



POWER-TO-X -RATKAISUJEN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Artturi Lindström

Tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Päivi Sikiö

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Artturi Lindström

Power-to-X -ratkaisujen nykytilanne ja tulevaisuudennäkymät

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua, 5 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Päivi Sikiö

Avainsanat: Power-to-X, PtX, Vety, Elektrolyysi, Hiilidioksidin talteenotto

Ilmastonmuutoksen torjumisessa energiasektori on yksi avaintekijöitä. Pariisin ilmastopöytäkirjassa on asetettu tavoitteeksi maapallon keskilämpötilan nousuksi korkeintaan 1,5 °C esiteolliseen aikaan verrattuna. EU on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä ja vastaavasti Suomi vuonna 2035. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla energialähteillä ei riitä siirtymän onnistumiseksi, vaan on myös mahdollistettava raskaan liikenteen ja teollisuuden siirtymä hiilineutraaliksi. Power-to-X -teknologioilla voidaan luoda hiilidioksidipäästöttömiä synteettisiä polttoaineita sekä tasata uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön kysynnän ja tarjonnan vaihteluja varastoimalla energiaa kemialliseen muotoon.

Kandidaatintyössä selvitettiin Power-to-X-ratkaisujen nykytilanne sekä tulevaisuudennäkymät. Työ on kirjallisuuskatsaus aiheeseen ja pohjautuu tutkimuksiin sekä artikkeleihin Power-to-X-teknologiasta. Työssä esitellään käytettyjä Power-to-X-teknologioita sekä mahdollisia lopputuotteita. Tämän lisäksi työssä nostetaan esille muutamia merkittäviä Power-to-X-hankkeita Euroopassa. Tulevaisuudennäkymiä ja potentiaalia käsiteltiin työn loppupuoliskolla.

Power-to-X -projektit ovat suosiossa ja niiden määrä on jatkuvassa kasvussa. Elektrolyysin kehitys ja hiilidioksidipäästörajoitukset ovat avaintekijöitä Power-to-X -prosessin kannattavuudessa. Power-to-X -prosessilla on monia etuja, kuten monikäyttöisyys ja mahdollisuus tasoittaa uusiutuvan energian tuotannon vaihteluja. Useimmat Power-to-X -projektit sijaitsevat Euroopassa, erityisesti Saksassa. Pilottilaitokset ovat jo osoittaneet prosessin kannattavuuden, ja jos niin käy myös tulevaisuudessa, niitä voidaan soveltaa myös muualla Euroopan ulkopuolella. Vetytalouteen siirtyminen on ollut esillä useiden vuosien ajan, mutta siirtymisen ajankohta on vielä epävarmaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Artturi Lindström

Current status and future prospects of Power-to-X -solutions

Bachelor's thesis

2023

30 pages, 5 figures and 3 tables

Examiner: Associate professor Päivi Sikiö

Keywords: Power-to-X, PtX, Hydrogen, Electrolysis, Carbon capture

In the fight against climate change, the energy sector is one of the key factors. The Paris Climate Agreement has set a goal to limit the increase in global average temperature to 1.5°C compared to pre-industrial times. The EU has set a goal to be carbon neutral by 2050, and Finland by 2035. Replacing fossil fuels with renewable energy sources alone is not enough to ensure the transition, but it is also necessary to enable the transition of heavy traffic and industry to carbon neutrality. Through Power-to-X technology carbon-free synthetic fuels can be created and energy can be stored in chemical form to balance the fluctuations in demand and supply of electricity produced by renewable energy.

The bachelor's thesis explored the current state and future prospects of Power-to-X solutions. The work is a literature review on the subject and is based on research and articles on Power-to-X technology. The work introduces the Power-to-X technologies used and the possible end products. In addition, the work highlights some significant Power-to-X projects in Europe. The future prospects and potential were addressed in the latter half of the work.

Power-to-X projects are popular and their number is constantly growing. The development of electrolysis and carbon dioxide emission limits are key factors in the profitability of the Power-to-X process. Power-to-X has many advantages, such as versatility and the ability to smooth out fluctuations in renewable energy production. Most Power-to-X projects are located in Europe, specifically in Germany. Pilot plants have already demonstrated the profitability of the process, and if this continues in the future, they can also be applied outside of Europe. The transition to a hydrogen economy has been on the agenda for several years, but the timing of the transition is still uncertain.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AEL	Alkalielektrolyysi
HTE	Korkealämpöelektrolyysi
n.s.	Ei määritelty
PEM	Polymeerimembraanielektrolyysi
PtM	Power-to-Methane
PtX	Power-to-X
SNG	Synteettinen maakaasu
SOEC	Kiinteäoksidielektrolyysi

Alaindeksit

el	Sähkö
----	-------

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Teknologia.....	7
2.1	Vety.....	8
2.1.1	Veden elektrolyysi.....	8
2.2	Hiilidioksidin talteenotto.....	9
3	Lopputuotteet.....	11
3.1	Power-to-Heat.....	11
3.2	Power-to-Liquids.....	11
3.3	Power-to-Gas.....	12
3.3.1	Vety.....	12
3.3.2	Metaani.....	12
3.4	Power-to-Food.....	13
4	PtX-hankkeet ja pilottilaitokset.....	14
4.1	PtX-hankkeet Euroopassa.....	15
4.1.1	Power-to-X -projektit Saksassa.....	17
4.1.2	Power-to-X -projektit Ranskassa.....	19
4.1.3	Power-to-X -projektit Tanskassa.....	19
4.1.4	Power-to-X -projektit Suomessa.....	21
5	Tulevaisuudennäkymät ja -potentiaali.....	24
6	Johtopäätökset.....	26
	Lähteet.....	27

1 Johdanto

Kestävän kehityksen edistäminen ja ilmastonmuutoksen torjuminen on energiasuunnittelun ja –politiikan pääkohtia. Energiasektorin osuus kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärästä on kaksi kolmasosaa, joten energiasektori on keskeinen osa päästöjen vähentämisessä ja ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. (International Energy Agency 2022.) Ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi on Pariisin ilmastosopimuksessa asetettu tavoitteeksi korkeintaan 1,5 °C maapallon keskilämpötilan nousu esiteolliseen aikaan verrattuna. Tämän lisäksi EU on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä ja vastaavasti Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuonna 2035. (Ulkoministeriö 2022.)

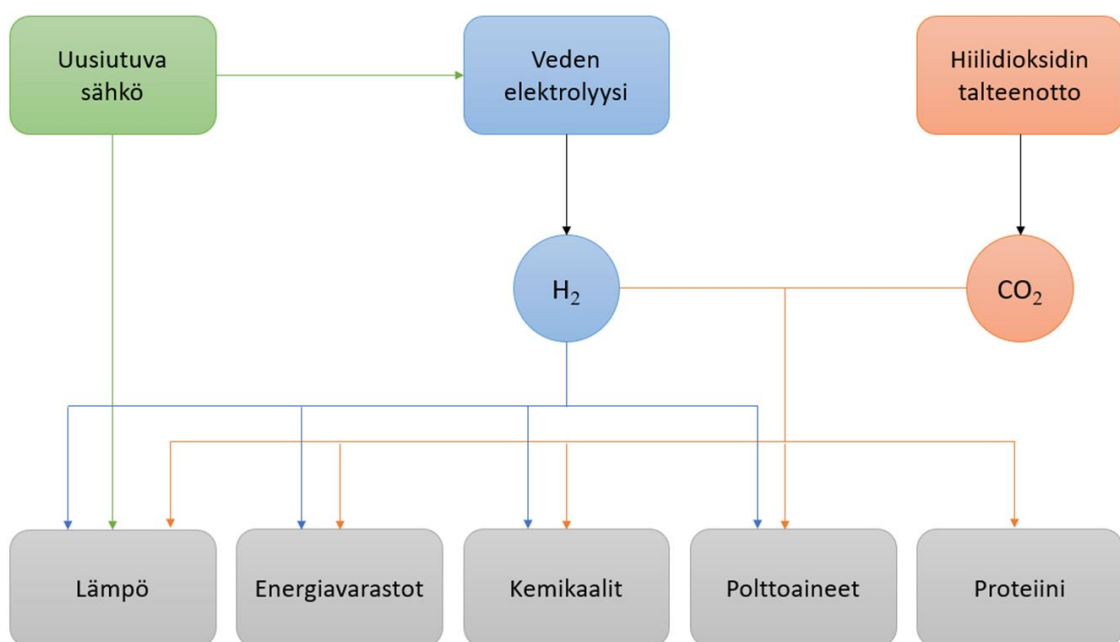
Fossiilisilla polttoaineilla tuotetun energian korvaaminen uusiutuvilla energialähteillä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Uusiutuvan energian tuotanto on kuitenkin herkempi vaihteluille ja sen tuotannon säätäminen vastaamaan kysyntää on haastavampaa kuin fossiilisilla energialähteillä. Uusiutuvan energian tuotannon kasvattamisen lisäksi tarvitaan myös varastointikykyä ja eri energiasektorit yhdistäviä ratkaisuja. Power-to-X (PtX) voi tulevaisuudessa olla osa ratkaisua näihin haasteisiin. (Miehling et al. 2022.) Power-to-X -teknologioilla voidaan luoda hiilidioksidipäästöttömiä synteettisiä polttoaineita sekä tasata uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön kysynnän ja tarjonnan vaihteluja varastoimalla energiaa kemialliseen muotoon.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on kartoittaa tämänhetkistä PtX-hankkeiden tilannetta ja tulevaisuudennäkymiä osana energiajärjestelmää. Työssä esitetään tärkeimmät vaiheet PtX-prosesseista ja mahdolliset lopputuotteet. Tämän lisäksi perehdytään muutamaan toteutuneeseen sekä suunnitteilla olevaan projektiin. Tarkastelussa keskitytään projekteihin Euroopassa ja Suomessa.

