikat (EERE, 2023)

5.1 Vedyn varastointi paineistettuna

Kaasun paineistaminen on kehittyneitä tekniikkaa ja suhteellisen edullinen vaihtoehto (Sweco, 2023). Vedyn varastointi kaasumaisena erilaisiin painesäiliöihin onkin tällä hetkellä tavallisin vedyn varastointimenetelmä. Vedyn paineistuksessa käytetään korkeita paineita, ajoneuvojen vetytankkeissa jopa 700 baaria on käytössä. Kiinteissä vetykaasusäiliöissä käytetään pääsääntöisesti kuitenkin matalampia paineita, tavallisimmin 200–350 baaria. 350 baarin paineessa kaasumaisen vedyn tiheys on noin 24 kg/m³ ja energiatiheys tilavuutta kohden 2,9 MJ/litra (LVH), mikä on esimerkiksi polttoöljyn tai dieselöljyn vastaaviin (n. 36 MJ/l) kuitenkin edelleen hyvin matala.

Pienen volumetrisen energiatihedyyden vuoksi vedyn varastointi painekaasuna vaatii suuria tilavuuksia. Korkea paine vaatii tankilta myös kestävyttä, mikä osaltaan kasvattaa tankin massaa. Säiliön materiaali, muoto ja rakenne vaikuttavat kuitenkin siihen, missä määrin säiliön massa kasvaa. Massan kasvua voidaan rajoittaa esimerkiksi käyttämällä korkeamman lujuus-painosuhteen materiaaleja, kuten hiilikuitua (Tashie-Lewis ja Nnabuife, 2021). Vedyn varastointiin käytettäviä paineastioita on neljää tyyppiä (kuva 8):

- Tyyppi I: Täysmetalliset paineastiat. Tämä tyyppi on tavanomaisin, edullisin ja myös painavin. Vedyn laajamittaisessa varastoinnissa teollisissa sovelluksissa käytetään tyypillisesti tyyppin I säiliöitä, painetaso 150–300 baaria (yleisimmin 200 bar).
- Tyyppi II: Teräspaineastia, jossa lasikuitukomposiittipäällyys. Teräksellä ja komposiittimateriaalilla on suunnilleen sama rakennekuormitus. Tyyppin II astioiden valmistus maksaa noin 50 % enemmän kuin luokan I, mutta niiden paino on 30–40 % pienempi. Tämän tyyppisillä paineastioilla on korkein paineensietokyky.
- Tyyppi III: Komposiittinen säiliö metallisella sisäseinällä. Rakenteellista kuormaa kantaa pääasiassa komposiittirakenne ja metallivuoraus on tarkoitettu tiivistystarkoituksiin. Tämän tyyppinen paineastia on osoittautunut luotettavaksi 450 baarin käyttöpainelle. Paino on noin puolet tyyppin II painosta, mutta kustannukset kaksinkertaiset verrattuna tyyppin II säiliöihin.
- Tyyppi IV: Täysin komposiittinen. Yleensä vuorauksena käytetään polymeeriä, ja hiilikuitu- tai hiili-lasikomposiitteja käytetään rakenteellisen kuorman kantamiseen. Tämän tyyppinen paineastia on kevyin, mutta hinta on korkea. Tyyppin IV paineastiat kestävät jopa 1000 baarin painetta. (Moradi ja Groth, 2019)



Kuva 8. EN 17533 standardin mukaiset painesäiliötyypit (Kauppi, 2022)

Valinta, mihin paineastiatyyppiin vetyä tulisi varastoida, on kompromissi teknisen suorituskyvyn ja kustannuskilpailukyvyn välillä. Kiinteissä järjestelmissä, esimerkiksi vedyn tuotantolaitosten yhteydessä tai siirtoreittien päätepisteissä, voidaan käyttää edullisimpia tyyppin I ja II säiliöitä, kun taas liikuteltavissa säilytysjärjestelmissä kuten vedyn kuljetuskalustossa ja vetyä polttoaineena käyttävien ajoneuvojen polttoainesäiliöissä käytetään kevyitä tyyppin III ja IV säiliöitä.

Sen lisäksi, että tankkien tulee olla kevyitä, edullisia ja helppoja työstää, niiden tulee myös kestää kosketusta vedyn kanssa. Vedyn tiedetään haurastuttavan materiaaleja, jopa metalia, joihin se on

suorassa kosketuksessa (Tashie-Lewis ja Nnabuife, 2021). Vetyaurastuminen on tyypillistä teräkselle ja nikkelseoksille (Sweco, 2023).

5.2 Vedyn varastointi nesteytettynä

Vedyn varastoiminen paineistettuna sopii hyvin kohteisiin, joissa säiliön massa ja sen vaatima tilavuus eivät ole kriittisiä. Jos sitten tila- tai painovaatimukset rajoittavat varastointia, tarjoaa vedyn varastointi nestemäisenä paineistusta tehokkaamman varastointiratkaisun. Nestevedyn säiliöt ovat tyypillisesti kevyempiä kuin painevetysäiliöt pääasiassa siksi, että varastointiin tarvittava säiliön seinämän paksuus on pienempi. Nestemäisen vedyn etu paineistettuun verrattuna on myös sen suurempi tiheys, noin 71 kg/m^3 . Energiatiheys tilavuutta kohden on $8,5 \text{ MJ/litra}$ eli noin kolminkertainen verrattuna 350 baariin paineistettuun vetyyn. Näin vetyä saadaan varastoitua enemmän samankokoisessa säiliössä. Nestemäistä vetyä on suosittu esimerkiksi avaruusohjelmissa ja mannertenvälisissä laivauksissa.

Vedyn nesteytys on huomattavasti paineistusta kalliimpi menetelmä. Haasteena on erityisesti nesteytyksen korkea energiatarve. Vedyn nesteyttämiseksi normaalipaineessa se täytyy jäähdyttää hyvin matalaan -253 °C lämpötilaan, mistä seuraa, että jopa 35–40 % vedyn energiasisällöstä kuluu nesteytysprosessiin, kun paineistetun vetyvaraston energiahäviö on noin 10 % (Moradi ja Groth, 2019; Tashie-Lewis ja Nnabuife, 2021). Lisäksi tarvittava nesteytyslaitosinvestointi lisää vedyn tuotantojärjestelmän monimutkaisuutta ja kustannuksia.

