

KANSALLISEN STRATEGISEN VETYTUTKIMUKSEN TARPEET - SUOMEN VETYTUTKIMUSFOORUMIN NÄKYMÄ



SISÄLLYS

3

Taustaa: Vety on puhtaan teollisen murroksen mahdollistaja

4

PtX- teknologiat ja vetytalous: Monien toimijoiden arvoketju

6

PtX- teknologioihin sekä vetytalouteen liittyvät keskeisimmät tutkimusaiheet

- 7 Vedyn valmistus
- 7 Energian ja vedyn varastointi sekä siirto
- 8 Vedyn käyttö
- 8 Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö
- 9 Energia- ja sähköjärjestelmä
- 9 Ympäristö ja kestävyys
- 10 EU-sääntely ja politiikka
- 10 Markkinat ja yhteiskunta

11

Johtopäätökset ja suositukset

12

Lyhenteet ja termien selitykset

13

Liitteet

- 14 Kansallisen strategisen vetytutkimuksen tarpeet – Suomen Vetytutkimusfoorumin näkymä
- 16 Kansallisen strategisen vetytutkimuksen tarpeet – Suomen vetytalouden tutkimustarpeiden vertailu teollisuuden ja tutkimuksen näkökulmasta
- 18 Suomen vetytalouden tutkimuksen kartoitus

Lisätietoja:

Pertti Kauranen, Professori, LUT Yliopisto, Vetytutkimusfoorumin puheenjohtaja, sähköposti: pertti.kauranen@lut.fi

Petteri Laaksonen, TkT, Tutkimusjohtaja, LUT Yliopisto, sähköposti: petteri.laaksonen@lut.fi

Eeva Lähdesmäki, KM, Projektipäällikkö, LUT Yliopisto, sähköposti: eeva.lahdesmaki@lut.fi

Teemu Tuomisalo, KTT, Tutkija, LUT Yliopisto, sähköposti: teemu.tuomisalo@lut.fi

TAUSTAA: VETY ON PUHTAAN TEOLLISEN MURROKSEN MAHDOLLISTAJA



Pariisin ilmastopimuksen tavoitteena on rajata ilmaston keskilämpötilan nousu alle 1,5 asteeseen. Tämän tavoitteen saavuttaminen vaatii fossiilisten päästöjen radikaalia vähentämistä, jonka tulee tapahtua energiasektorilla, teollisuudessa, lämmityksessä, liikenteessä ja yhteiskunnan muilla sektoreilla. Tavoitteeseen päästään joko suoralla sähköistämällä tai vetytalouden avulla, jotka tarjoavat päästöttömiä tai vähäpäästöisiä ratkaisuja esimerkiksi teollisuuteen, liikenteeseen ja lämmitykseen.

Vetytaloudessa korostuu puhtaasti tuotettu vety, joka korvaa fossiiliset polttoaineet sekä mahdollistaa ilmastopäästöjen vähentämisen niillä sektoreilla, joilla sähkön suorakäyttö on haasteellista. Uusiutuvan energian tuotantokustannukset ovat laskeneet viime vuosina fossiilisen sähköntuotannon kanssa kilpailukykyiselle tasolle, ja tästä syystä sähkön tuotanto puhdistuu nopeammin kuin muut primäärienergian muodot. Tätä puhdasta energiaa voidaan vedyn avulla varastoida ja käyttää paikoissa, joissa suora sähköistäminen on vaikeaa. Uusiutuva energia, vety ja vetyjalosteet edistävät myös yhteiskunnan vakautta, kestävyyttä, omavaraisuutta, turvallisuutta, huoltovarmuutta, talouskasvua sekä työllisyyttä.

Suomen rooli EU:ssa vahvistuu uusiutuvan energian tuotantopotentiaalini ja biopohjaisen hiilidioksidin ansiosista. Suomen uusiutuvan sähkön tuotantopotentiaali (maatuuli-, merituuli- ja aurinkovoima) ylittää Suomen oman kulutuksen kymmenkertaisesti. Lisäksi Suomessa on tarjolla myös merkittävä määrä biopohjaista hiilidioksidia, joka mahdollistaa vedyn jatkojalostamisen korkeamman lisäarvon tuotteiksi.