2 Teknologia

Tässä luvussa perehdytään Power-to-x-tekniologioiden erilaisiin teknisiin ratkaisuihin. PtX-tekniologioilla tarkoitetaan prosessiketjua, jossa uusiutuvalla energialla tuotettu sähkö muuttetaan muotoon X. Kyseinen X voi olla energian muoto, käyttökohde tai itse tuote. Esimerkiksi Power-to-Methanol –tekniologiassa X kuvastaa yksittäistä tuotetta eli metanolia, Power-to-Liquids –tekniologiassa aineen muotoa eli nestettä ja Power-to-Transport -tekniologiassa kokonaista teollisuuden alaa, jonka käyttötarkoitukseen energia valjastetaan. (Koj et al. 2019.)

Uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä käytetään elektrolyysissä, jossa hajotetaan veden alkuaineiksi: vedyksi (H) ja hapeksi (O). Hiilidioksidia talteen ottamalla saadaan toinen tarvittava osa eli hiili (C). Yhdistämällä hiili- ja vetyatomia luodaan haluttuja hiilivetyjä. Hiilivetyjen lisäksi lopputuotteena voi olla myös lämpö tai kemiallinen energia varastoituna myöhempää käyttötarkoitusta varten. Kuvassa 1 on esitetty PtX-prosessiketjuja. Vihreällä linjalla on kuvattu uusiutuvan sähkön käyttökohteet, sinisellä viivalla elektrolyysistä saadun vedyn käyttökohteita ja oranssilla viivalla prosessissa muodostettujen hiilivetyjen käyttökohteita. Näihin vaiheisiin perehdytään tarkemmin alaluvuissa.



Kuva 1. Mahdollisia PtX-prosessin vaihtoehtoja.

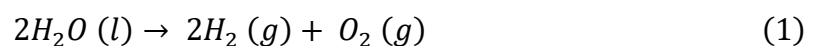
2.1 Vety

Vety H_2 on hyvin kevyt kaasu, mutta sillä on alkuaineista suurin energiatiheys painoon suhteutettuna (142 MJ/kg) lukuun ottamatta ydinpolttoaineita ja antimateriaa. Vety soveltuu sähkön tavalla hyvin energian siirtämiseen. Eri tuotantotavoin luodun vedyn ympäristöystävällisyyttä kuvataan kolmella päävärillä: harmaa, sininen ja vihreä. (Raunila 2022.)

Harmaa vety tuotetaan usein kivihiilellä tai maakaasulla ja näin ollen siitä aiheutuu huomattavasti päästöjä. Sininen vety on kuin harmaa vety, mutta sen tuotannon yhteydessä hyödynnetään hiilidioksidin talteenottoa tai varastointia. Vihreä vety voidaan tuottaa ainoastaan uusiutuvalla energialla ja näin ollen se on näistä vaihtoehdoista ympäristöystävällisin. Vihreässä vedyssä ei kuitenkaan huomioida kasvihuonekaasuja tuotantoprosessin, osajärjestelmien tai käytettyjen laitteiden elinkaaren aikana. (Raunila 2022.)

2.1.1 Veden elektrolyysi

Veden elektrolyysi on sähkökemiallinen prosessi, jossa vesi palautetaan sen alkuaineiksi vedyksi ja hapeksi. Prosessi ei tapahdu spontaanisti, vaan vaati ulkoista energiaa. Tämä toteutetaan käyttämällä uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä. Veden täydellinen elektrolyysi on kuvattu yhtälössä 1.



, jossa H_2O on vesi, H_2 on vetykaasu ja O_2 on happikaasu.

Elektrolyysissä käytettävä vesi ei voi sisältää epäpuhtauksia. Tämän takia hanavesi ei sovellu tähän käyttötarkoitukseen, vaan sen sijaan usein käytetäänkin de-ionisoitua vettä. (Larjava 2022.)

Veden elektrolyysi suoritetaan elektrolyysikennossa, jossa on kaksi johtavaa metallielektroodia, anodi ja katodi, sekä elektrolyytti, joka erottaa nämä metallielektrodit. Elektrolyysikennoja asennetaan usein rinnakkain muodostaen elektrolyysipinoja tuotantokapasiteetin kasvattamiseksi. Veden elektrolyysin toteuttamiseksi on tällä hetkellä kolme pääteknologiaa, jotka eroavat hieman toimintatavaltaan. Nämä ovat alkalielektrolyysi (AEL), polymeerimembraanielektrolyysi (PEM) ja kiinteäoksidgelektrolyysi (SOEC). (Decourt 2019.)

Alkalielektrolyysi on veden elektrolyyseistä kehittynein ja tällä hetkellä edullisin vaihtoehto suurien määrien toteuttamiseksi. AEL-menetelmässä elektrolyytinä käytetään 25–30 % kaliumhydroksidivesiliuosta. Kuivauksen jälkeen vetykaasun puhtaudeksi saadaan tyypillisesti 99,5–99,9 % ja happikaasun 99–99,8 %. (Raunila 2022, 27.) Prosessin joustavuudessa ja reaktiivisuudessa on vielä paranneltavaa, mutta kehitystä on tapahtunut sietämään PtX:n aiheuttamaa kuormituksen vaihtelua. AEL-menetelmän rajoitteena on käyttöpaine, sillä se toimii huoneenlämpötilassa, jolloin prosessihyötysuhdetta ei voida kasvattaa painetta lisäämällä. Tämän lisäksi prosessi vaatii tasaisesti virtaavan sähkötulon. (Koj et al. 2019.)

Polymeerimembraanielektrolyysi perustuu protonien (H⁺) vaihtoon elektrolyysikalvon lävitse. Anodissa vesi hapettuu happikaasuksi O₂ ja luovuttaa protonin elektrolyysikalvon lävitse katodille, jossa muodostuu vetykaasua H₂. Vetykaasun puhtaudeksi saadaan kuivauksen jälkeen jopa yli 99,99 %. (Raunila 2022.) PEM-menetelmää ei ole kehitetty yhtä kauan kuin AEL-menetelmää, mutta sen etuja ovat prosessin joustavuus ja parempi paineenalaisuus. Sen tuotanto on kohdennettu kompakteihin ja modulaarisiin yksiköihin. (Koj et al. 2019.)

Kiinteäoksidielektrolyysi on korkealämpöelektrolyysi (HTE). Siinä voidaan käyttää korkeita lämpötiloja ja hyödyntää osa hukkalämmöstä lisäämättä sähkön kulutusta. Tämän ansiosta päästään käytännössä jopa 90 % hyötysuhteisiin. Hiilidioksidin ja höyryn yhteis-elektrolyysillä pystytään tuottamaan SOEC-menetelmässä vetyä ja hiilimonoksidia (CO) sisältävää synteetikaasua. SOEC kennojen opeointilämpötila on 700–900 °C, mikä aiheuttaa kestävyysongelmia komponentteihin. Tämän johdosta se ei ole vielä valmis kaupallistettavaksi. (Raunila, 2022.) SOEC-menetelmä on tällä hetkelle vähiten kehitetyin ja kallein tapa, mutta usein mielletään, että sillä on tulevaisuudessa suurin potentiaali hyötysuhteen kannalta (Koj et al. 2019).

2.2 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidi (CO₂) on hapen ja hiilen muodostama kemiallinen yhdiste. Ilmakehässä sitä esiintyy luonnollisesti pieniä määriä ja se on yksi kasvihuoneilmiötä edistävästä yhdisteistä. Tällä hetkellä hiilidioksidin osuus ilmakehässä on 412,5 ppm eli n. 0,04 %. Elintarviketeollisuudessa hiilidioksidia käytetään tuotteiden jäähdtykseen sekä pakkauskaasuina. Myös virvoitusjuomat hapotetaan hyödyntäen hiilidioksidia. (Mankonen et al. 2022.)