Nestemäisen vedyn merkittävä haaste on sen alhainen kiehumispiste. Alhaisesta kiehumispisteestä johtuen vety höyrystyy herkästi, minkä vuoksi kunnollinen eristys on olennainen osa säilytysratkaisua. Nesteytetyn vedyn säiliöissä on kaksikuorinen rakenne, jossa kuorten välissä on tehokas lämpöeristys. Hyvästä eristyksistä huolimatta lämmön vuotaminen varastoon on väistämätöntä ja jonkin verran vetyä kiehuu aina. Tämän ns. boil-off kaasun määrä on riippuvainen säiliön koosta ja vaihtelee suurten säiliöiden $<0,1 \%$:n häviöstä aina pienten säiliöiden 3% :n päivittäisiin häviöihin (Morales-Ospino ja muut, 2023). Prosessin tehokkuuden parantamiseksi ja energiahäviöiden välttämiseksi boil-off kaasun syntyminen tulee estää tai vaihtoehtoisesti ottaa boil-off kaasu talteen. Boil-off kaasun synty voidaan estää jäähdyttämällä varastosäiliötä aktiivisesti. Kylmän lämpötilan ylläpitoon kuluu kuitenkin energiaa. Toinen vaihtoehto on ottaa boil-off kaasu talteen ja käyttää se hyödyksi. Jos kohteessa on säännöllistä kaasumaisen vedyn käyttöä, voidaan boil-off kaasu hyötykäyttää suoraan kohteen prosesseissa. Jos sitten kohteessa ei ole säännöllistä käyttöä kaasumaiselle vedylle, voidaan boil-off vety paineistaa varastoitavaksi välivarastossa tai käytettäväksi esimerkiksi tankkausasemilla. Kaasumaiseksi kiehunut vety voidaan myös uudelleen nesteyttää (Morales-Ospino ja muut, 2023), mikä on yksinkertaista toteuttaa, jos varasto sijaitsee nesteytyslaitoksen yhteydessä. Muussa tapauksessa tarvitaan lisäinvestointi nesteytysjärjestelmään. Kustannusten säästämiseksi monissa vedyn varastointi-/kuljetussovelluksissa boil-off yksinkertaisesti vapautetaan ilmakehään kryogeenisen säiliön ylipaineen estämiseksi (Morales-Ospino ja muut, 2023). Vaikka on totta, että tämä menetelmä on yksinkertainen ja eliminoi lisäinvestoinnit, on se energian hukkaamista. Jos kuitenkin päädytään boil-offin ventiloimiseen, on se tehtävä turvallisesti ulkoilmaan. Boil-off ilmiön vuoksi vedyn varastointi nesteytettynä soveltuu huonosti pitkäaikaiseen varastointiin ja siksi vedyn käyttö tässä varastointimuodossa tulisi olla säännöllistä.

Kryogeeniset varastot sopivat laajamittaiseen vedyn varastointiin. Esimerkiksi Linde toimittaa nesteytetyn vedyn varastosäiliöitä 300 m^3 tilavuuteen saakka (NCE, 2016). Tämän kokoinen säiliö pystyy varastoimaan noin 700 MWh nestemäistä vetyä. Maailman suurin yksittäinen kryogeeninen varastosäiliö sijaitsee Floridassa, Yhdysvalloissa. Säiliön tilavuus on 3800 m^3 ja sen kapasiteetti on 270 tonnia nestemäistä vetyä (NCE, 2016).

5.3 Kryo-paineistettu vedyn varastointi

Kryo-paineistettu vedyn varastointi yhdistää paineistetun kaasumaisen vedyn ja nesteytetyn vedyn varastointijärjestelmien ominaisuudet. Se on kehitetty minimoimaan nesteytetyn vedyn varastoinnin kiehumishäviöitä säilyttäen samalla korkean järjestelmän energiatheyden (Barthelemy ja muut, 2017). Kryo-paineistetussa varastoinnissa vetyä varastoidaan eristetyssä säiliössä, joka kestää kryogeenisiä lämpötiloja ja korkeaa painetta (250–350 bar). Se, että säiliö on suunniteltu toimimaan korkeassa paineessa, mahdollistaa suuremman paineen nousun ennen kuin boil-off kaasu on poistettava. Tämä vähentää kiehumishäviöitä. Lisäksi alhaisemmat paineet, tyypillisesti <300 bar, verrattuna paineistetun vedyn varastointiin (jopa 700 bar), vähentävät kalliiden hiilikuitukomposiittien tarvetta (Langmi ja muut, 2022). Edellä mainittujen etujen lisäksi kryo-paineistus mahdollistaa vedyn suurimman tiheyden. Esimerkiksi 300 baarin paineessa ja -235 °C lämpötilassa vedyn tiheys on 80 kg/m³ ja volumetrinen energiatiheys 9,6 MJ/litra (Barthelemy ja muut, 2017).

Kryo-paineistettu varastointi on vielä kehitysvaiheessa olevaa teknologiaa. Tähän mennessä sitä on demonstroitu lähinnä ajoneuvokäytössä. Varastoinnin paine- ja lämpötilaolosuhteet on kuitenkin helppo saavuttaa, joten se on potentiaalinen varastointivaihtoehto (Sweco, 2023) laajempiinkin sovelluksiin. Tutkimustyötä tehdään edelleen teknologian täyden potentiaalın tutkimiseksi ja osoittamiseksi.

5.4 Materiaaleihin perustuvat varastointiratkaisut

Materiaalipohjaisessa varastoinnissa vety on sidottu toiseen aineeseen. Materiaalipohjaisten vetyvarastojen kehittämisen tavoitteena on luoda uusia varastointitekniikoita, joilla on perinteisiä paineistus- ja nesteytystekniikoita suurempi vedyn varastointikapasiteetti ja jotka lisäksi pystyvät toimimaan kohtuullisessa paineessa ja lämpötilassa, jolloin myös vaadittavien turvallisuusjärjestelmien tarve on muita varastointimuotoja vähäisempi.

5.4.1 Vedyn varastointi kiinteisiin materiaaleihin

Vetyä voidaan varastoida kiinteiden aineiden sisään (absorptio) tai kiinteiden aineiden pinnoille (adsorptio) (Zhang ja muut, 2016). Absorptiossa metallihydritit on tunnustettu yhdeksi toteutettavimmista ratkaisuista vedyn varastoimiseksi (Abe ja muut, 2019). Metallihydrideillä voidaan saavuttaa hyvä volumetrinen kapasiteetti ja matalan varastointipaineen ansiosta varastoiminen on turvallista. Käytettyjä metalleja ovat esimerkiksi litium, natrium, magnesium ja titaani sekä erilaiset metalliseokset. Varastoitaessa vety reagoi käytettävän metallin kanssa muodostaen kiinteän metallihydridin sekä lämpöä. Vety voidaan purkaa metallihydridistä käänteisellä reaktiolla tuomalla prosessiin sama lämpömäärä kuin hydridin muodostumiseen vaadittiin. Ns. yksinkertaisten metallihydridien gravimetrinen kapasiteetti, eli vedyn massa suhteessa hydridin massaan, rajoittuu tyypillisesti 3–7 massa-%:iin (Abe ja muut, 2019; Zhang ja muut, 2016). Ns. kompleksilla hydraateilla, esimerkiksi alanaateilla ja boorihydraateilla, on tutkimuksissa saavutettu jopa 9–13 % gravimetrisia kapasiteetteja (Zhang ja muut, 2016). Suurin osa metallihydridien kapasiteettiarvoista perustuu kuitenkin teoreettisiin tutkimuksiin, ja kokeellisten tutkimusten tulee validoida nämä arvot. Metallihydridien volumetriset vedynvarastointikapasiteetit ovat tyypillisesti 100–120 kg H₂/m³ (Klopčič ja muut, 2023).