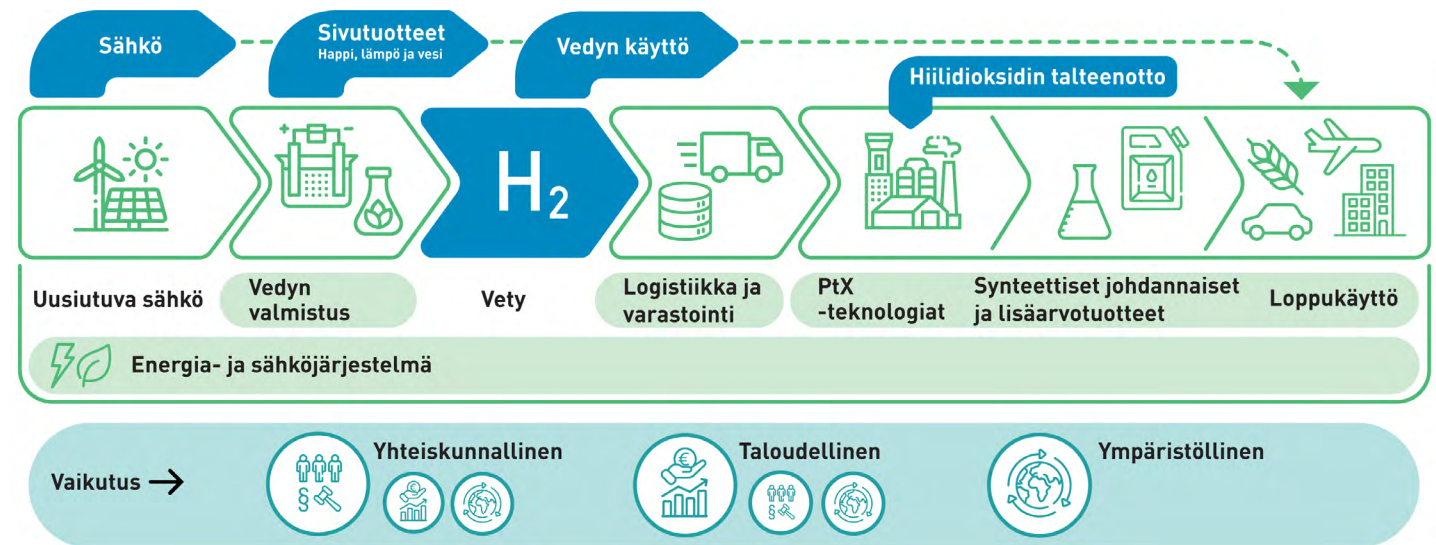
Tämän toteutuminen edellyttää kuitenkin mittavia investointeja sähköntuotantoon, vedyn valmistukseen, varastointiin ja tämän jatkojalostamiseen sekä poliittisia toimia markkinoiden luomiseksi. Myös tutkimukseen on panostettava, sillä tämä lisää Suomen osaamista ja sietokykyä muuttuvissa globaaleissa energia- ja turvallisuusjärjestelmissä.

Tässä raportissa keskitytään vetytalouden ja Power-to-X (PtX) -teknologioiden tärkeimpiin tutkimusaiheisiin. PtX tarkoittaa, tiivistetysti, uusiutuvan sähkön muuntamista erilaisiksi polttoaineiksi tai kemikaaleiksi, vedyn, hiilidioksidin ja typen avulla. PtX-teknologiat ovat vihreän sähköistymisen avainteknologioita, joilla pyritään korvaamaan fossiiliset polttoaineet ja jalosteet.

”Uusiutuva energia, vety ja vetyjalosteet edistävät yhteiskunnan vakautta, kestävyyttä, omavaraisuutta, turvallisuutta, huoltovarmuutta, talouskasvua ja työllisyyttä.”

PTX- TEKNOLOGIAT JA VETYTALOUS: MONIEN TOIMIJOIDEN ARVOKETJU

Vedyn arvoketju



PtX-teknologioihin ja vetytalouteen kuuluu useita erilaisia ratkaisuja, toimijoita ja elementtejä. Vetyyn liittyvä arvoketju koostuu vedyn tuotannosta, sekä tämän siirrosta, varastoinnista ja hyödyntämisestä. Vedyn tuotantoon liittyy olennaisesti puhdas primäärienergia, joka tulee olemaan olennainen osa energiajärjestelmää. Vetyä hyödynnetään joko suoraan tai erilaisina vedystä jalostettuina raaka-aineina eri sektoreilla, mikä kytkee yhteiskunnan eri osat, kuten energia-, metalli-, metsä-, kemian-, teräs- ja prosessiteollisuuden sekä kestävästi liikenteen, osaksi vetyarvoketjua. Vedyn ja tämän jatkojalosteiden käyttöön liittyy olennaisesti myös markkina-, yhteiskunta-, ympäristö- ja kestävyysnäkökulmat, joita tulee tutkia ja ymmärtää tulevassa energiamurroksessa.

Euroopassa vetyarvoketjujen kehitys etenee niin kutsuttujen vetylaaksojen kautta. Vetylaaksot ovat maantieteellisiä alueita, joissa useat eri vetysovellukset yhdistetään

ekosysteemiksi, joka edistää vetyhankkeiden etenemistä. Koska kyseessä on murrosvaiheessa oleva teknologia, jokaiseen laaksoon liittyy merkittäviä TKI-tarpeita ja -toimintaa.

Euroopan tasolla vetyyn liittyvät tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnot keskittyvät Clean Hydrogen Partnership -yhteenliittymään, jolla tuetaan vetyteknologioiden tutkimusta ja innovointia. Tämän lisäksi CETP, Processes4Planet sekä Horizon Europe tukevat laajemmin näitä aktiviteetteja.

Clean Hydrogen Partnership:

Julkisen ja yksityisen sektorin kumppanuus keskittyy erityisesti polttokennojen ja vetyteknologioiden tutkimukseen ja kehitykseen Euroopassa.

Clean Energy Transition Partnership (CETP):

Monikansallinen kumppanuus, joka yhdistää eri maiden hallituksia, teollisuutta ja tutkimuslaitoksia edistämään puhtaan energian teknologioiden tutkimusta ja kehitystä. Se pyrkii nopeuttamaan siirtymää kohti kestäviä energijärjestelmiä, mukaan lukien vetyteknologiat.

Horizon Europe:

Euroopan unionin tutkimuksen ja innovoinnin puiteohjelma, joka tukee laajasti vetyyn liittyvää tutkimusta ja kehitystä.