Hiilidioksidin talteenotto teollisuuden prosessien sivuvirroista on taloudellisesti kalliimpaa kuin fossiilisista lähteistä, mutta välttämätöntä päästövähennyksien saavuttamiseksi. Hiilidioksidin talteenotto on prosessi, jossa hiilidioksidia sidotaan ilmakehästä tai erilaisista prosesseista samalla vähentäen hiilidioksidipäästöjä. Mahdollisia hiilidioksidin lähteitä ovat muun muassa fossiilista polttoainetta käyttävät voimalaitokset, biokaasu- ja biomassavoimalat, teolliset prosessit kuten sementin valmistus ja jätteenpolttolaitokset. Erilaiset hiilidioksidin lähteet vaativat erilaisia erotusmenetelmiä ja näin ollen myös prosessin tehokkuus ja hyötysuhde vaihtelevat hiilidioksidin lähteen mukaan. (Koj et al. 2019.) Hiilidioksidin talteenoton kannattavuus kasvaa hiilidioksidin konsentraation kasvaessa. Näin ollen savukaasuista on kannattavampaa sitoa hiilidioksidia kuin ilmakehästä. (Mankonen et al. 2022.)

Hiilidioksidin talteenotto perustuu nesteiden sitomiskykyyn. Hiilidioksidi sidotaan nesteeseen tuomalla se oikeaan lämpötilaan ja paineeseen. Hiilidioksidipitoinen neste asetetaan matalampaan paineeseen, jolloin hiilidioksidi vuorostaan vapautuu ja siirtyy hyödynnettäväksi. Prosessi, jossa neste vuorotellen sitoo ja vapauttaa hiilidioksidia kuluttaa energiaa, sillä neste joudutaan kierrättämään, paineistamaan ja lämmittämään. (Mankonen et al. 2022.)

Polttoprosesseista talteenotettu hiilidioksidi sisältää aina epäpuhtauksia, kuten vettä ja inerttejä kaasuja. Myös rikkiyhdisteitä, happea ja typenoksidgeja voi olla seostuneena talteenotetussa kaasussa. Hiilidioksidin kuljetukselle ja varastoinnille ei ole asetettu yleispäteviä vaatimuksia toistaiseksi. (Teir et al 2011.)

3 Lopputuotteet

Power-to-X-teknologioissa X kuvastaa prosessiketjun lopputuotetta, käyttötarkoitusta tai aineen muotoa, joksi energia muutetaan. Esimerkiksi Power-to-Methanol –teknologiassa X kuvastaa yksittäistä tuotetta eli metanolia, Power-to-Liquids –teknologiassa aineen muotoa eli nestettä ja Power-to-Transport -teknologiassa kokonaista teollisuuden alaa, jonka käyttötarkoitukseen energia valjastetaan. Myös Power-to-Power on mahdollinen prosessiketju, jossa energia muunnetaan kemialliseksi energiaksi ja käytetään sähkönä haluttuna ajankohdana. (Koj et al. 2019.) Tässä luvussa perehdytään tarkemmin lopputuotteiden valmistukseen ja käyttötarkoituksiin.

3.1 Power-to-Heat

Power-to-Heat prosessi tuottaa sähköstä lämpöenergiaa. Lämpöenergia voidaan käyttää yksityisten ihmisten käyttöön kuten omakotitalojen kaukolämmöksi tai teollisuuden hyödynnettäväksi. Teollisuudessa käytetään lämpöpumppuja ja sähkökattiloita lämpöenergian tuottamiseksi sähköstä. Lämpöpumppujen etuja sähkökattiloihin nähden on niiden kyky tuottaa lämpöenergiaa matalasta lämpötilasta sekä pienempi sähkön kulutus. (Koj et al. 2019.)

3.2 Power-to-Liquids

Power-to-Liquids prosessissa lopputuote on nestemäisessä muodossa. Nestemäiset lopputuotteet ovat pääasiassa kemikaaleja tai liikenteen polttoaineita. PtX-teknologialla tuotettua metanolia voidaan käyttää sellaisenaan tai jatkojalostaa polttoaineeksi esimerkiksi lentopetroliksi tai dieselpolttoaineen korvikkeeksi dimetyylieetteriksi. (Koj et al. 2019.) Metanolia käytetään polttoaineiden lisäksi muun muassa kemikaalien, etikkahapon ja erilaisten muovien valmistamiseen (Turunen 2022,18). Metanoli nestemäisenä tuotteena on helpompi käsiteltävä kuin kiinteät ja kaasumaiset aineet, joten se soveltuu hyvin myös siirrettäväksi energiavarastoksi (Rego de Vasconcelos 2019).

Muunnosprosesseina voidaan käyttää joko Fischer-Tropsch prosessia tai metanolisynteesiä (Koj et al. 2019). Metanolisynteesin ja Fischer-Tropsch prosessien eroina ovat käytetty katalyytti, lämpötila ja paine (Mankonen et al. 2022).

3.3 Power-to-Gas

Power- to-Gas-prosessissa lopputuote on kaasumaisessa olomuodossa. Tyypillisiä kaasumaisia lopputuotteita ovat vety ja metaani.

3.3.1 Vety

Vety on pääelementti useimpien PtX lopputuotteiden valmistamiseksi, mutta sitä voidaan hyödyntää myös itsessään. Vetyä voidaan käyttää polttoaineena liikenteessä sekä voimalaitoksissa. Myös terästeollisuudessa raudan pelkistämisessä fossiilinen hiili voidaan korvata vedyllä, jolloin hiilidioksidin sijasta syntyy sivutuotteena vettä. (Mankonen et al. 2022, 16.)

Vety voisi tulevaisuudessa toimia energiavarastona akkujen sijasta. Vedyn varastointi on tällä hetkellä kuitenkin haasteellista. Huoneenlämpöinen ja normaalipaineinen vety on tilavuudeltaan liian suurta säiliöihin taloudellisesti varastoitavaksi. Toisaalta paineistettuun vetyyn liittyy räjähdysriski ja vedyn kryogeeninen (kylmätekkinen) nesteyttäminen on mahdollista, mutta vaatii kallista tekniikkaa. (Mankonen et al. 2022, 16.)

Suomen valtion omistama Gasgrid Finland Oy suunnittelee kansainvälisen vetyverkon rakentamista Suomeen vedyn ja kaasumaisten vetyjohdanteiden siirtoa varten. Vetyverkko keskittyy länsirannikolle tuulivoiman äärelle sekä Etelä- ja Kaakkois-Suomeen, missä on jo ennestään vahva maakaasuverkko. Ensimmäinen pilottikohde on 15 km putki Kemiran lannoitetehtaalta Ovakon terästehtaalle Imatralla. (Roslander 2022.)

3.3.2 Metaani

Power-to-Methane (PtM) -prosessiketjussa vety ja hiilidioksidi muuntuvat metanointireaktiossa metaani- ja vesihöyryksi. Metanoinnille on kaksi pääkeinoa, termokemiallinen ja

biologinen metanointi. Termokemiallisen metanoinnin hyötysuhde on 70–85 % ja biologisella metanoinnilla saadaan hieman parempi hyötysuhde, joka on 75–98 %. Termokemialliselle metanoinnille löytyy jo demonstraatiolaitoksia, kun taas biologinen metanointi on vähemmän kehitettyä. Termokemiallisen metanoinnin sivutuotteena syntyy lämpöä, joka voidaan myös haluttaessa käyttää hyödyksi. (Koj et al. 2019.)

Niin kutsuttu synteettinen maakaasu (SNG) tuotetaan puhdistamalla metanoinnin reaktiotuotteista. SNG on tuotteena hyvin puhdas, joten se voidaan suoraan syöttää maakaasuverkostoon, varastoida tai käyttää maakaasua hyödyntävissä laitoksissa. PtM-demonstraatiolaitoksia on jo toiminnassa useissa maissa. (Rego de Vasconcelos 2019.)

3.4 Power-to-Food

PtX prosessilla voidaan tehdä jopa ruokaa. Suomalainen start-up Solar Foods on kehittänyt metodin, jolla se luo korkeasti proteiinipitoisen ainesosan käyttämällä sähköä, hiilidioksidia, vettä ja patentoitua organismia. Valmistusmetodia voi verrata kotiviinin tekemiseen. Sokerin sijaan bakteeri syö hiilidioksidia ja vetyä kasvaakseen ja lisääntyäkseen. Prosessiin vaadittava typpi saadaan ammoniakista, joka saadaan tehtyä ilmasta. Prosessissa syntyy vettä jatkuvasti, joka poistamalla saadaan kuivatettua tuote jauhoksi. Tuotetta kutsutaan Soleiniksi. (Food Navigator 2019.)