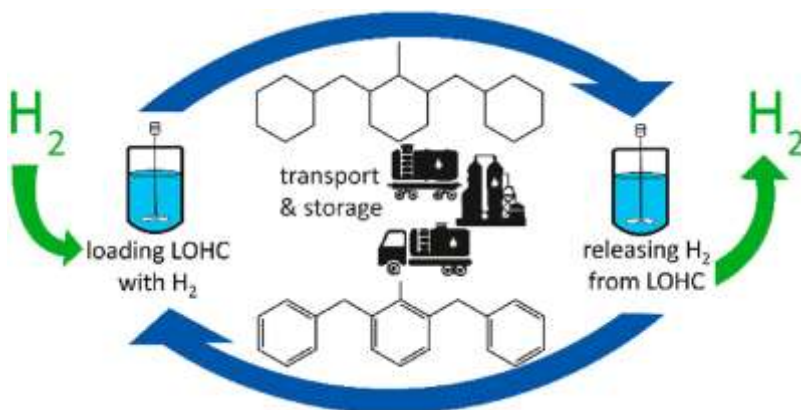
Haittapuolena metallihydrideissä on hitaasti tapahtuva sitoutumisreaktio sekä vedyn vapauttamisessa vaadittava suhteellisen korkea lämpötila (Zhang ja muut, 2016). Metallihydridivarastot ovat myös painavia. Tämän vuoksi ne soveltuvat parhaiten käytettäväksi kiinteästi asennettuina paikallisina varastoina. Kaupallisia ratkaisuja on vielä niukasti saatavissa, mutta esimerkiksi GKN Hydrogen

on tuonut markkinoille metallihydridivaraston 250 kg:n eli 8,3 MWh:n varastointikapasiteetilla (GKN Hydrogen, 2022). Yksiköitä voidaan myös yhdistää suuremmiksi kokonaisuuksiksi.

Adsorptiossa vetyatomit tai molekyylit kiinnittyvät materiaalien pintaan. Vetyä voidaan sitten vapauttaa aina tarvittaessa lämpöstimulaatiolla tai muulla sopivalla tekniikalla (Abe ja muut, 2019). Adsorptiossa hyödynnetään huokoisia materiaaleja kuten aktiivihiihtä, fullereeneja, zeoliitteja ja orgaanisia metallirakenteita (MOF, Metal-Organic Framework). Menetelmän etuja ovat nopea vetykinetiikka ja alhainen vedyn sitomisenergia. Ongelmana on kuitenkin alhainen vedyn varastointikapasiteetti ympäristön olosuhteissa. Korkeiden kapasiteettien saavuttamiseksi vaaditaan edelleen hyvin matalia, lähes -200 °C lämpötiloja ja jopa 100 baarin paineita (Zhang ja muut, 2022). Tämä asettaa rajoituksia menetelmän käytölle käytännön sovelluksissa.

5.4.2 Vedyn varastointi nestemäisiin vedynkantajiin

Merkittäviä tutkimusponnisteluja tehdään myös nestemäisiin vedynkantoaineisiin. Yksi merkittävimmistä tutkimussuunnista on nestemäiset orgaaniset vedyn kantajat (LOHC, liquid organic hydrogen carrier). LOHC:t ovat nesteitä, jotka sisältävät reversiibelisti vetyä sitovia ja vetyä vapauttavia molekyylejä (Hircher ja muut, 2020). Hydrausvaihe eli vedyn sitominen LOHC-nesteeseen on eksoterminen (lämpöä vapauttava) ja se suoritetaan tyypillisesti $150\text{--}250\text{ °C}$ lämpötilassa ja $10\text{--}50$ bar paineessa katalyyttien läsnä ollessa. Dehydrausvaihe eli vedyn vapauttaminen LOHC-nesteestä puolestaan on endoterminen prosessi, mikä tarkoittaa että, prosessiin on vietävä lämpöä. Dehydraus suoritetaan tyypillisesti $250\text{--}350\text{ °C}$ lämpötilassa ja $1\text{--}5$ baarin paineessa katalyyttien läsnä ollessa. (Xu ja muut, 2022) Dehydrauksen aikana ainoana tuotteena vapautuu vetyä ja kantajaneste palautuu alkuperäiseen tilaansa ja on näin valmis hydrattavaksi uudelleen. Kuva 9 havainnollistaa LOHC-konseptin peruseriaatteet.



Kuva 9. LOHC-konseptin peruseriaatteet (Chen ja muut, 2021)

Ihanteellisella LOHC:lla on korkea vedyn varastointitiheys, alhainen reaktioentalpia ja pitkä käyttöikä. Lisäksi konversioreaktioiden tulisi tapahtua kohtuullisissa olosuhteissa edullisia katalyyttejä käyttämällä. Tutkimuksen kohteena on useita erilaisia LOHC-yhdisteitä, kuten tolueni/metyylisykloheksaani, naftaleeni/dekaliini, bentseeni/sykloheksaani ja dibentsyyli-tolueni (DBT)/perhydro-dibentsyyli-tolueni (PDBT) (Xu ja muut, 2022). LOHC-yhdisteiden gravimetriset vedyn varastointikapasiteetit vaihtelevat 6 ja 8 massa-%:n välillä. Volumetrinen vedynvarastointikapasiteetti LOHC-yhdisteillä on $50\text{--}70\text{ kg H}_2/\text{m}^3$ (Abdin ja muut, 2021)

LOHC-konseptien merkittävä etu on, että LOHC:t ovat yhteensopivia olemassa olevan polttoaineinfrastruktuurin kanssa. Tämä vähentää kustannuksia ja mahdollistaa tekniikan nopean käyttöönoton. Lisäksi vedyn hävikkiä ei tapahdu edes pitkäaikaisessa varastoinnissa (vrt. nesteytetyn vedyn boil-

off häviöt) (Aakko-Saksa ja muut, 2018). LOHC-konsepti on myös hyvin turvallinen; vety ei vuoda pois LOHC:sta, koska sen vapauttaminen edellyttää lämmittämistä.

Teknologian haasteena ovat korkeat reaktioentalpiat; vedyn vapauttamiseen tarvitaan huomattava määrä lämpöä. Noin 25–30 % vapautuneesta vedystä joudutaan polttamaan, jos lämpö tuotetaan vedystä. Koska vaadittu lämpötilataso on melko korkea, ei useimmissa tapauksissa ole mahdollista käyttää hukkalämmön lähteitä. On kuitenkin pidettävä mielessä, että hydrauksen aikana vapautuu lämpöä. Jos tämä lämpö voidaan hyödyntää, voidaan dehydrauksen energiaseuraamus kompensoida ainakin osittain. (Hurskainen, 2019) Lämmönsyöttömenetelmien ja niiden integroinnin uskotaankin olevan avainasemassa LOHC:n sovelluksissa (Xu ja muut, 2022). Toinen mahdollinen lisähaikka LOHC-konseptissa on dehydrausvaiheen alhainen paine. Tapauksissa, joissa tarvitaan korkeapainevetyä, tarvitaan erillinen paineistusvaihe, joka edelleen lisää energiantarvetta (Hurskainen, 2019).

Dibentsyyliolueeni LOHC-konsepti ovat jo kaupallisesti saatavilla. Saksalainen Hydrogenious LOHC Technologies GmbH tarjoaa DBT-LOHC ratkaisuja niin vedyn varastointiin kuin kuljetuksiin (Hydrogenious, 2023). Hydrogeniousin ratkaisut kykenevät varastoimaan vetyä 54 kg per m³ LOHC. Hydrogeniousin tekniikkaa hyödynnettiin myös HySTOC-projektissa (Hydrogen Supply and Transportation using liquid Organic Hydrogen Carriers), jossa DBT-LOHC tekniikkaa demonstroitiin logistisessa ketjussa sisältäen varastoinnin Kokkolassa, kuljetukset LOHC:ssa ja vedyn vapauttamisen Espoossa (Woikoski, 2021). Suomalaiset kumppanit projektissa olivat Woikoski Oy ja VTT.