Processes4Planet:

Osa EU Horizon Europe -ohjelmaa ja keskittyy tutkimukseen ja kehitykseen teollisuuden vähähiilisuuden edistämiseksi, mukaan lukien vetyteknologiat.

Tärkeimmät tunnistetut verkostot vetytutkimuksen ympärillä näiden toimijoiden lisäksi ovat:

EERA JP Fuel Cells & Hydrogen:

Euroopan energiainnovaatioallianssin yhteisohjelma, joka keskittyy polttokennojen ja vetyteknologioiden tutkimukseen ja kehitykseen.

SET Plan Green Hydrogen IWG:

Euroopan strategisen energiateknologiasuunnitelman (SET Plan) työryhmä, joka keskittyy vihreän vedyn tutkimukseen ja kehitykseen.

IEA Hydrogen TCP:

Kansainvälisen energijärjestön vetyteknologian yhteistyöohjelma, joka edistää vetytutkimusta ja kehitystä globaalisti.

Hydrogen Europe:

Eurooppalainen yhdistys, joka ajaa hiilineutraalisuutta edistämällä eurooppalaista vetyteollisuutta.

Hydrogen Europe Research:

Hydrogen Europe -verkoston tutkimusosasto, joka edistää ja tukee vetytutkimusta ja kehitystä Euroopassa.

European Clean Hydrogen Alliance:

Tämä EU aloitteesta perustettu allianssi edistää vetytalouden kehitystä, mukaan lukien tutkimus ja kehitys, Euroopassa.

International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE):

Tämä kansainvälinen yhteistyöelin edistää vetytutkimusta ja -kehitystä maailmanlaajuisesti.

Lisäksi suoraan vetyyn liittyvien verkostojen lisäksi on useita esim. uusiutuviin polttoaineisiin keskittyviä kansainvälisiä verkostoja. Lähempänä kaupallistumista olevia TKI-instrumentteja ovat esimerkiksi ensimmäisiin kaupallisiin laitoksiin tähtäävä Innovation Fund ja kansallisella tasolla energiatuki.

PTX-TEKNOLOGIOIHIN SEKÄ VETYTALOUTEEN LIITTYVÄT KESKEISIMMÄT TUTKIMUSALUEET

Seuraavissa kappaleissa on esitetty tutkimustarpeita liittyen vetytalouden arvoketjun eri osa-alueisiin, jotka tässä dokumentissa on jaoteltu seuraavasti:

- Puhtaan vedyn valmistus
- Energian ja vedyn varastointi sekä siirto
- Vedyn käyttö
- Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö
- Energia- ja sähköjärjestelmä

Tutkimuksen tulee arvoketjun lisäksi tukea vetytaloutta ja PtX-tekniologioiden käyttöönottoa tarjoamalla tietoa ympäristövaikutuksista, kestävydestä sekä yleisestä hyväksyttävyydestä. Tutkimuksen tulee tuottaa myös jatkuvasti tietoa päättäjille sekä yrityksille EU-sääntelystä ja kotimaisen teollisuuspolitiikan kehityksestä, joiden avulla voidaan edistää Suomen vetytaloutta ja PtX-tekniologiaa. Lisäksi tutkimustulosten tulee tukea vetytalouden markkinoiden kehittämistä, mikä vahvistaa kotimaan talouskasvua ja tukee hyvinvointiyhteiskunnan rakentamista.

- Ympäristö ja kestävyys
- EU-sääntely ja politiikka
- Markkinat ja yhteiskunta

Tässä raportissa käsitellään yllälueteltuja aiheita lyhyen, keskipitkän ja pitkän aikavälin tavoitteina. Aikavälin viittauksella viitataan aikaan, jonka kuluessa tutkimuksen tulokset saadaan laajempaan käyttöön tutkimuksen aloittamisesta. Lyhyellä aikavälillä teollisen soveltamisen pullonkaulojen ratkaiseminen korostuu tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoiminnassa (TKI). TKI-toiminnalla on myös rooli kasvattaa teollisuudelle tulevaisuuden osaajia, joilla on ymmärrys vetytaloudesta ja PtX-tekniologioista. Keskipitkällä aikavälillä korostuu tekniologioiden kustannuskilpailukyvyyn ja toteutettavuuden parantaminen sekä sovelluskohteet, jotka eivät heti ole teknisesti toteutettavissa teollisessa mittakaavassa. Pitkällä aikavälillä korostuvat läpimurtotekniologiat, jotka voivat muuttaa nykyisten ratkaisujen viitoittamaa polkua sekä kokonaiskestävyyden arviointi ja ennakointi.