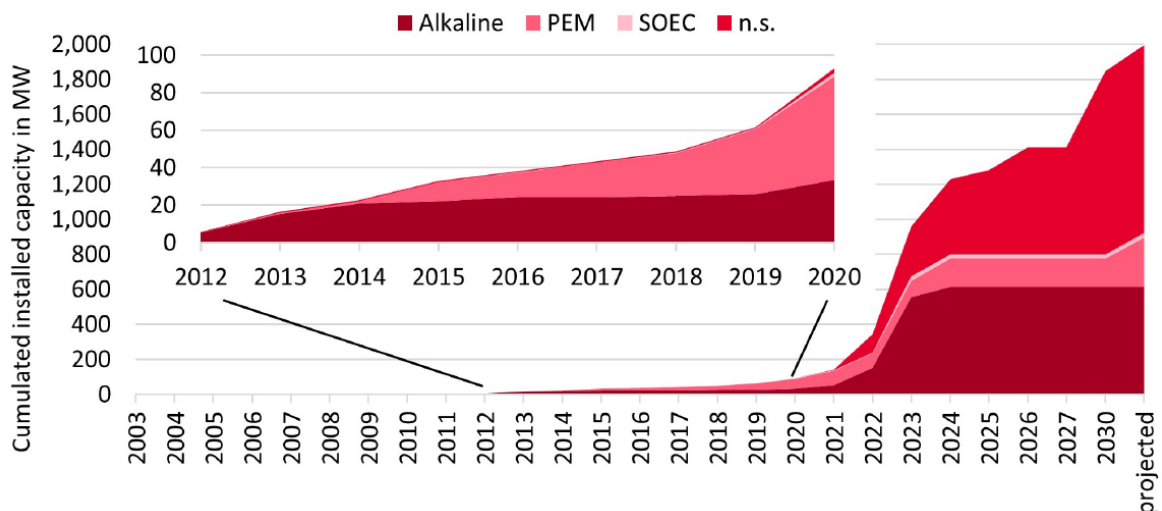
Soleinia voidaan lisätä tavallisiin ruokiin kuten leipään, pastaan, jogurttiin ja valmisruokiin kasvattamaan ruuan proteiinipitoisuutta. Solar Foods:in mukaan Solein on vastaaviin eläin- ja kasvipäisiin proteiineihin nähden 100 kertaa ympäristöystävällisempää säästäen sekä vettä että tuotantoon vaadittavaa maa-aluetta. Sen valmistus on myös turvattu sääolosuhteilta. Tällä hetkellä Solar Foods pystyy tuottamaan yhden kilogramman Soleinia päivässä pilottilaitoksellaan. (Food Navigator 2019.)

4 PtX-hankkeet ja pilottilaitokset

Tässä luvussa käsitellään PtX-hankkeita ja -laitoksia, jotka ovat joko jo käytössä tai vasta suunnitteilla. Hankkeista keskitymme pääasiassa vedyn ja metanolin tuotantoon tähtääviin laitoksiin.

Aiemmin PtX-hankkeita kohdennettiin polttoaineen tuotantoon, esimerkiksi vetybusseihin, sähkön ja lämmön yhteistuotantoon ja sitten maakaasuverkkoon yhdistämiseen. Nykypäivän teolliset sovellukset nähdään polttoaineen tuotannon rinnalla tärkeimpinä kohteina. Synteettiset kaasumaiset polttoaineet ovat painopisteenä, kun taas nestemäisten polttoaineiden tuotanto on vähäisempää. (Wulf et al. 2020.)

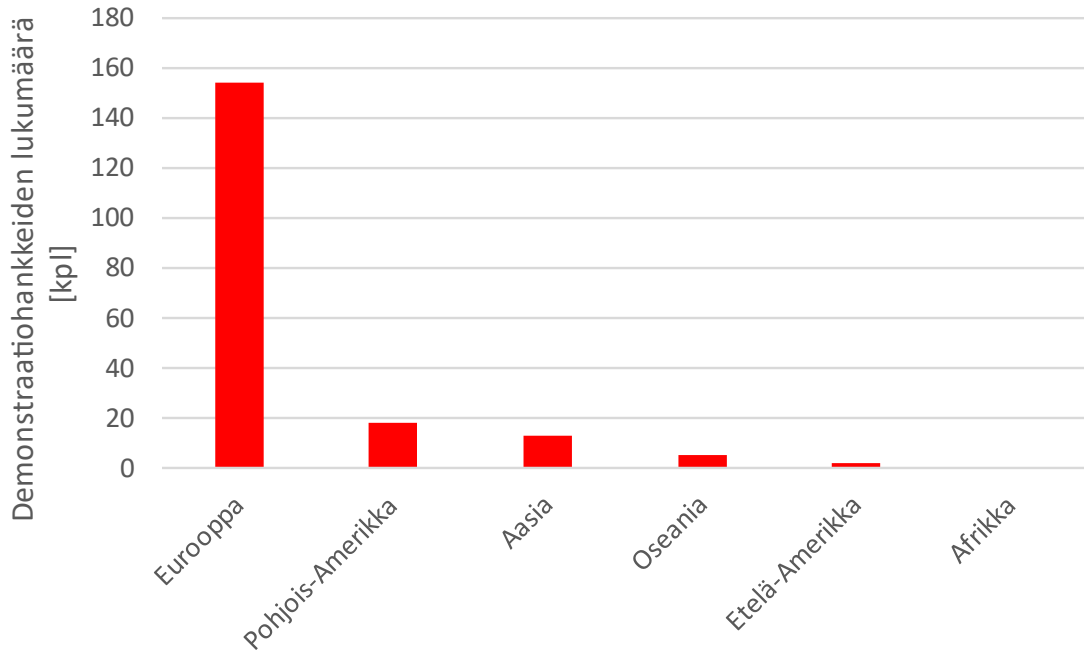
Kuvassa 2 on esitetty kumulatiivisesti asennettu kapasiteetti elektrolyysimenetelmän mukaan. Kiinteäoksidi-elektrolysaattorikennojen (SOEC) osuus hankkeista on hyvin pieni verrattuna polymeerielektrolyyttikennoihin (PEM) ja alkali-elektrolyysikennoihin (AEL). SOEC-menetelmän asennuskapasiteetin voi nähdä hyvin ohuena vaaleana viivana kuvassa. Kuvassa 2 n.s. kuvaa kapasiteettia, jonka elektrolyysimenetelmää ei ole määritetty.



Kuva 2. Kumulatiivinen asennettu kapasiteetti elektrolyysimenetelmän mukaan (Wulf et al. 2020).

PtX-demonstraatiohankkeiden maantieteellinen jakautuminen on esitetty kuvassa 3. PtX-hankkeita esiintyy laajalla alueella, mutta tällä hetkellä suurin osa projekteista sijoittuu

Eurooppaan. Hankkeiden painottumisen johdosta tarkastelemme tässä työssä lähemmin vain Eurooppaan sijoittuvia projekteja.

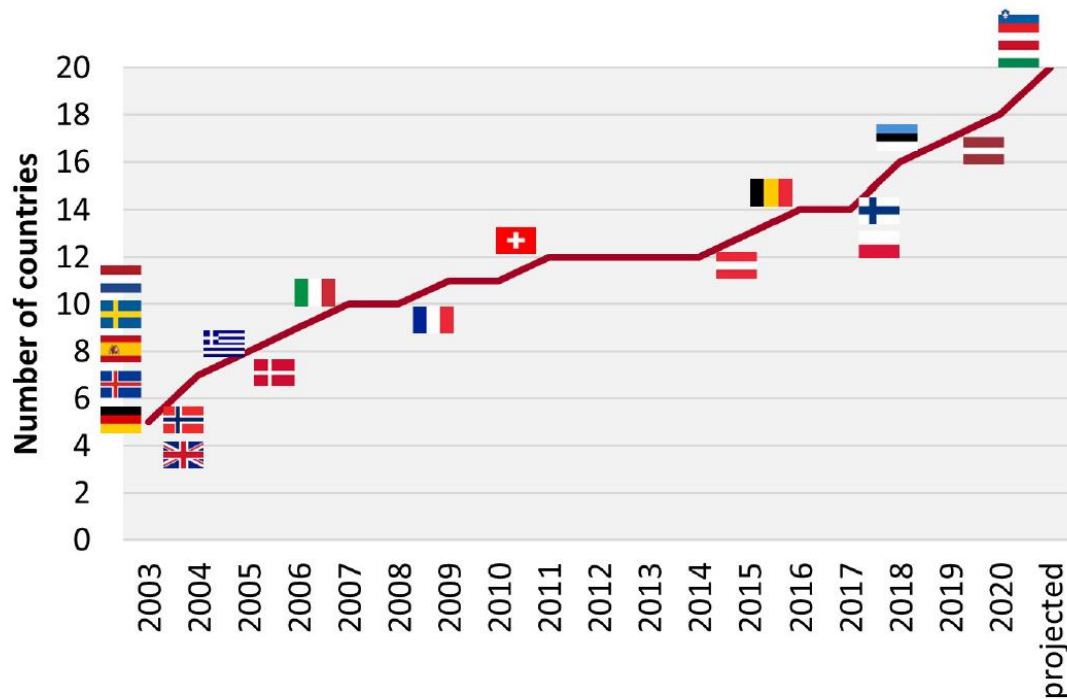


Kuva 3. PtX demonstraatiohankkeiden maantieteellinen jakautuminen vuoteen 2019 mennessä (Chehade et al. 2019, 27646).