Toinen paljon huomiota saanut nestemäinen vedynkantaja on ammoniakki. Toisin kuin puhdasta vetyä, ammoniakki voidaan varastoida ja kuljettaa nesteinä melko alhaisessa paineessa ja maltillisessa lämpötilassa. Käyttökohteessa ammoniakki voidaan hajottaa takaisin vedyksi ja typeksi. Myös ammoniakilla itsellään on teollisuuden loppukäyttäjää.

Ammoniakki on tehokas vedynkantaja. Sen gravimetrinen vetytiheys on korkea 17,7 m-%. Myös sen volumetrinen vetytiheys on houkutteleva; yksi kuutiometri nestemäistä ammoniakkiä sisältää 120,3 kg vetyä (Xu ja muut, 2022). Tämä on 70 % enemmän kuin nesteytetyllä vedyllä (71 kg/m³). Puhdastaan vetyyn verrattuna ammoniakki on myös helpompi ja edullisempi nesteyttää. Normaali-paineessa ammoniakki nesteytyy jo –33 °C lämpötilassa. Toinen vaihtoehto on paineella nesteyttäminen. Ammoniakkin nesteyttämiseen normaalilämpötilassa riittää 8–9 baarin paine. Toinen ilmeinen ammoniakkin vahvuus on sen kypsä teollinen tuotantojärjestelmä. Ammoniakki on jo nyt yksi yleisimmistä synteettisistä kemikaaleista, joten sen kuljetusteknologia, toimitukset ja siihen liittyvä infra ovat jo nykyisellään laajalti käytössä (AFRY, 2022).

Suurin haaste liittyykin tehokkaan vedyn talteenoton kehittämiseen ammoniakista. Perinteinen tapa vedyn erottamiseen ammoniakista on termokatalyyttinen ammoniakkin hajottaminen. Menetelmän etuna on prosessin yksinkertaisuus ja teknologian kypsyys. Haasteena on kuitenkin sen suuri energiatarve. Vahvojen vetysidosten hajottaminen vaatii ulkoista energiasyöttöä katalyytin lämmittämiseksi vähintään 400 °C lämpötilaan riittävän pitkäksi ajaksi, mikä johtaa aikaviiveeseen ja alhaiseen energiatehokkuuteen. Ammoniakkin hajottamiseen tarkoitettuja katalyyttejä kuitenkin kehitetään jatkuvasti nopeuttamaan ammoniakkin hajoamisen hidasta kinetiikkaa ja stimuloimaan vedyn tuotantoa. Ammoniakista krakattu vety saattaa myös vaatia lisäpuhdistusta, jos käyttökohteeseen vaatii ultrapuhdasta vetyä. Toinen tapa erottaa vety ammoniakista on elektrolyysi. Elektrolyysillä vety ja typpi voidaan erotella kustannustehokkaasti kohtuullisessa lämpötilassa. Toistaiseksi ongelmana on kuitenkin hidas kinetiikka ja huono selektiivisyys, eikä menetelmän suorituskyky vielä täytä teollisen sovellettavuuden vaatimuksia. (Huang ja muut, 2023)

Vetyä voidaan varastoida kemiallisesti myös esimerkiksi metaanina ja metanolina, joiden osalta voidaan hyödyntää niille ominaista ja olemassa olevaa infrastruktuuria. Vedyn palauttaminen energian

kantajaksi edellyttää näissäkin tapauksissa kuitenkin energiaintensiivisiä termokatalyyttisiä menetelmiä, jolloin energiahäviöt kasvavat. Esimerkiksi metaanin reformointi vedyksi vaatii >700 °C lämpötilan.

5.5 Varastoinnin tilantarpeet

Taulukko 2 esittää yhteenvedon vedyn varastointimenetelmien varastointikapasiteeteista. Tilantarpeiden havainnollistamiseksi laskettiin kullekin varastoitavalle aineelle tarvittava varastointitila (ilman säiliötä) 10 tonnin vetymäärän varastoimiseksi. Vertailun vuoksi mainittakoon, että vastaava energiamäärä (330 MWh) polttoöljynä vaatisi 33 m³ varastointitilavuuden. Toisaalta, verrattuna sähköakuihin, vety tarjoaa huomattavasti paremman energiatiheyden sähkön varastoimiseen. Sähköakun energiatiheydellä 0,35 MWh/m³ (LUT, 2022), 10 tonnia vetyä vastaava energiamäärä vaatisi 940 m³ sähköakutilavuuden.

Taulukko 2. Vedyn eri varastointimenetelmien tilantarpeet

Varastoitava aine	Olosuhde	Vety- pitoisuus (m-%)	Volumetrinen vedyn varastointi- kapasiteetti (kg H ₂ /m ³)	Energia- tiheys (MJ H ₂ /m ³)	10 t vety- varaston tilavuus (m ³)
Vety (neste)	-273 °C 1 bar	100	71	8500	141
Vety (paineistettu)	20 °C 700 bar	100	40	4800	250
Vety (paineistettu)	20 °C 350 bar	100	24	2900	417
Vety (paineistettu)	20 °C 200 bar	100	15	1800	670
Vety (kryo-paineistettu)	-235 °C 300 bar	100	80	9600	125
Metallihydritit	20 °C 1 bar	3-7	100-120	12000- 14400	83-100
LOHC	20 °C 1 bar	6-8	50-70	6000- 8400	143-200
Ammoniakki (neste)	20 °C/10 bar tai -33 °C/1 bar	17,7	120	14400	83
Metanoli	20 °C 1 bar	12,5	100	12000	100
Metaani (neste)	-162 °C 1 bar	25	105	12600	95
Metaani (paineistettu)	20 °C 200 bar	25	41	4900	245

5.6 Vedyn siirtomenetelmät

Se, missä muodossa ja mitä kuljetusmuotoa hyödyntäen vety toimitetaan käyttökohteeseen, riippuu kuljetusetäisyydestä, toimitusmääristä ja loppukäyttäjän tarpeista (Sivill ja muut, 2022).

Kaasumaisen vedyn kuljetus tapahtuu nykyään pääasiassa kaasupullo- tai putkiperävaunujen (tube trailer) avulla. Tämä kuljetusmuoto soveltuu suhteellisen pienten määrien kuljettamiseen lyhyillä tai kohtalaisilla matkoilla (alle 200–300 km) (Hurskainen ja Ihonen, 2020). Perinteisesti vetyä on kuljetettu 200 bar paineessa teräspulloissa, joilla vetykuorma rajoittuu noin 300 kg:aan pullojen suuren painon ja alhaisen paineen takia. Viime vuosina yksittäisen kuorma-auton maksimikuljetuskapasiteettia on kuitenkin voitu kasvattaa jopa 1000 kg:aan käyttämällä hiilikuitupulloja ja nostamalla varastopaine 500 baariin (kuva 10) (HOOU, 2023). Vedyn kuljetus painesäiliöissä sopii myös rautatiekuljetuksiin.

Kuljetettavan energian määrä voidaan lähes nelinkertaistaa käyttämällä nestemäistä vetyä (kuva 10). Nesteytetty vety soveltuukin paineistettua paremmin pidemmille, yli 300 km siirtomatkaille, kohtuullisen kysynnän kohteisiin. Vedyn nesteytysprosessi on kuitenkin erittäin pääomavaltainen ja sen energiatarve on korkea; nesteyttäminen on kustannustehokasta yleensä vain suurille laitoksille (>100 MW) (Hurskainen ja Ihonen, 2020).