Puhtaan vedyn valmistus

Vihreällä vedyllä tarkoitetaan vetyä, joka on tuotettu uusiutuvalla energialla, kuten aurinko- tai tuulivoimalla. Tällä hetkellä vihreän vedyn valmistus vaatii huomattavan määrän uusiutuvaa energiaa, minkä takia on tärkeää tutkia, kuinka vedyn valmistusta voidaan tehostaa, jotta vedystä saadaan mahdollisimman kilpailukykyinen tuote. Vedyn tuotannon tehostaminen tukee myös Suomen ilmastotavoitteita, koska vihreällä vedyllä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Tärkeitä tutkimusaiheita vedyn valmistuksessa ovat elektrolyysin skaalaaminen, vaihtoehtoisten raaka-aineiden tutkiminen kriittisten raaka-aineiden korvaamiseksi ja tuotannon esteiden poistaminen. Lisäksi meidän tulee tutkia elektrolyysijärjestelmien tehokkuuden parantamista, valmistusteknologioita ja automatisointia sekä uusia tehokkaita vedyn tuotannon menetelmiä.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<p>Kaupalliset tai lähellä kaupallistamista olevat elektrolyysiteknologiat (alkali ja PEM):</p> <ul style="list-style-type: none"> Skaalaus gigawattiluokkaan Elektrolyysiteknologioiden tehokkaat ja vaihtoehtoiset materiaalit Elektrolyysiteknologioiden tuotannollisten rajoitteiden poistaminen 	<p>Kaupalliset tai lähellä kaupallistamista olevat elektrolyysiteknologiat (alkali ja PEM):</p> <ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysin energiatehokkuuden parantaminen Elektrolyysituotannon valmistusteknologioiden ja automatisoinnin kehittäminen <p>Alemman valmiustason teknologiat:</p> <ul style="list-style-type: none"> SOEC, AEM Metaanipyrolyysi (biometaani) 	<p>Vaihtoehtoiset vedyn valmistuksen teknologiat:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fotokatalyyysi Muut vaihtoehtoiset teknologiat kuten biomassan käsittely vedyksi

Energian ja vedyn varastointi sekä siirto

Suomella on merkittävä uusiutuvan sähkön tuotantopotentiaali sekä maa- ja merituulivoimassa että aurinkovoimassa. Tehokkaat varastointi- ja siirtomenetelmät mahdollistavat uusiutuvan sähkön tehokkaan integroinnin energijärjestelmään. Kehittyneet varastointi- ja siirtoratkaisut voivat parantaa Suomen energianhuollon joustavuutta ja varmuutta, erityisesti uusiutuvien energialähteiden sähköntuotannon vaihtelevuuden osalta. Tärkeitä tutkimusaiheita ovat vedyn putkikuljetukseen ja varastointiin liittyvät aiheet sekä vedyn kuljetuksen vertailu muihin vaihtoehtoihin. Muita tutkimustarpeita ovat vedyn rooli energiavarastona, vedyn vaihtoehtoiset varastointimenetelmät, vetykomponenttien materiaalitutkimus ja vedyn laivakuljetuksen, nesteytetyn vedyn sekä uusien vedynkantajien tutkimus.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<p>Vedyn putkisiirtoon liittyvät aiheet:</p> <ul style="list-style-type: none"> Kustannustehokkuus Tekninen toteutus Kompressointi Varastointi Siirtohäviöt Turvallisuus <p>Lisäksi:</p> <ul style="list-style-type: none"> Vedyn putkisiirron vertailu muihin vaihtoehtoihin, esimerkiksi e-metanoliin ja e-ammoniakkiin Vedyn varastointi 	<p>Vetyyn liittyvät aiheet:</p> <ul style="list-style-type: none"> Vetykomponentteihin liittyvä materiaalitutkimus Vedyn laivakuljetuksen tekninen toteutus Nesteytetty vety Vedyn vaihtoehtoiset varastointimenetelmät esim. mineraaleihin Vedyn rooli energiavarastona 	<p>Uudet vedynkantajat:</p> <ul style="list-style-type: none"> Nestemäiset orgaaniset vedynkantajat (LOHC)

Vedyn käyttö

Vedyn käyttöön liittyy useita merkittäviä tutkimusaiheita, joiden kautta voidaan edistää tämän hyödyntämistä eri sektoreilla. Näin ollen tärkeitä tutkimusaiheita ovat vedyn käyttö puhtaan teräksen valmistuksessa, moottoreissa ja turbiineissa, polttokennoissa sekä X2P-teknologioissa sekä liikenteessä. Muita tutkimustarpeita ovat vedyn käyttöön liittyvä infrastruktuuri, vedyn käyttö meriliikenteessä ja vedyn hyödyntäminen puhtaiden terästen valmistuksessa heikompilaatuisista malmeista.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<ul style="list-style-type: none">Vedyn hyödyntäminen puhtaiden terästen valmistuksessaVedyn käyttö moottoreissa ja turbiineissaPolttokennot ja X-to-power (X2P) -syklit ml. RESOC <p>Vedyn käyttö liikenteessä:</p> <ul style="list-style-type: none">Mobiilit työkonetRaskas liikenne	<ul style="list-style-type: none">Vedyn käyttö meriliikenteessäVedyn käyttöön vaadittava infrastruktuuri	<ul style="list-style-type: none">Vedyn hyödyntäminen puhtaiden terästen valmistuksessa heikompilaatuisemmista malmeista

Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö

Suomella on, uusiutuvan energian potentiaalin lisäksi, merkittävä määrä biogeenistä hiilidioksidia, josta voidaan yhdessä vedyn kanssa valmistaa synteettisiä johdannaisia ja lisäarvotuotteita. Näitä ovat esimerkiksi synteettiset polttoaineet, kemikaalit tai materiaalit. Näitä synteettisiä jalosteita sekä lisäarvotuotteita voidaan käyttää monilla eri sektoreilla, esimerkiksi kemianteollisuuden raaka-aineina ja kestävän liikenteen polttoaineissa. Tärkeitä tutkimusaiheita ovat johdannais- ja lisäarvotuotteiden synteetit, hiilidioksidin talteenotto, puhdistus ja logistiikka sekä katalyysiprosessit ja materiaalit.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<p>Synteettiset johdannaisuotteet:</p> <ul style="list-style-type: none">e-ammoniakkie-metanolie-metaaniFischer-Tropsch-tuotteetKestävät lentopolttoaineet (SAF) <p>Hiilidioksidin (CO₂) lähteet:</p> <ul style="list-style-type: none">ErotusteknologiatTalteenotto suoraan ilmasta (DAC)PuhdistusLogistiikka	<ul style="list-style-type: none">Katalyysiprosessit ja materiaalit <p>Lisäarvotuotteet:</p> <ul style="list-style-type: none">e-muovite-kemikaalitVetyjohdannaisten käyttö meri- ja lentoliikenteessä	<ul style="list-style-type: none"><i>Ei esille nousseita tutkimusaiheita</i>

Energia- ja sähköjärjestelmä

Energiantuotannon muutos kohti uusiutuvaa sähköä, kuten aurinko- ja tuulivoimaa, vaatii sähköjärjestelmän sopeutumista vaihtelevaan energiantuotantoon ja kulutukseen. Sähköjärjestelmän on oltava joustava ja kestävä vaihtelevalla tuotannolla ja kulutuksella. Lisäksi sähkönsiirtotarve tulee moninkertaistumaan lähitulevaisuudessa vetytalouteen siirtymisen ja PtX-teknologioiden vuoksi, mikä vaatii merkittäviä investointeja kantaverkkoihin. Näin ollen tärkeät tutkimusaiheet koskevat sähkömarkkinoiden uudistamista, energia- ja sähkövarastoja ja niiden joustoa sekä kulutuksen ja kysynnän joustoa, sähkönsiirtotarpeita ja sähköjärjestelmän optimointia. Lisäksi on tärkeä tutkia energia- ja sähköjärjestelmän malleja, sektorikytkentää, arvoketjuja, liiketoimintamalleja, sekä hinnanmääritysmekanismia. Uudessa järjestelmässä tulee huomioida myös uudet tuotannon sivuvirrat kuten lämpö, hiili ja happi, sekä niiden hyödyntäminen.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<ul style="list-style-type: none"> Sähkömarkkinoiden uudistaminen Sähkön ja energian varastointi sekä jousto Sähkön ja energian kulutuksen- ja kysynnän jousto Suurten sähkönsiirtotarpeiden mahdollistaminen Teknialoudelliset analyysit ja prosessimallinnus 	<ul style="list-style-type: none"> Sektorikytkentä Sähköjärjestelmän optimointi Energiajärjestelmän arvoketjut ja liiketoimintamallit Hinnanmääritysmekanismit Vedyntuotannon sivuvirtojen (lämpö, hiili ja happi) hyödyntäminen 	<ul style="list-style-type: none"> Hajautetut off-grid energiaratkaisut <p>Sähköverkon uusien teknologioiden kehitys:</p> <ul style="list-style-type: none"> Kantaverkko 750kV

Ympäristö ja kestävyys

Ympäristö- ja kestävyysasiat muuttuvassa energiajärjestelmässä ovat olennaisia tutkimusaiheita, sillä vihreällä siirtymällä ja vetytaloudella on vaikutuksia mm. ilmasto- ja biodiversiteettiin. Tämän takia on varmistettava, että muutos ei vaaranna tai aiheuta lisäkuormaa ympäristölle tai ilmastolle. Lisäksi meidän on varmistettava kriittisten raaka-aineiden ja resurssien saatavuus sekä sovellettuus. Vihreän siirtymän ja vetytalouden muutokset vaikuttavat myös yhteisöihin, työllisyyteen ja aluetalouteen. Tämän takia meidän tulee ymmärtää edellä mainittuja vaikutuksia ja kehittää toimintatapoja, jotka tukevat kokonaisuudessaan kestävä kehitystä, oikeudenmukaista siirtymää sekä muutoksen yleistä hyväksyttävyyttä.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<p>Ilmastonmuutos, maankäyttö ja biodiversiteetti, sekä kriittiset raaka-aineet:</p> <ul style="list-style-type: none"> Vihreän siirtymän ja vetytalouden ympäristövaikutusten arviointi Elinkaarialyysi vihreän siirtymän ja vetytalouden eri skenaarioissa Vihreän vedyn tuotannon sertifiointi Maankäytön vaikutukset <p>Muut aiheet:</p> <ul style="list-style-type: none"> Komponenttitason elinkaaritutkimus 	<ul style="list-style-type: none"> Resurssit ja kriittiset raaka-aineet Vihreän siirtymän ja vetytalouden yleisen hyväksyttävyyden arviointi ja edistäminen 	<ul style="list-style-type: none"> Vihreän siirtymän ja vetytalouden yleisen hyväksyttävyyden arviointi ja edistäminen Hyvinvoinnin luominen ja jakautuminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa Teollisuuden muutoksen seuraaminen, edistäminen ja tukeminen vetytaloudessa

EU-sääntely ja politiikka

EU-sääntelyllä ja kansallisella politiikalla on ratkaiseva vaikutus vihreään siirtymään ja vetytalouteen. Tutkimuksessa tulee perehtyä näihin teemoihin ja tarjota tietoa valtiolle, kunnille ja yrityksille siitä, millaisia erityisehtoja Suomella on EU-sääntelyyn liittyen, sekä tuoda esille toimia, joilla siirtymää voidaan edistää. EU-sääntelyn selkeyttäminen ja johdonmukaisuus sähkön, vedyn ja hiilidioksidin osalta ovat tärkeitä myös investointien toteutumiseksi. Lisäksi on huomioitava geopolittiset muutokset ja huoltovarmuus, jotka ovat keskeisiä elementtejä vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa. Tutkimuksen tulee tuottaa myös tietoa siitä, kuinka soft law -mekanismeja, luvitusta ja pitkäaikaisia sopimuksia voidaan kehittää niin, että ne tukevat investointeja ja siirtymää.