4.1 PtX-hankkeet Euroopassa

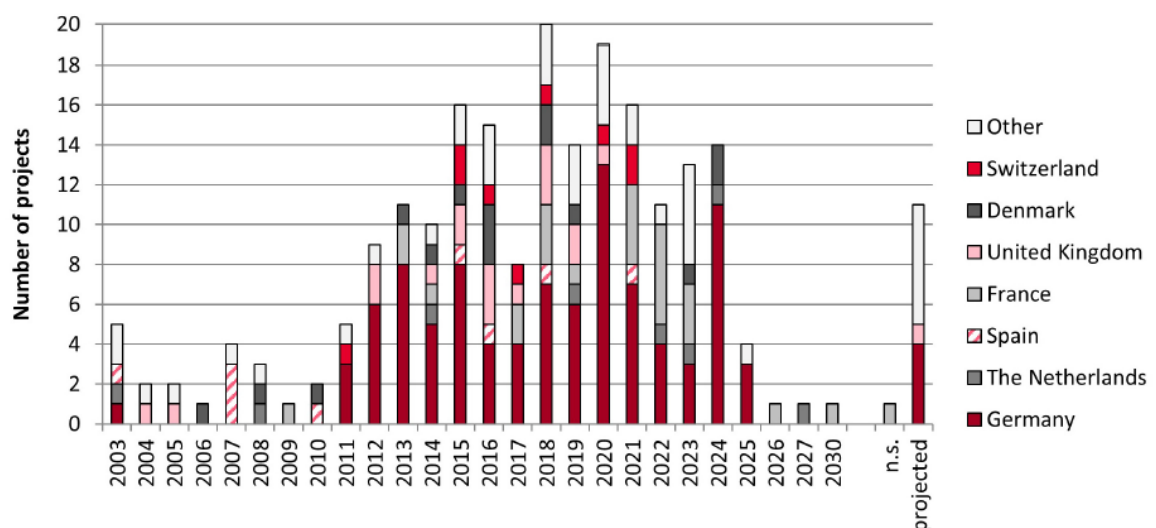
Kesäkuussa 2020 Euroopassa oli yhteensä 220 PtX-tutkimus- ja demonstroitihanketta joko toteutunut, valmistunut tai parhaillaan suunnitteilla. Pääpaino hankkeiden sijoittumisessa oli Saksassa ja Ranskassa, jotka ovat Euroopassa panostaneet PtX-hankkeisiin muita valtioita enemmän. Saksan osuus kaikista Euroopassa olevista PtX-hankkeista on jopa 44%. (Wulf et al. 2020.)

Kuvassa 4 on esitetty Euroopan valtioissa olevista PtX-projekteista vuosittain ja arvioitu vuoden 2020 jälkeen osallistuvat valtiot. Vuoden 2003 jälkeen PtX-projekteja on alkanut useassa Euroopan valtioissa lähes vuosittain ja sama trendi on jatkunut.



Kuva 4. Power-to-X-projekteissa mukana olevien Euroopan valtioiden lukumäärän kehitys (Wulf et al. 2020).

Kuvassa 5 on esitetty Euroopassa alkavien PtX-projektien jakautuminen vuosittain sekä valtio, jossa projekti toteutetaan. Kuvassa n.s. kohdassa olevien projektien aloitusvuotta ei ole määritelty ja projected kohdassa olevat ovat ennustettuja projekteja. 2010-luvulle tultaessa alkavien projektien lukumäärä on moninkertaistunut. Lukumäärissä on havaittavissa pienimuotoista syklimäisyyttä muutaman vuoden välein.



Kuva 5. Alkavien Power-to-X-projektien lukumäärä Euroopassa vuosittain (Wulf et al. 2020).

Kuvasta 5 ilmenee Saksan vahva edustus uusien PtX-hankkeiden parissa. Tämän lisäksi Ranska ja Tanska ovat huomionarvoisia useiden hankkeiden johdosta.

4.1.1 Power-to-X -projektit Saksassa

Vuodesta 2011 lähtien Saksa on aloittanut 4 uutta projektia joka vuosi ja jopa 13 uutta projektia vuonna 2020. Vuosien 2021 ja 2025 välillä Saksaan on suunniteltu 494 MW elektrolyysikapasiteetin asennusta. (Wulf et al. 2020.) Tässä kappaleessa esitellään viisi Saksan valtion tukemaa PtX-hanketta. Hankkeet ovat valittu suurimman tukisumman johdosta. Taulukossa 1 on esitetty projektien sijainti, koordinaattori, lopputuote, rahoitussumma (milj euroa) ja aloitus- sekä päätösvuosi.

Taulukko 1. Viisi suurinta Saksan valtion rahoittamaa Power-to-X -hanketta (Kopernikus Projekte 2022).

Projekti	Koordinaattori	Lopputuote	Rahoitussumma milj. euroa	Projektin aloitus	Projektin päättös
Carbon2Chem	Thyssenkrupp	Kemikaalit	144,00	2016	2025
HYPOS	Geschäftsstelle HYPOS	Vety	45,00	2017	
WindNODE	50Hertz Transmission GmbH	Lämpö	37,00	2017	2020
Methquest	MTU and Rolls-Royce Power Systems and KIT-DVGW	Metaani	32,00	2018	2021
Kopernikus P2X Phase II	DECHEMA and RWTH Aachen and FZJ	Vety, synteesi-kaasu ja polttoaineet	29,70	2019	2022

Saksan valtio on rahoittanut Carbon2Chem hanketta 144 miljoonalla eurolla. Hankkeessa teräksen tuotannon päästöjä käytetään kemikaali tuotannon raaka-aineina. Teräksen tuotannossa vapautuu kaasuja, jotka sisältävät vetyä sekä hiilidioksidia. Talteenotettuina ne voidaan jalostaa kemianteollisuuden tuotteiksi. Vetyä tuotetaan tämän lisäksi elektrolyysillä vastaaman tarvetta. Kaasut sisältävät myös typpeä, joka mahdollistaa ammoniakkin tuotannon. Konseptia voidaan soveltaa teollisessa mittakaavassa arviolta 15 vuoden päästä. (FONA 2023.)

HYPOS on konsortio, jonka tavoitteena on luoda valtakunnallinen vihreä vetytalous Keski-Saksan vetyalueelle. Pyrkimyksenä on kehittää yksittäisiä teknologioita ja edistää uuden kehittämistä. Yksittäisten innovaatioiden summan tulisi kehittää laajamittaisesti fossiilisesti polttoaineista siirtymistä vetytalouteen. Konsortiossa on yli 150 jäsentä ja se toimii yhteishankkeiden rahoituksen lisäksi foorumina vihreän vedyn tiedon jakamiselle. Saksan valtio on rahoittanut projektia 45 miljoonalla eurolla. (HYPOS 2023.)

WindNODE-hankkeen tavoitteena on kattaa energian ja sähkön tarve mahdollisimman kattavasti uusiutuvista energialähteistä. Hankkeessa etsitään ratkaisuja uusiutuvan sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen ja kehitetään malliratkaisuja älykkääseen energiajärjestelmään. Siirto- ja jakeluverkoilla on ylikuormitusriski uusiutuvan sähkön tuotannon ylittäessä kysynnän. Tuotannon vähentämisen sijaan hanke etsii ratkaisuja hyödyntää tuotettu sähkö kyseisellä hetkellä. Erityisesti lämmön tuotannon siirtyminen fossiilisista polttoaineista hiilidioksidipäästöttömiin on tarkastelun alla. Mallialueena käytetään Koillis-Saksaa ja Saksan valtio on rahoittanut hanketta 37 miljoonalla eurolla. (WindNODE 2021.)