Kuva 10. Vaihtoehdot puhtaan vedyn kuljettamiseen maanteitse (HOOU, 2023)

Nestemäiset orgaaniset vedynkantoaineet (LOHC) on lupaava uusi ratkaisu tehokkaaseen ja turvalliseen vedyn varastointiin ja kuljetukseen; LOHC-konseptilla 40 tonnin säiliöautot voisivat kuljettaa noin 1500–2000 kg vetyä (Hurskainen ja Ihonen, 2020). LOHC-nesteet ovat yhteensopivia olemassa olevan polttoaineiden siirto- ja jakeluinfrastruktuurin kanssa. Koska eristysvaatimukset ja kestettävä paine-ero ovat huomattavasti pienemmät kuin nestemäisellä tai paineistetulla vedyllä, on sen kuljetus helpompaa. Nämä kuljetusedut kuitenkin "ostetaan" korkeilla energeettisillä ja taloudellisilla kustannuksilla vedynkantajan käsittelyssä. Kuljetuskonseptien keskinäisessä vertailussa tulee ottaa huomioon kaikki tuotannon vaiheet (nesteytys, paineistus, vedyn sitominen LOHC-yhdisteisiin) sekä mahdollisti vedyn vapauttamiseen tarvittavat prosessit (LOHC-nesteen dehydraus ja vedyn puhdistus). (HOOU, 2023) Vetyä voidaan kuljettaa kemiallisesti varastoituna myös esimerkiksi ammoniakina. Nestemäistä ammoniakia on helppo siirtää putkilinjoissa, ajoneuvoilla ja muilla massateknologioilla. Kannattavuutta arvioitaessa on kuitenkin muistettava, että ammoniakkin synteesi ja vedyn erottaminen ammoniakista ovat paljon energiaa vaativia prosesseja.

Vetytalouden vasta kehittyessä vedyn käyttö Suomessa todennäköisesti perustuu aluksi vedyn paikalliseen tuotantoon lähellä sen kulutuspaikkaa (Sivill ja muut, 2022). Suhteellisen vähäisen käsittelytarpeen vuoksi (ei energiaintensiivistä nesteyttämistä tai sitomista kantajaväliaineeseen) vedyn kuljetus paikallisessa vetyputkistossa voi tällöin olla houkutteleva vaihtoehto. Jo nykyään putkistoja käytetään vedyn kuljettamiseen teollisuusalueiden sisällä eri teollisuuslaitosten välillä. Suomen ensimmäinen yksittäisen teollisuusalueen ulkopuolelle ulottuva vedynsiirtoverkko on suunnitteilla Kaakkois-Suomeen. Joutseno-Imatra vedyn siirtoverkkohankkeen tavoitteena on rakentaa vedyn siirto-putki, jossa Kemiran Joutsenon tehtaassa sivutuotteena syntyvä vety kuljetetaan Ovakon terästehtaaseen Imatralle. Hanketta vetää Gasgrid Finland Oy. Hankkeen aikana on tarkoitus myös luoda vedyn putkirakenteista malli, jota voisi monistaa ja skaalata eri kokoluokkiin. Tulevaisuudessa tämä noin 23 km pituinen Joutsenon-Imatran vetyputki voi yhdistää vedyn tuottajat, käyttäjät ja

jatkojalostajat laajemminkin mahdollistaen alueellisen vetyklusterin kehittymisen. Myös Kokkolan seudulle on käynnistymässä selvitys alueellisen vetyverkoston kehittämisestä. Hankekumppaneina tässä ovat Flexens ja Gasgrid Finland. Kummatkin mainitut alueelliset vetyverkot voidaan myöhemmin liittää kaavailtuun kansalliseen vetyverkkoon. Putki-investointi on kuitenkin kallis ja putkisiirron edellytyksenä yleisesti pidetäänkin vedyn jatkuvaa, pitkäaikaista käyttöä. Putkisiirto on mielekästä myös silloin, kun volyymit ovat hyvin suuria. Vetyputket toimivat tavallisesti 10–100 baarin käyttöpaineilla (HOOU, 2023).

6 Lopuksi

Etelä-Pohjanmaa on tunnetusti vahva ruoantuotantomaakunta. Erityisesti kasvinviljelytiloja on määrällisesti paljon ja maakunnan pinta-alasta 19 % on peltoa (Etelä-Pohjanmaan liitto, 2022). Elintarvikevalmistuksen toimipaikkoja maakunnassa on 107 ja juomia valmistavia toimipaikkoja 14 (Tilastokeskus, 2023). Lisäksi alueella on ruokasektorin toimintaan liittyen muun muassa merkittävää tuotantopanosteollisuutta sekä kuljetusalan yrityksiä (Huhtaluhta, 2020).

Ilmastonmuutoksen tullessa yhä nopeammaksi, voimakkaammaksi ja uhkaavammaksi, myös ruoantuotannossa tarvitaan entistä ilmastoystävällisempiä tuotantoteknologioita. Keskeistä päästövähennystoimenpiteissä on elintarvikkeiden koko arvoketjun hallinta. Elintarvikkeiden arvoketjussa merkittävin osa kasvihuonekaasupäästöistä muodostuu alkutuotannosta ja energiantuotannosta. Vähäisemmässä määrin ilmastopäästöjä muodostuu logistiikasta ja pakkausmateriaaleista.

Vihreällä vedyllä voi olla merkittävä rooli kestävämmän elintarvikearvoketjun tavoittelussa. Tässä tutkimuksessa tunnistetut potentiaalisimmat vihreän vedyn käyttökohteet ruokaketjussa ovat lannoitteiden valmistuksessa, elintarviketeollisuuden sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä ruokaketjun kuljetustoiminnoissa. Itse elintarvikkeiden valmistusprosessissa vedyn käyttömahdollisuudet ovat rajallisemmat, mutta mahdollisuuksia löytyy esimerkiksi proteiinien tuotannosta.

Merkittävä alkutuotantoon välillisesti yhdistettävä päästölähde on lannoitetuotanto. Typpilannoitteiden valmistuksessa käytettävä ammoniakki tuotetaan nykyisin pääosin maakaasusta saatavasta vedystä. Fossiilisen maakaasun käyttö ammoniakkin tuotannossa aiheuttaa jopa 2,6 tonnin kasvihuonekaasupäästöt tuotettua ammoniakkitonnia kohti, mikä tekee siitä yhden eniten päästöjä aiheuttavista kemiallisista tuotantoprosesseista. Ammoniakkia voidaan kuitenkin tuottaa myös huomattavasti ekologisemmin korvaamalla maakaasusta saatava vety vihreällä vedyllä. Huomattavien päästövähennysten lisäksi kotimainen vihreän ammoniakkin tuotanto parantaisi lannoitehuoltovarmuuttamme ja ruokatuotantomme luotettavuutta merkittävästi.

Alkutuotannon jälkeen suurin ruoan tuotantoketjun päästölähde on elintarviketeollisuuden energiankäyttö. Suurin energiamuoto elintarviketeollisuudessa on sähkö (43 %). Lähes yhtä suuri osa käytettävästä energiasta menee lämmitystä vaativiin osaprosesseihin. Hiilettömään tai vähähiiliseen energiaan siirtyminen elintarviketeollisuusyritysten omassa sekä nk. vierilaitosten energiantuotannossa olisi tärkeä toimi hiilineutraaliuden tavoittelussa. Tässä vety voisi olla osaratkaisu, joko puhtaana vetyä tai synteettisten polttoaineiden muodossa.