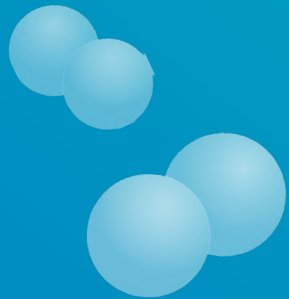
Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<ul style="list-style-type: none">Vaikutusarvioinnin tekeminen luvituksen edistämiseksiKeskeisen EU-sääntelyn vaikutusarviointi ja siihen vaikuttaminen Suomen vihreän siirtymän ja vetytalouden edistämiseksiPitkäaikaisten sopimusten lukitusvaikutusten arviointi ja vaikuttaminen	<ul style="list-style-type: none">Kansallisen lainsäädännön arviointiKansallisen politiikan arviointiEU-sääntelykehityksen kehityksen ja vaikutusten seurantaSoft law -mekanismien seurantaGeopolitiikka ja huoltovarmuus	<ul style="list-style-type: none">EU-sääntelykehityksen tilannekuvan muodostaminen ja tämän vaikuttavuuden edistäminen

Markkinat ja yhteiskunta

Vetytalous ja PtX-tekniikat mullistavat koko energiajärjestelmän arvoketjun ja markkinat. Vedyn kysyntä tulee kasvamaan kiihtyvällä vauhdilla, jos päästötavoitteet ja niihin liittyvä EU-sääntely toteutuvat suunnitellusti. Tämä tarjoaa Suomelle merkittävän taloudellisen mahdollisuuden, joka voi kasvattaa teollisuuden liikevaihtoa ja luoda huomattavasti uusia työpaikkoja vuoteen 2035 mennessä. Suomelle on erityisen tärkeää, että käytämme vihreän vedyn ja biogeenisen hiilidioksidin oman teollisuuden tarpeisiin sekä jalostamme niitä korkeamman lisäarvon raaka-aineiksi tai tuotteiksi. Tutkimuksen tulee seurata ja tukea liiketoimintamallien kehitystä, makrotaloutta ja Suomen kilpailukykyä sekä markkinoiden kehitystä, jotta voimme vahvistaa asemaamme vetyjohdannaisten lopputuotteiden valmistajana, esimerkiksi kemianteollisuuden raaka-aineiden ja tuotteiden sekä synteettisten polttoainetuotteiden tuottajana lento- ja meriliikenteelle.

Lyhyt aikaväli (1-3 vuotta)	Keskipitkä aikaväli (3-5 vuotta)	Pitkä aikaväli (5-10 vuotta)
<ul style="list-style-type: none">Liiketoimintamallien kehityksen seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa	<ul style="list-style-type: none">Makrotalouden ja Suomen kilpailukyvyn seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa	<ul style="list-style-type: none">Vihreän siirtymän ja vetytalouden markkinakehityksen seuranta ja tilannekuvan muodostaminen

JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET



Tämän raportin pohjalta laadittiin kysely, jossa tiedusteltiin merkittävämpiä tutkimusaiheita vetytalouden arvoketjun kehittymisen kannalta. Kyselyssä oli yhteensä 83 tutkimusaihetta, jotka oli jaettu tämän raportin vetyarvoketjun mukaan kahdeksaan pääkategoriaan ja kolmeen eri ajanjaksoon. Kyselyyn vastasi yhteensä 46 edustajaa 12 suomalaisesta yliopistosta ja tutkimuslaitoksesta. Kyselyssä nousi esille 24 tärkeintä tutkimusaihetta. Pääkategoriat järjestettiin tärkeysjärjestykseen (1–8) sen mukaan, kuinka moni edellä mainituista tärkeimmistä tutkimusaiheista sisältyi kuhunkin kategoriaan: (1) vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö, (2) vedyn käyttö, (3) ympäristö ja kestävyys, (4) energian ja vedyn varastointi sekä siirto, (5) energia- ja sähköjärjestelmä, (6) puhtaan vedyn valmistus, (7) markkinat ja yhteiskunta ja (8) EU-sääntely ja politiikka. Pääkategoriat markkinat ja yhteiskunta (7) sekä EU-sääntely ja politiikka (8) eivät

nousseet merkittävimpien tutkimusaiheiden joukkoon, mutta nämä koettiin Vetytutkimusfoorumissa tärkeiksi vetytalouden ja PtX-teknologioiden kehityksen kannalta. Suomen Vetytutkimusfoorumissa päätettiin, että kustakin pääkategoria- nostetaan esille kolme tärkeimmäksi koettua tutkimusaihetta kyselytulosten keskiarvon pohjalta, ja nämä aiheet esitetään alla olevassa kuviossa.