MethQuest-hankkeessa pyritään tuottamaan Power-to-Methane -menetelmällä uusiutuvaa metaania pääasiassa liikenteen ja CHP-laitoksien käyttöön. Synteettisellä metaanilla voitaisiin korvata asteittain fossiilinen metaani ilman suoraa siirtymistä polttoaineesta toiseen. Toisena tutkimuksen kohteena on synteettisen metaanin käyttöönoton vaikutus koko Saksan energiajärjestelmään tarvittavan infrastruktuurin, kustannusten ja ympäristövaikutusten osalta. Saksan valtio on rahoittanut projektia 19 miljoonalla eurolla ja kokonaisbudjetti on 32 miljoonaa euroa. (MethQuest 2023.)

Kopernikus P2X Phase II on Saksan valtion rahoittaman PtX-tutkimusprojektin toinen vaihe. Saksan valtio on rahoittanut projektia 29,7 miljoonalla eurolla. Projektin toisessa vaiheessa tutkitaan vedyn ja synteetikaasun tuotantoa. Vedyn tuotannossa perehdytään elektrolyysiin vaadittavan harvinaisen ja kalliin iridium-metallin käytön vähentämiseen, vetytankkausasemien optimaaliseen toimintaan ja vedyn siirron aiheuttamiin haasteisiin. Lisäksi tutkitaan synteetikaasun optimointia liikenteen käyttöön sekä kosmetiikkateollisuuden raaka-aineeksi. (Kopernikus Projekte 2022.)

4.1.2 Power-to-X -projektit Ranskassa

Ranskalla on huomattava rooli PtX-teknologioiden kehittämisessä. Vuosien 2021 ja 2025 välillä on Ranskaan suunniteltu 514 MW:n elektrolyysikapasiteetin asennusta, joista 500 MW rakennuttajana toimii H2V. (Wulf et al. 2020.)

H2V investoi, kehittää ja rakennuttaa suurikokoisia vihreän vedyn tuotantolaitoksia vähentämään hiilidioksidipäästöjä erityisesti teollisuuden ja raskaan liikenteen osalta. Yhtiö on rakennuttamassa kuutta uutta vihreän vedyn laitosta Ranskaan ja lisäksi kuusi laitosta on suunnitteilla. Rakenteilla olevat laitokset ovat esitetty taulukossa 2. Laitokset perustuvat 100 MW tuotantoyksiköille, joiden lukumäärää lisäämällä kasvatetaan laitosten tehoa. Tuotantolaitokset on sijoitettu teollisuuden ja raskaan liikenteen solmukohtille kuten satamien, lentokenttien ja teollisuusalueiden lähetyville mahdollistaen vedyn käytön lähellä tuotantoaluetta. (H2V 2022.)

Taulukko 2. H2V rakennuttajan rakenteilla olevat vihreän vedyn laitokset (H2V 2022).

Sijainti	Projekti	Teho [MW]	Vedyn tuotanto vuodessa [t]	Investointi milj. euroa	Projektin aloitus	Valmistumisvuosi
Fos-sur-Mer	H2V Fos	600	84	700–750	2021	2027–2032
Valenciennes	H2V Valenciennes	400	56	500–550	2022	2028–2031
Thionville	H2V Thionville	400	56	500–550	2021	2027–2030
Vigneux-sur-Seine	H2V Vigneux	300	42	400–450	2021	2028–2032
Dunkirk	H2V 59	200	28	230–250	2018	2024–2027
Saint-Sulpice La Pointe	H2V Portes du Tarn	100	14	160	2022	2028

4.1.3 Power-to-X -projektit Tanskassa

Tanskan valtio on vuonna 2019 myöntänyt 17,1 miljoonan euron tukirahoituksen uusituvan energian varastoinnin ja PtX-teknologioiden kehittämiseen. Tukiraha on kohdennettu kahteen projektiin, joiden on tarkoitus rahoittaa oma toiminta markkinoiden tukirahoituksen päätyttyä. Hankeavustukset ovat osa Tanskan tavoitetta vähentää hiilidioksidipäästöjään 70

% vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 hiilidioksidipäästötasoihin verrattuna. Hankkeet pyritään toteuttamaan niin, että niitä voidaan soveltaa myös muualla maailmassa.

GreenLab Skive Power-to-X on ensimmäinen näistä hankkeista. Hankkeen tarkoituksena on rakentaa kaupallinen laajamittainen laitos vihreän vedyn tuotantoon ja varastointiin. Vety on tarkoitus osaksi jalostaa metanoliksi liikennesektorin käyttöön ja osittain käyttää suoraan vihreänä päästöttömänä polttoaineena raskaan liikenteen kuljetuksiin. Laitoksessa on 12 MW elektrolyysilaitos, jossa on 1,6 MWh akkuvarasto. Elektrolyysilaitos saa voimansa paikallisesta pian perustettavasta 75 MW energiapuistosta, jossa sähkö tuotetaan tuuli- ja aurinkoenergialla. Hankekonsortio koostuu useista tanskalaisista energia-alan yrityksistä. (State of Green 2019.)

HySynergy on toinen Tanskan tuetuista vetyhankkeista. Hankkeen tarkoituksena on rakentaa ensimmäinen vaihe laajamittaisesta laitoksesta vihreän vedyn tuotantoa ja varastointia varten. Samalla se voi luoda päästöttömän vihreän vedyn kilpailukykyiseksi polttoaineeksi raskaalle liikenteelle. Laitoksen ydin on ”vetytehdas”, joka perustuu 20 MW_{el} elektrolyysilaitokseen ja 500 MWh:n vetyvarastoon. Elektrolyysilaitos saa voimansa sertifioidulla vihreällä sähköllä ja tuotettu vety myydään teollisuuden käyttöön ja osittain raskaan liikenteen kuljetuksiin korkeapaineisen vetyvaraston kautta. Lisäksi sivuvirrat kuten elektrolyysistä syntyvä happi hyödynnetään teollisiin tarkoituksiin ja prosessissa syntyvä lämpö ohjataan kaukolämmöksi. (State of Green 2019.)

Vuonna 2021 Tanskan valtio julkaisi uuden kansallisen PtX-strategiansa. Tässä tarjotaan 125 miljoonaa euroa 10 vuoden aikana PtX-projekteihin ja uusiutuvan vedyn tuotannon tukemiseen, sääntelykehyksen luomisen kansallisille vetymarkkinoille ja säännösten uudistamiseen vedyn kuljetusinfrastruktuurin käytön ja omistuksen mahdollistamiseksi kansallisille kaasunjakelijoille ja helpotusten luomiseen PtX-laitosten kannattavuuden edistämiseksi. Elektrolyysin kapasiteettitavoitteeksi asetettiin 4–6 GW asennettuna vuoteen 2030 mennessä. Vihreiden polttoaineiden ja vedyn vienti Tanskasta toteutuu yhdistämällä Tanskan infrastruktuuri suunniteltuihin EU:n vetyputkiin ja tarjoamalla runsaasti tukea tanskalaisille toimitusketjuyrityksille. (Ammonia Energy Association 2022.)

4.1.4 Power-to-X -projektit Suomessa

Suomessa on tällä hetkellä useampi PtX-hanke suunnitteilla ja tekeillä. Tähän kappaleeseen on kerätty muutamia ajankohtaisimpia hankkeita tällä hetkellä. Hankkeet on esitetty kootusti taulukossa 3.

Taulukko 3. Suomessa olevia PtX -hankkeita

Sijainti	Koordinaattori	Lopputuote	Kapasiteetti [MW]	Huomioitavaa
Vaasa	EPV Energia	Sähkö ja lämpö	-	Lämpö kalliolämpövarastoon
Joensuu	P2X Solutions & Savon Voima	Vety ja lämpö	30–50	Voidaan tuottaa 15–20 % Joensuun kaukolämmön tarpeesta
Lappeenranta	ST1 & LUT Yliopisto	Metanoli	-	Hyödynnetään sementtitehtaan hiilidioksidipäästöjä
Kotka	Kotkan Energia & Nordic Ren-Gas Oy	Synteettinen kaasu	40	Hiilidioksidi hyötyvoimalaitoksen savukaasuista
Harjavalta	P2X Solutions	Vety ja metaani	20	Sivuvirtoina syntyvä happi ja lämpö voidaan hyödyntää teollisuuden prosesseissa
Vantaa	Vantaan Energia & Wärtsilä	Synteettinen kaasu ja lämpö	10	Sivuvirtana syntyvä lämpö voidaan hyödyntää Vantaan lämmityksessä

Taulukosta 3 voidaan havaita Suomessa olevien PtX-hankkeiden monipuolinen maantieteellinen jakautuminen. Hankkeissa on useita eri lopputuotteita, mikä osoittaa PtX-prosessin monipuolisuuden. Suomessa on käynnissä jo useita hankkeita, mutta kokoluokaltaan ne ovat kuitenkin melko pieniä verrattuna suurimpiin Euroopassa oleviin PtX-hankkeisiin.