Vihreä vety mahdollistaisi myös nollapäästöisen tavaroiden ja raaka-aineiden kuljettamisen. Vety-polttokennokäyttöistä kuljetuskalustoa on jo saatavissa, mutta jakeluverkoston puute on toistaiseksi estänyt niiden käyttöönoton Suomessa. Suomen kansallisena tavoitteena kuitenkin on, että Suomeen rakennettaisiin vuoteen 2030 mennessä noin 20 vetyasemaa. Vety-polttokennot sopivat hyvin myös esimerkiksi varastoissa tarvittavien siirto- ja nostolaitteiden voimanlähteeksi. Tulevaisuudessa vetyä voidaan käyttää myös polttomoottorin polttoaineena niin rekoissa kuin maatalouskoneissa ja muissa suurissa työkoneissa. Lisäksi uusiutuvalla energialla tuotetusta vedystä on mahdollista johtaa erilaisia liikennepolttoaineita, joiden etuna on, että niiden hyödyntäminen onnistuu nykyisillä jakeluverkostoilla ja moottoreilla. Esimerkiksi tankkausverkostoa kaasulle on jo melko laajasti saatavilla, jolloin vihreä siirtymä uusiutuvalla sähköllä tuotetusta vedystä jalostetulla metaanilla voitaisiin aloittaa liikennekäytössä välittömästi, kun sitä on saatavilla.

Elektrolyysipohjaisen vedyn tuotannon mahdollistajana Etelä-Pohjanmaalla on kasvava uusiutuvan sähkön tuotanto, esimerkiksi tuulivoimahankkeita on käynnissä yli 30 (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2023). Myös aurinkosähköhankkeita mm. entisillä turvetuotantoalueilla on suunnitteilla useita. Elektrolyysiteknologian yhdeksi keskeisimmäksi haasteeksi nähdään tuotannon matala hyötysuhde ja sivutuotteena syntyvän matalalämpöisen energian määrä; noin kolmasosa sisään syötetystä sähköstä muuttuu lämmöksi. Etelä-Pohjanmaan laaja kaukolämpöverkosto luo mahdollisuuden tämän hukkalämmön hyödyntämiseen ja sitä kautta prosessin hyötysuhteen parantamiseen. Ratkaiseva tekijä hukkalämmön hyödyntämiselle on elektrolyysilaitoksen sijainti suhteessa kaukolämpöverkkoon. Elektrolyysin lisäksi vihreää vetyä voidaan tuottaa myös biomassoista erilaisilla lämpökemiallisilla ja biokemiallisilla prosesseilla. Vedyn tuotanto biomassoista voi olla houkuttelevaa alueilla, joissa biomassaa, kuten maatalous- ja metsätalousjätteitä tai esim. elintarvikkeiden jalostusjätteitä on paikallisesti runsaasti saatavilla.

Vihreästä vedystä johdettujen synteettisten polttoaineiden tuotannon näkökulmasta Etelä-Pohjanmaan vahvuutena on runsas biomassojen hyödyntäminen energiantuotannossa. Biopolttoaineiden osuuden odotetaan myös edelleen kasvavan, kun turpeen käyttö korvataan muilla energialähteillä (Ramboll, 2021). Esimerkiksi vuonna 2021 kaukolämmön tuotantoon käytetystä polttoaineesta 48 % oli peräisin energiaturpeesta, joten tulevaisuuden energiantuotannossa tulee tapahtumaan suuria muutoksia tämän osalta (Etelä-Pohjanmaan liitto, 2023). Biomassoihin perustuva energiantuotanto tarjoaa biogeenisen hiilidioksidin lähteen, jota tarvitaan kestävien synteettisten polttoaineiden tuotannossa. Lisäksi maakuntaan on kaavailtu lisääntyvää biokaasun tuotantoa. Myös biokaasun jalostusprosessissa talteen otettua hiilidioksidia voitaisiin hyödyntää synteettisten polttoaineiden valmistuksessa.

Vihreän vedyn hyödyntäminen ruoan arvoketjussa tukisi Etelä-Pohjanmaan ilmasto- ja kiertotaloustiekartan tavoitetta hiilineutraalista elintarviketuotannosta. Vetytalouden toteutuminen alalla vaatii mittavaa yhteistyötä eri toimijoiden kesken ja yhtäaikaisia toimia arvoketjun eri osa-alueille. Ruoantuotannon ydintoimintojen – alkutuotannon ja elintarvikkeiden jalostuksen – toimenpiteiden lisäksi vetytalouteen siirtyminen edellyttää panostuksia vedyn ja sen jatkojalosteiden tuotantolaitoksiin sekä vedyn ja siitä jalostettujen tuotteiden varastointi- ja jakeluinfrastruktuuriin. Myös uusiutuvaa sähköä tuottavilla energiayhtiöillä tulee olemaan tärkeä rooli monissa tulevaisuuden vihreän vedyn hankkeissa. Lisäksi tarvitaan koulutuspanostuksia vetytalouden mukanaan tuomien osaamistarpeiden ja -vaatimusten täyttämiseksi.

Lähteet

Aakko-Saksa, P.T., Cook, C., Kiviaho, J., Repo, T. (2018). Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy – Review and discussion. *Journal of Power Sources*, 396, 803–823, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.011>

Abdin, Z., Tang, C., Liu, Y., Catchpole, K. (2021). Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. *iScience*, 24(9), 102966, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102966>

Abe, J.O., Popoola, A.P.I., Ajenifuja, E., Popoola, O.M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072–15086, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>

AFRY (2022). *Vedyn mahdollisuudet Kemille-hankkeen logistiikkaselvitys – loppuraportti 29.6.2022*. AFRY Finland Oy. https://5597538.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/5597538/Vedyn%20mahdollisuudet%20Kemille_Logistiikkaselvitys_loppuraportti-1.pdf?hsCtaTracking=5ab34549-0852-4bcf-9e3c-b2aa3d095bae%7C937dec52-e8c9-42be-b8e8-69a076352ce3

Atchison, J. (2021, 1. syyskuuta). *Mitsubishi Power developing ammonia combustion boilers*. Ammonia Energy Association. Noudettu 28.9.2023 osoitteesta <https://www.ammoniaenergy.org/articles/mitsubishi-power-developing-ammonia-combustion-boilers/>

Aurelia (2023). *Products. Aurelia® A400*. Aurelia Turbines Oy. Noudettu 26.9.2023 osoitteesta <https://aureliaturbines.com/aurelia-a400>

Barthelemy, H., Weber, M., Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254–7262, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>

Bosch (2023). *Solutions. Renewable energy. Hydrogen boilers*. Bosch Industriekessel GmbH. Noudettu 26.9.2023 osoitteesta <https://www.bosch-industrial.com/global/en/commercial-industrial/solutions/renewable-energies/>

Chen, X., Gierlich, C.H., Schötz, S., Blaumeiser, D., Bauer, T. ja muut (2021). Hydrogen Production Based on Liquid Organic Hydrogen Carriers through Sulfur Doped Platinum Catalysts Supported on TiO₂. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 9(19), 6561–6573, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c09048>

EDAG (2023). *From diesel to hydrogen combustion engine by Plug & Play*. EDAG Group. Noudettu 3.10.2023 osoitteesta <https://insights.edag.com/en/series-produced-truck-on-co2-neutral-hydrogen-combustion-engine-technology-instead-of-diesel>

EERE (2023). *Hydrogen Storage*. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Noudettu 5.10.2023 osoitteesta <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

Ervasti, S., Winqvist, E., Rasi, S. (2018). Typen talteenotto lantaperäisestä nesteestä: tekninen toteutettavuus ja prosessin kannattavuusarvio. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 4/2018, Luonnonvarakeskus. ISSN 2342-7639. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/541453/luke-luobio_4_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Etelä-Pohjanmaan liitto (2022). *Huomisen lakeus. Etelä-Pohjanmaan ilmasto- ja kiertotaloustiekartta*. Julkaisu B:102. ISBN 978-951-766-430-1. https://epliitto.fi/tiedostot/EPL_ilmasto_ja_kiertotalousstrategia_WEB.pdf

Etelä-Pohjanmaan liitto (2023). *Tilannekuva ja tilastot. Ilmastotyö ja kestävyys läpileikkaavina teemoina maakunnassa*. Etelä-Pohjanmaan liitto. Noudettu 23.10.2023 osoitteesta <https://epliitto.fi/tilastot/tilannekuva-ja-tilastot/aluerakenne-ja-ymparisto/>

ETL (2020). *Elintarviketeollisuuden tiekartta vähähiilisyteen*. Elintarviketeollisuusliitto 09/2020. <https://www.etl.fi/wp-content/uploads/2023/08/elintarviketeollisuuden-tiekartta-va-hahiilisyteen.pdf>

FCHEA (2023). *Fuel Cells and Hydrogen. Stationary Power*. Fuel Cell & Hydrogen Energy Association. Noudettu 27.9.2023 osoitteesta <https://www.fchea.org/stationary>

FCHO (2023). *Technology and market. Fuel cell market*. The Fuel Cells and Hydrogen Observatory. Noudettu 27.9.2023 osoitteesta <https://www.fchobservatory.eu/observatory/technology-and-market/fc-market#>

Flexens (2023). *Vihreän vedyn ja ammoniakkin tehdas Kokkolaan*. Flexens Kokkola. Noudettu 20.9.2023 osoitteesta <https://www.flexenskokkola.fi/>

Giles, T. (2023, 7. kesäkuuta). *Hydrogen Fuel Cell Fridge Unit*. Power Torque. Noudettu 3.10.2023 osoitteesta <https://powertorque.com.au/hydrogen-fuel-cell-fridge-unit/>

GKN Hydrogen (2022). *Products*. GKN Hydrogen GmbH. Noudettu 10.10.2023 osoitteesta <https://www.gknhydrogen.com/product/>

Green North Energy (2023). *Green North Energyn tuotantokonsepti vihreälle vedylle ja ammoniakille on valmistunut – hankkeen koko kolminkertaistui*. Green North Energy. Noudettu 20.9.2023 osoitteesta <https://www.greennorth.energy/ajankohtaiset/green-north-energyn-tuotantokonsepti-vihrealle-vedylle-ja-ammoniakille-on-valmistunut-hankkeen-koko-kolminkertaistui/>

Hirscher, M., Yartys, V.A., Baricco, M., von Colbe, J.B., Blanchard, D. ja muut (2020). Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 153548, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153548>

HOUU (2023). *Hydrogen Transportation*. Hamburg Open Online University. Noudettu 18.10.2023 osoitteesta <https://www.houu.de/projects/green-hydrogen/pages/hydrogen-transportation>

Huang, X., Lei, K., Mi, Y., Fang, W., Li, X. (2023). Recent Progress on Hydrogen Production from Ammonia Decomposition: Technical Roadmap and Catalytic Mechanism. *Molecules*, 28(13), 5245, <https://doi.org/10.3390/molecules28135245>

Huhtaluhta, S. (2020). Ruokasektorin innovaatiokeskittymän kehittäminen Etelä-Pohjanmaalla [yAMK opinnäytetyö, Seinäjoen ammattikorkeakoulu]. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/337412/Huhtaluhta_Soila.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Hurskainen, M. (2019). *Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) - Concept evaluation and techno-economics*. Teknologian tutkimuskeskus VTT, tutkimusraportti VTT-R-00057-19. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2019/VTT-R-00057-19.pdf>

Hurskainen, M., & Itonen, J. (2020). Techno-economic feasibility of road transport of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 32098–32112, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.186>

Hydrogen Technologies (2023). *A new hydrogen based energy solution*. Hydrogen Technologies LLC. Noudettu 26.9.2023 osoitteesta <https://hydrogentechnologiesllc.com/#home>

Hydrogenious (2023). *Our solutions*. Hydrogenious LOHC Technologies. <https://hydrogenious.net/>

IRENA (2020). *Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5 °C climate goal*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN 978 - 92 - 9260 - 269 - 7. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_Reaching_zero_2020.pdf?rev=571584c7539a4b7791088df3a1df78ce

IRENA (2021). *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. International Renewable Energy Agency and Methanol Institute. ISBN 978-92-9260-320-5. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf

Junkkari, T. (2021, 14. tammikuuta). *Etelä-Pohjanmaan vahva elintarviketuotanto luo pohjan ruokasektorin laaja-alaiselle kehittämiselle*. SeAMK verkkolehti. Noudettu 19.9.2023 osoitteesta <https://lehti.seamk.fi/kestavat-ruokaratkaisut/etela-pohjanmaan-vahva-elintarviketuotanto-luo-pohjan-ruokasektorin-laaja-alaiselle-kehittamiselle/>

Jääskeläinen, S. (2017). *Liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien jakeluverkko: Suomen kansallinen ohjelma*. Liikenne- ja viestintäministeriö. Raportit ja selvitykset 4/2017. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79530>

Kankaanpää, T. (2022). *Ammoniakin merkitys Suomen teollisuudelle*. Muistio Liikenne- ja viestintäministeriölle. <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2022-AK-27061.pdf>

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

Klopčič, N., Grimmer, I., Winkler, F., Sartory, M., Trattner, A. (2023). A review on metal hydride materials for hydrogen storage. *Journal of Energy Storage*, 72, Part B, 108456, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108456>

Koj, J.C., Wulf, C., Zapp, P. (2019). Environmental impacts of power-to-X systems - A review of technological and methodological choices in Life Cycle Assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 865–879, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.029>

Langmi, H.W., Engelbrecht, N., Modisha, P.M., Bessarabov, D. (2022). Hydrogen storage. Toim. Smolinka, T., Garche, J. Teoksessa *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications* (s.455-486). Elsevier. ISBN 9780128194249

Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J., Hurskainen, J. (2020). *National hydrogen roadmap for Finland*. Business Finland, Helsinki. ISBN 978-952-457-657-4. https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf

Liu, X., Elgowainy, A., Wang, A. (2020). Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green Chem.*, 22, 5751–5761, <https://doi.org/10.1039/D0GC02301A>

LUT (2022). *Kohti hiilineutraalia Suomea*. LUT-yliopiston energiaselonteko 5/2022. ISBN 978-952-335-830-0. <https://www.lut.fi/sites/default/files/media/documents/LUT-yliopiston-Energiaselonteko-2022.pdf>

Moradi, R., Groth, K.M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>

Morales-Ospino, R., Celzard, A., Fierro, V. (2023). Strategies to recover and minimize boil-off losses during liquid hydrogen storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113360, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113360>

Motiva (2021). *Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutus energiatehokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen*. Motiva Oy, Helsinki, tammikuu 2021. [https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistyminen_ja_sen_vaikutus_energiatehokkuuteen_ja_hukkalampojen_hyodyntämiseen_-_raportti_2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistyminen_ja_sen_vaikutus_energiatehokkuuteen_ja_hukkalampojen_hyodyntamiseen_-_raportti_2021.pdf)