EPV Energialla on suunnitteilla Power-to-X-to-Power -vetyhanke Vaasaan yhdessä vaasalaistoimijoiden kanssa. Tavoitteena on tuottaa tuulienergialla tuotetusta sähköstä vetyä ja vedystä sähköä. Tuulivoimatuotannon ylittäessä kysynnän energia varastoidaan vedyksi ja muutetaan takaisin sähköksi sopivampana kysynnän hetkellä. Vedyn- ja energiantuotannossa syntyvä lämpö integroidaan alueen olemassa olevaan kalliolämpövarastoon. Työ- ja

elinkeinoministeriö on myöntänyt hankkeelle loppuvuodesta 2021 14 miljoonaa euroa investointitukea. (EPV Energia 2022.)

P2X Solutions ja Savon Voima selvittävät vihreän vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantolaitoksen mahdollisuutta Joensuuhun. Laitoksen suunniteltu kapasiteetti vihreän vedyn tuotolle on 30–50 MW. Tämän lisäksi hukkalämmöllä toteutettaisiin 15–20 % Joensuun kaukolämmön tarpeesta. (P2X Solutions 2022.)

Lappeenrantaan suunnitellaan Power-to-Methanol -laitosta ST1:n ja LUT Yliopiston yhteistyön tuloksena. Työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt laitokselle 35,4 miljoonan euron rahoituksen. Synteettisen metanolin tuotannossa käytetään vihreää vetyä ja viereisen sementtitehtaan hiilidioksidipäästöjä. Tuotantolaitoksen on suunniteltu valmistuvan vuonna 2026 ja tuottavan valmistuttuaan 25000 t synteettistä metanolia. (LUT-yliopisto 2022, ST1 2022.)

Kotkaan on suunnitteilla Power-to-Gas tuotantolaitos Kotkan Energia Oy ja Nordic Ren-Gas Oy toimesta. Investointi olisi arvoltaan noin 100 miljoonaa euroa ja elektrolyysiteholtaan 40 MW. Hiilidioksidi otetaan talteen Kotkan hyötyvoimalaitoksen savukaasuista ja sähkö suomalaisista tuulivoimapuistoista. Tuotettu kaasu on suunnattu raskaan liikenteen käyttöön ja arvioitu riittämään 600 raskaan ajoneuvon käyttöön vuosittain. (Kotkan Energia 2022.)

Harjavaltaan on rakenteilla Suomen ensimmäinen teollisen mittakaavan vihreän vedyn ja synteettisen metaanin tuotantolaitos. P2X Solutions on investoinut 70 miljoonaa hankkeeseen. Vetytuotantolaitoksen kapasiteetti on 20 MW ja valmistuessaan laitos vähentää Suomen hiilidioksidi päästöjä 40 000 tonnia vuodessa. Sivuvirtoina syntyvä happi ja lämpö voidaan hyödyntää teollisuuden prosesseissa. Rakennuttaminen aloitettiin syksyllä 2022 ja laitoksen on tarkoitus valmistua kesällä 2024. (ePressi 2022.)

Vantaan Energia ja Wärtsilä suunnittelevat synteettistä kaasua tuottavan sähköpolttoainelaitoksen rakennuttamista. Se hyödyntäisi jätteen polton yhteydessä vapautuvan veden ja hiilidioksidin ja käyttäisi näitä raaka-aineena. Laitoksen olisi tarkoitus tuottaa synteettistä metaania 10 MW:n polttoaineteholla. Hukkalämpö käytettäisiin Vantaan kaupungin lämmittämiseen. (Vantaan Energia 2021.)

LUT yliopisto on toteuttanut ekosysteemimallinnuksen vety/metanolitaloudelle Kiteen Puhoksen teollisuusalueelle ympäristöineen. Hankkeessa tutkittiin mahdollisuuksia inves-

toida kemikaalien ja polttoaineiden valmistukseen uusiutuvalla energialla sekä selvitettiin tuulisähkön alueellista potentiaalia. Raportissa todettiin metanolin tuotannon olevan mahdollisesti kannattavaa oikeissa olosuhteissa. Haasteina oli hiilidioksidiraaka-aineen saatavuus alueella sekä sähkön riittävän edullinen hinta. Myös tuotteesta olisi saatava riittävän korkea hinta. (Mankonen et al. 2022.)

5 Tulevaisuudennäkymät ja -potentiaali

Markkinoilla, erityisesti lento-, meri- ja raskaan kaluston liikennesektoreilla, nestemäisille polttoaineille on tarvetta vielä pitkään. PtX-tekniologialla on mahdollista luoda hiilineutraaleja nestemäisiä polttoaineita fossiilisten polttoaineiden korvaamiseksi. On huomattava, että sääntely ja kysyntä tulevat määräämään PtX-polttoaineiden hinnan tuotannon kustannuksien sijaan. PtX-tuotannon kulut pienenevät uusiutuvan energian tuotannon lisääntyessä ja PtX-laitosten kehittyessä.

PtX-tekniologiat voivat jo nyt olla taloudellisesti kannattavia toteuttaa, jos investointi toteutetaan hyödyntäen kiertotaloutta. Tulevaisuudessa on odotettavissa suuria investointeja tukemaan siirtymää kestäväan energian tuotantoon. Päästöjen kustannukset ja säädökset vaikuttavat merkittävästi PtX-tekniologialla tuotettujen polttoaineiden kannattavuuteen. (Matinmikko et al. 2022.)

PtX-tekniologioiden kannattavuuden kehittyminen edellyttää pääomakustannuksien vähentymistä ja prosessin tehokkuuden kehittymistä, erityisesti elektrolyysin osalta. Tämä johtaisi tuotannon kustannuksien pienemiseen ja PtX-tekniikalla tuotettujen lopputuotteiden hinnan laskuun. (Rego de Vasconcelos 2019.) Jollain alueilla voi lisäksi veden saatavuus osoittautua rajoittavaksi tekijäksi PtX-hankkeiden toteuttamisessa ja taloudellisessa kannattavuudessa.

Haasteena on, että PtX-tekniologioita hyödyntävät laitokset on kehitettävä nyt, mutta niiden käytön yleistyessä tulevaisuudessa energiajärjestelmät toimivat hyvin eri tavalla kuin tällä hetkellä. Vasta kun tiedetään tarkemmin, kuinka tulevaisuuden energiajärjestelmät toimivat voidaan selvittää PtX-järjestelmien tarkat vaatimukset. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole saatavilla tutkimuksia, jotka yhdistäisivät energiajärjestelmänalyysin ja laitoksien optimoinnin tavalla, joka vastaisi näihin kysymyksiin. (Miehling et al. 2022.)

PtX-laitokset ovat riippuvaisia uusiutuvan sähkön tuotannosta, jolloin haastetta aiheuttaa tuotannon ajallinen vaihtelu. Toimintaa pystytään tasaamaan vetyvarastoilla, mutta on tärkeää saada integroitua PtX-laitokset mahdollisimman hyvin vaihtelevaan energian tuotantoon. Vedyn tuotantoon tulisi katkoksia, mutta varastoidun vedyn avulla jatkoprosesseja voitaisiin jatkaa tyypillisesti pari päivää ennen vetyvarastojen loppumista. Tästä seuraisi

useita kylmäkäynnistyksiä ja taukoja tuotannossa. Elektrolyysi on PtX-laitoksen suurin sähkön kuluerä. Hiilidioksidin talteenotto kuluttaa myös sähköä, mutta huomattavasti vähemmän kuin elektrolyysi, joten voi olla kannattavaa jatkaa sitä sähkön kustannuksista riippumatta jatkoprosessien ylläpitämiseksi. (Miehling et al. 2022.)

PtX-hankkeita on mahdollista soveltaa tulevaisuudessa laajemmin ympäri maailman, kunhan ne ensin saadaan paikallisesti taloudellisesti kannattaviksi. Periaate on yksinkertainen ja sitä on helppo kopioida myös erilaisiin ympäristöihin. Tämä laskisi hiilidioksidipäästöjä merkittävästi.

6 Johtopäätökset

PtX-prosesseja on kehitetty jo pidemmän aikaa. PtX-prosessien vahvuuksiin kuuluu ehdottomasti sen monikäyttöisyys ja kysyntä usealla energialla hyödyntävällä alalla. Elektrolyysin kehittyminen on avainasemassa PtX-prosessien kannattavuudessa. Uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön tarjonta on haastavaa säätää vastaamaan kysyntää. PtX-prosesseilla on suuri mahdollisuus tasoittaa tätä muuttamalla energia toiseen muotoon ja tarjoamalla se käytettäväksi tarvittaessa esimerkiksi polttoaineiden tai takaisin sähköksi muuntamisen kautta.