Muoviyhdistys (2021). *Muovit päästölähteestä hiilinieluksi*. Muoviyhdistys ry. Noudettu 4.10.2023 osoitteesta <https://www.muoviyhdistys.fi/2020/09/07/muovit-paastolahteesta-hiilinieluksi/>

Mårtensson, Lars (2020, 15 kesäkuuta). *Vetypolttokennot: vastaamme kysymyksiin*. Volvo. <https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/news/insights/articles/2020/jun/hydrogen-fuel-cells-all-your-questions-answered.html>

NCE (2016). *Norwegian future value chains for liquid hydrogen*. Norwegian Centres of Expertise, NCE Maritime CleanTech. <https://maritimecleantech.no/wp-content/uploads/2016/11/Report-liquid-hydrogen.pdf>

Niskanen, O. (2022). Typen globaali kauppa ja Venäjän tuonnin tyrehtymisen vaikutukset hintoihin, saatavuuteen ja Suomen lannoitehuoltovarmuuteen. Julkaisussa: Vainio, E. (toim.), *Maatalouden typpihaaste – vaihtoehtoja ja ratkaisuja: Synteesiraportti*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 53/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 20–28. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/551964/luke-luobio_53_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Palm, E., Nilsson, L.J., Åhman, M. (2016). Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide. *Journal of Cleaner Production*, 129, 548–555, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.158>

Pitkänen, J-P. (2022, 17. elokuuta). *An elemental perspective to food production – Solar Foods produces a novel ingredient out of electricity and air*. Solar Foods. Noudettu 29.8.2023 osoitteesta <https://solarfoods.com/an-elemental-perspective-to-food-production/>

Ramboll (2021). *Energiantuotanto Pohjanmaalla ja Etelä-Pohjanmaalla 2050*. Ramboll Finland Oy. <https://epliiitto.fi/wp-content/uploads/2021/06/Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvitys-saavutettava.pdf>

Ryske, I., Åhlström, S. (2022). Ilmastolannoite -hankkeen taustaraportti. Toukokuu 2022. https://ilmastolannoite.fi/wp-content/uploads/2022/06/Taustaraportti_hiilijalanjalki_FINAL-2022.pdf

Sipilä, R. (2023, 31. toukokuuta). *Uusi tehdas Kokkolaan - Amerikkalainen Plug Power rakentaa kaupunkiin jätti-investoinnillaan vetytehtaan*. Keskipohjanmaa. Noudettu 20.9.2023 osoitteesta <https://www.keskipohjanmaa.fi/artikkeli/uusi-tehdas-kokkolaan-amerikkalainen-plug-power-rakentaa-kaupunkiin-miljardi-investoillaan-vetyteh>

Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P., Patronen, J. (2022). *Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet*. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:21. ISBN 978-952-383-413-2. https://julka-isut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf

Smith, C., Hill, A.K., Torrente-Murciano, L. (2020). Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy Environ. Sci.*, 13, 331–344, <https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>

Solar Foods (2023). *Solein® – protein out of thin air*. Solar Foods. <https://solarfoods.com/>

Sturm, H.J. (2017). Hydrogen Economy for the food sector. *eFOOD-Lab international*, 4, 20–23, https://www.researchgate.net/publication/321491347_Hydrogen_for_the_food_industry#fullText-FileContent

Suomen Tuulivoimayhdistys (2023). *Tuulivoimahankkeet Suomessa 05/2023*. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 12.05.2023. Noudettu 23.10.2023 osoitteesta https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-06_2023.pdf

Sweco (2023). *Uuden kemianteollisuuden mahdollisuudet Pohjois-Pohjanmaalla P2X-tulokulmasta*. Sweco. <https://www.raahenseudunkehitys.fi/sites/raahenseudunkehitys.fi/files/tiedostot/ajankoh-taista/R4H2%20Uuden%20kemianteollisuuden%20mahdollisuudet%20PohjoisPohjanmaalla%20P2X%20-tulokulmasta.pdf>

Tashie-Lewis, B.C., Nnabuife, S.G. (2021). Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100172, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100172>

Tilastokeskus (2022, 2. marraskuuta). *StatFin. Teollisuuden energiankäyttö. Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain (TOL 2008), 2007–2021*. Tilastokeskus. Noudettu 25.9.2023 osoitteesta https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_tene/statfin_tene_pxt_11wy.px/

Tilastokeskus (2023, 2. lokakuuta). *Toimipaikkalaskuri. Kunnittainen toimipaikkalaskuri*. Tilastokeskus. Noudettu 20.10.2023 osoitteesta https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/Toimipaikkalaskuri/Toimipaikkalaskuri_Toimipaikkalaskuri/

Uusitalo, V. (2021). *Power-to-plastics. Muovit hiilinieluina?* LUT yliopisto. https://lab.fi/sites/default/files/2021-05/Muovit%20hiilinieluina_LUT_Ville%20Uusitalo.pdf

Viessmann (2023). *Teollisuuskattilat. Höyry- ja kuumavesikattilat - ratkaisuja teollisuudelle ja kaupan alalle*. Viessmann. Noudettu 26.9.2023 osoitteesta <https://www.viessmann.fi/fi/ratkaisut/kauppa-ja-teollisuus/teollisuuskattilat.html>

Voutilainen, S. (2017). *Voitako rasvaksi?* Itä-Suomen yliopisto. https://asiakas.kotisivukone.com/files/gpfinland.kotisivukone.com/tiedostot/Luentoslidet_2017/Voutilainen_voitako_rasvaksi.pdf

Woikoski (2021, 27. huhtikuuta). *Successful commissioning of the LOHC storage and release plants at -23 degrees Celsius ambient temperature in the EU project HySTOC in Finland*. Woikoski Oy. Noudettu 11.10.2023 osoitteesta <https://www.woikoski.fi/en/woikoski/news-and-events/news/successful-commissioning-of-the-lohc-storage-and-release-plants-at-23-degrees-celsius-ambient-temperature-in-the-eu-project-hystoc-in-finland.html>

Xu, Z., Zhao, N., Hillmansen, S., Roberts, C., Yan, Y. (2022). Techno-Economic Analysis of Hydrogen Storage Technologies for Railway Engineering: A Review. *Energies*, 15(17), 6467, <https://doi.org/10.3390/en15176467>

Yara (2023, 13. huhtikuuta). *Yara jatkaa ei-sanktioidun ammoniakkin tuontia Venäjältä varmistaakseen saatavuuden*. Yara. Noudettu 12.10.2023 osoitteesta https://www.yara.fi/uutiset-ja-tapahtumat/uutiset/20230413_yara-jatkaa-ammoniakin-tuonnin/

Ylinen, J. (2023, 3. helmikuuta). *Vihreä ammoniakki Suomesta – veden, tuulen ja maan synergiaa*. Elomatic. Noudettu 20.9.2023 osoitteesta <https://www.elomatic.com/fi/top-engineer/vihrea-ammoniikki-suomesta-veden-tuulen-ja-maan-synergiaa/>

Zhang, F., Zhao, P., Niu, M., Maddy, J. (2016). The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 14535–14552, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>

Zhang, L., Allendorf, M.D., Balderas-Xicohténcatl, R., Broom, D.P., Fanourgakis, G.S. ja muut (2022). Fundamentals of hydrogen storage in nanoporous materials. *Prog. Energy*, 4, 042013. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/ac8d44>



Euroopan unionin
osarahoittama



ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO
Regional Council of South Ostrobothnia