PtX-hankkeiden määrä on jatkuvassa kasvussa ja sillä on varmasti osansa tulevien energiajärjestelmien toimivuuden takaamisessa ja ilmastoneutraaliuden saavuttamisessa. Euroopassa on käynnissä useita pilottihankkeita ja osa on jo matkalla kaupalliseen käyttöön. Hiilidioksidipäästörajoituksilla on tulevaisuudessa suuri merkitys PtX-tuotteiden kannattavuudessa. Hankkeiden osoittautuessa kannattaviksi tulevat PtX-laitosten määrä lisääntymään ja leviämään laajemmille alueille.

PtX-hankeet ja vetytalous ovat tällä hetkellä vahvassa suosiossa ja useita projekteja on käynnissä. Vetytalous on kuitenkin aiemminkin ollut ajoittain suuressa suosiossa ja on enustettu siirtymistä vetytalouteen. Siirtymä ei ole kuitenkaan vielä tapahtunut ja nähtäväksi jää, kuinka pian voidaan konkreettisesti olettaa vetyhankkeiden yleistyvän. Vedyn varastoinnissa ja kuljettamisessa on kuitenkin tällä hetkellä vielä ratkaisemattomia ongelmia.

Työssä ei käsitelty Euroopan ulkopuolella olevia PtX-projekteja, joten niiden ajankohtaisen tilanteen selvittäminen olisi hyvä aihe jatkotutkimukselle. Myös erilaisten ympäristöjen ja esimerkiksi veden saatavuuden merkitystä olisi hyvä pohtia PtX-teknologiaa sovellettaessa Euroopan ulkopuolella.

Lähteet

Ammonia Energy Association. 2022. Denmark approves national PtX strategy. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.10.2022]. Saatavilla: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/denmark-approves-national-ptx-strategy/>

Armijo, J. & Philibert, C. 2020. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 45, Issue 3

Chehade, Z., Mansilla, C., Lucchese, P., Hilliard, S. & Proost, J. 2019. Review and analysis of demonstration projects on power-to-X pathways in the world. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol 44, Issue 51, s. 27637-27655. ISSN 0360-3199

Decourt, B. 2019. Weaknesses and drivers for power-to-X diffusion in Europe. Insights from technological innovation system analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 45, Issue 33, s.17411-17430. ISSN 0360-3199

ePressi. 2022. Työt alkoivat P2X Solutionsin vihreän vedyn laitoksen tontilla Harjavallassa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 31.11.2022]. Saatavilla: <https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/tyot-alkoivat-p2x-solutionsin-vihrean-vedyn-laitoksen-tontilla-harjavallassa.html>

EPV Energia. 2022. Suomen ensimmäinen Power-to-X-to-Power-vetyjärjestelmä Vaasaan. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 29.11.2022]. Saatavilla: <https://www.epv.fi/project/power-to-x-to-power/>

FONA. 2022. Carbon2Chem. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.1.2023]. Saatavilla: <https://www.fona.de/en/measures/funding-measures/carbon2chem-project.php>

Food Navigator. 2019. Solar Foods makes protein out of thin air: ‘This is the most environmentally friendly food there is’. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.12.2022]. Saatavilla: <https://www.foodnavigator.com/Article/2019/07/15/Solar-Foods-makes-protein-out-of-thin-air-This-is-the-most-environmentally-friendly-food-there-is>

H2V. 2022. PROJECTS. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.1.2022]. Saatavilla: <https://h2v.net/en/projects/>

HYPOS. 2023. HYDROGEN POWER STORAGE & SOLUTIONS EAST GERMANY. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.1.2023]. Saatavilla: <https://www.hypos-eastgermany.de/>

International Energy Agency. 2022. Climate change. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.12.2022]. Saatavilla: <https://www.iea.org/topics/climate-change>

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, Vol.112, s.865–879

Kotkan Energia. 2022. Kotkaan suunnitteilla yli 100 m eur laitosinvestointi vihreän vedyn ja uusiutuvan kotimaisen kaasun tuotantoon. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.10.2022]. Saatavilla: <https://www.kotkanenergia.fi/kotkaan-suunnitteilla-yli-100-meur-laitosinvestointi-vihrean-vedyn-ja-uusiutuvan-kotimaisen-kaasun-tuotantoon/>

Kopernikus Projekte. 2022. Wie das Kopernikus-Projekt P2X erneuerbaren Strom in Kunst- und Kraftstoffe, Gase und Wärme umwandelt. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.1.2023]. Saatavilla: <https://www.kopernikus-projekte.de/p2x>

Larjava, H. 2022. Regional power-to-x concept: techno-economic assessment and overview of regulative aspects. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto.

LUT-yliopisto. 2022. Päästöistä polttoainetta – vuosien tutkimustyö on saamassa tuulta alleen. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.12.2022]. Saatavilla: <https://www.lut.fi/fi/uutiset/paastoista-polttoainetta-vuosien-tutkimustyo-saamassa-tuulta-alleen>

Mankonen A., Kaikko J., Melin K., Laari A. & Vakkilainen E. 2022. Vety-/metanolitalous – Ekosysteemimallinnus, case Puhos. LUT Scientific and Expertise Publications Tutkimusraportit – Research Reports, vol. 141

Matinmikko, J., Kinnunen, S., Sinkkonen, T. & Kärri, T. 2022. Towards sustainable feasibility studies for P2X investments. Journal of Cleaner Production, Vol 365, 132641, ISSN 0959-6526

MethQuest. 2023. Mit erneuerbarem Methan die Energiewende voranbringen. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 6.1.2023]. Saatavilla: <https://www.methquest.de/ueber-methquest/uebersicht/>

Miehling, S., Fendt, S. & Spliethoff, H. 2022. Optimal integration of Power-to-X plants in a future European energy system and the resulting dynamic requirements. *Energy Conversion and Management*, Vol. 251. 115020

P2X Solutions. 2022. P2X Solutions selvittää Savon Voiman kanssa mahdollisuutta vihreän vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantoon Joensuussa. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 9.10.2022]. Saatavilla: <https://p2x.fi/p2x-solutions-selvittaa-savon-voiman-kanssa-mahdollisuutta-vihrean-vedyn-ja-sahkopolttoaineiden-tuotantoon-joensuussa/>

Raunila, T. 2022. Petrokemian teollisuuden ympäristöystävällinen vedyntuotanto: vihreä vety. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto.

Rego de Vasconcelos, B. & Lavoie J. 2019. Recent Advances in Power-to-X Technology for the Production of Fuels and Chemicals, *Frontiers in chemistry*, Vol.7, s.392–415

Roslander, E. 2022. Valtionyhtiö Gasgrid perustaa vetyverkkoihin keskittyvän tytäryhtiön – Annika Saarikko: ”Suomi vetytalouden eturintamaan”. *Talouselämä*. [Verkojulkaisu], [Viitattu 6.1.2023]. Saatavilla: <https://www.talouselama.fi/uutiset/valtionyhtio-gasgrid-perustaa-vetyverkkoihin-keskittyvan-tytaryhtion-annika-saarikko-suomi-vetytalouden-eturintamaan/180b5c84-ea42-43d3-b770-d786c3d99ff7>

ST1 Oy. 2022. St1 suunnittelee synteettisen metanolin pilottilaitosta Lappeenrantaan. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 13.12.2022]. Saatavilla: <https://www.st1.fi/st1-suunnittelee-synteettisen-metanolin-pilottilaitosta-lappeenrantaan>

State of Green. 2019. Denmark funds new Power-to-X flagship projects. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 15.10.2022]. Saatavilla: <https://stateofgreen.com/en/news/denmark-funds-new-power-to-x-flagship-projects/>

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. 2011. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CSS). VTT. VTT working papers 161. ISBN 978-951-38-7503-9

Turunen, T. 2022. Prosessianalysaattorijärjestelmien vaatimukset uusiutuvaa vetyä hyödyntävässä metanolin valmistuksessa. Diplomityö. Lappeenrannan–Lahden Teknillinen Yliopisto.

Ulkoministeriö. 2022. Suomen ilmastoulkopolitiikka. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.1.2023]. Saatavilla: <https://um.fi/ilmastoulkopolitiikka>

Vantaan Energia. 2021. Finland's largest Power-to-Gas plant – Wärtsilä and Vantaa Energy to continue planning towards an investment decision. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 7.12.2022]. Saatavilla: <https://www.vantaanenergia.fi/en/finlands-largest-power-to-gas-plant-wartsila-and-vantaa-energy-to-continue-planning-towards-an-investment-decision/>

WindNODE. 2021. Die zweite Phase der Energiewende. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.1.2023]. Saatavilla: <https://www.windnode.de/ueber/die-zweite-phase-der-energiewende/>

Wulf, C., Zapp, P. & Schreiber, A. 2020. Review of Power-to-X Demonstration Projects in Europe. *Frontiers in Energy research*. s. 1–11. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.12.2022]. Saatavilla: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00191/full>