Tämän raportin tavoitteena on nostaa esille kaikista kriittisimmät tutkimustarpeet, joiden kautta voidaan edistää sekä tukea vetytalouden kehitystä Suomessa. Lisäksi näitä tuloksia voidaan hyödyntää vetytalouden ja PtX-teknologioiden tutkimuksen rahoituksen ohjaamisessa sekä kansallisen tutkimusyhteistyön lisäämisessä.

Vetytalouden merkittävimmät tutkimusaiheet

1 Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö

e-metanoli	e-ammoniakki	Kestävät lentopolttoaineet (SAF)
------------	--------------	----------------------------------

2 Vedyn käyttö

Vedyn hyödyntäminen puhtaiden terästen valmistuksessa	Polttokennot ja X-to-power (X2P) syklit ml. RESOC	Vedyn käyttö meriliikenteessä
---	---	-------------------------------

3 Ympäristö ja kestävyys

Vihreän siirtymän ja vetytalouden ympäristövaikutusten arviointi	Resurssit ja kriittiset raaka-aineet	Elinkaarianalyysi vetytaloudessa	Teollisuuden muutoksen seuraaminen, edistäminen ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa
--	--------------------------------------	----------------------------------	--

4 Energian ja vedyn varastointi sekä siirto

Vedyn varastointi	Vedyn putkisiirron vertailu muihin vaihtoehtoihin	Vetykomponenttien materiaalitutkimus
-------------------	---	--------------------------------------

5 Energia ja sähköjärjestelmä

Sähkön ja energian varastointi ja jousto	Vedyn tuotannon sivuvirtojen hyödyntäminen	Sähkön ja energian kulutuksen ja kysynnän jousto
--	--	--

6 Puhtaan vedyn valmistus

Tehokkaiden ja/tai vaihtoehtoisten elektrolyysimateriaalien etsiminen	Elektrolyysiteknologioiden energiatehokkuuden parantaminen (alkali ja PEM)	Elektrolyysiteknologioiden tuotannollisten rajoitteiden poistaminen (alkali ja PEM)
---	--	---

7 Markkinat ja yhteiskunta

Liiketoimintamallien kehityksen seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa	Makrotalouden ja Suomen kilpailukyvyn seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa	-
---	---	---

8 EU-sääntely ja politiikka

Keskeisen EU-sääntelyn vaikutusarviointi ja vaikuttaminen Suomen vihreän siirtymän ja vetytalouden edistämiseksi	Geopolitiikka ja huoltovarmuus	EU-sääntelykehityksen tilanteen muodostaminen ja tämän vaikuttavuuden edistäminen
--	--------------------------------	---

Tutkimustarpeet jakautuvat lyhyen, keskipitkän ja pitkän aikavälin tavoitteisiin.

1-3 vuotta **LYHYT**
 3-5 vuotta **KESKIPITKÄ**
 5-10 vuotta **PITKÄ**

LYHENTEET JA TERMIEN SELITYKSET

AEM (Anion Exchange Membrane):

Anioninvaihtomembraani on elektrolyysissä käytettävä kalvo, joka kuljettaa anioneja (negatiivisesti varautuneita ioneja) elektrodien välillä. Se mahdollistaa veden hajottamisen vedyksi ja hapeksi.

Alkalielektrolyysi:

Vedyn tuotantomenetelmä, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi käyttämällä alkalista elektrolyyttiliuosta, kuten kaliumhydroksidia tai natriumhydroksidia. Prosessi tapahtuu elektrolyysikennossa, jossa sähkövirta jakaa veden kahtia.

CO2 (Hiilidioksidi):

Kaasumainen yhdiste, joka on merkittävä kasvihuonekaasu ja syntyy muun muassa fossiilisten polttoaineiden polttamisesta.

DAC (Direct Air Capture, suora talteenotto ilmasta):

Teknologia, joka poistaa hiilidioksidia suoraan ilmakehästä kemiallisten prosessien avulla.

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers):

orgaaniset vedynkantajat, jotka mahdollistavat vedyn turvallisen ja tehokkaan varastoinnin sekä kuljetuksen orgaanisissa nesteissä.

Off-grid energiaratkaisu:

Itsenäisiä energijärjestelmiä, jotka eivät ole yhteydessä keskitettyyn sähköverkkoon. Ne käyttävät paikallisesti tuotettua energiaa, kuten aurinko- tai tuulivoimaa, ja voivat sisältää akkuvarastoja.

PEM (Proton Exchange Membrane Electrolyzer):

Protoninvaihtomembraanielektrolyysi on teknologia, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi protoninvaihtomembraanin avulla.

PtX (Power-to-X):

Teknologia, joka muuntaa uusiutuvalla energialla tuotetun vedyn eri energianlähteiksi tai kemikaaleiksi, kuten synteettiseksi polttoaineeksi tai metanoliksi.

RESOC (Reversible solid oxide cells):

Kaksisuuntaiset kiinteäoksidipolttokennot ovat laitteita, jotka voivat toimia sekä polttokennoina että elektrolyysikennoina. Polttokennot muuntavat kemiallista energiaa suoraan sähköksi, kun taas elektrolyysikennot käyttävät sähköä kemiallisten yhdisteiden, kuten vedyn, tuottamiseen.

SAF (Sustainable Aviation Fuel, kestävä lentopolttoaine):

Lentopolttoaine, joka on valmistettu uusiutuviin tai kierrätetyistä raaka-aineista ja joka vähentää kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin.

SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell):

Kiinteäoksidi elektrolyysikello on elektrolyysilaitteisto, jossa käytetään kiinteää oksidimateriaalia korkeissa lämpötiloissa veden tai hiilidioksidin hajottamiseen.

Soft law -mekanismit:

Soft law -mekanismit tarkoittavat sääntely- ja ohjeistustapoja, jotka eivät ole oikeudellisesti sitovia mutta tarjoavat ohjeita ja suosituksia. Ne voivat sisältää esimerkiksi kansainvälisiä sopimuksia, suosituksia, ohjeita tai käytäntöjä, jotka vaikuttavat politiikan ja käytäntöjen muotoiluun ilman muodollista oikeudellista velvoitetta.

X2P (X-to-Power):

Teknologia, joka muuntaa erilaisia energialähteitä, kuten kemikaaleja tai lämpöä, takaisin sähköksi.



**Kansallisen strategisen vetytutkimuksen tarpeet
– Suomen Vetytutkimusfoorumin näkymä**

**Kansallisen strategisen vetytutkimuksen tarpeet
- Suomen vetytalouden tutkimustarpeiden vertailu
teollisuuden ja tutkimuksen näkökulmasta**

Suomen vetytalouden tutkimuksen kartoitus

KANSALLISEN STRATEGISEN VETYTUTKIMUKSEN TARPEET

- SUOMEN VETYTUTKIMUSFOORUMIN NÄKYMÄ

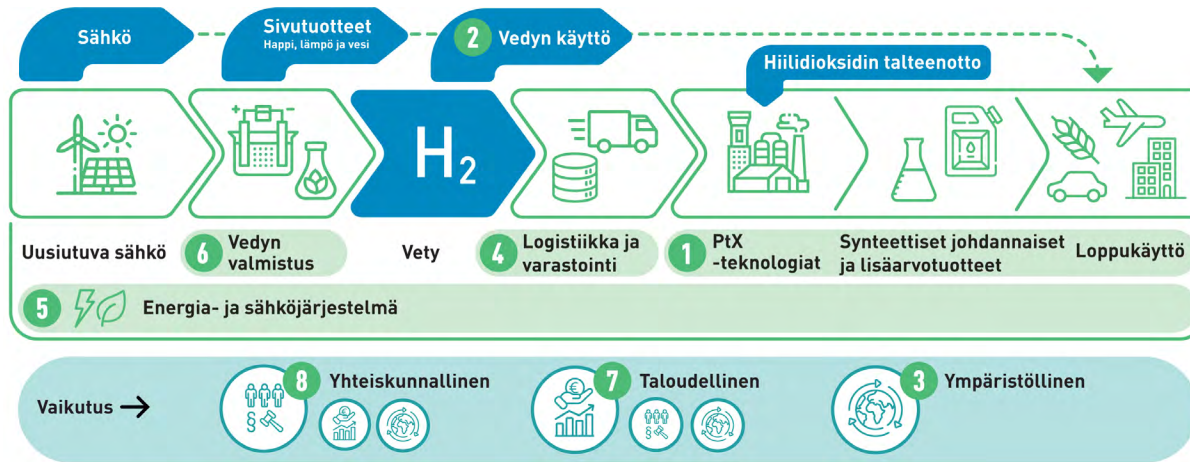


Vety on puhtaan teollisen murroksen mahdollistaja

Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteena on rajata ilmaston keskilämpötilan nousu alle 1,5 asteeseen. Tämä edellyttää fossiilisten päästöjen radikaalia vähentämistä, ensisijaisesti puhtaan sähkön avulla liikenteessä, lämmityksessä ja teollisuudessa. Tässä kontekstissa puhtaasti tuotettu vety on keskeinen tekijä, joka voi korvata fossiilisia polttoaineita, ja edistää ilmastopäästöjen vähentämistä sektoreilla, joilla suora sähkön käyttö on haasteellista. Lisäksi energiaomavaraisuus, huoltovarmuus ja turvallisuus ovat keskeisiä energiamurroksessa, tarjoten vakautta ja kestävästä kehitystä yhteiskunnallemme.

Puhtaan sähkön tuotantokustannukset ovat viime vuosina laskeneet kilpailukykyiselle tasolle fossiilisen sähköntuotannon kanssa. Tämä nopeuttaa sähkön tuotannon puhdistumista, mikä mahdollistaa vedyn käytön energiavarastointiin ja -siirtoon alueilla, joissa suora sähköistämisen on haastavaa. Suomen uusiutuvan sähkön tuotantopotentiaali (maatuuli-, merituuli- ja aurinkovoima) ylittää oman kulutuksen kymmenkertaisesti. Tämän lisäksi Suomessa on tarjolla myös merkittävä määrä biopohjaista hiilidioksidia Euroopan mittakaavassa. Tämä tarjoaa Suomelle ainutlaatuisen mahdollisuuden vahvistaa rooliaan EU:n energijärjestelmässä.

Vedyn arvoketju ja tutkimusalueet tärkeysjärjestyksessä



1 Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö

e-metanol	e-ammoniakki	Kestävät lentopolttoaineet (SAF)
-----------	--------------	----------------------------------

2 Vedyn käyttö

Vedyn hyödyntäminen puhtaiden terästen valmistuksessa	Polttokennot ja X-to-power (X2P) syklit ml. RESOC	Vedyn käyttö meriliikenteessä
---	---	-------------------------------

3 Ympäristö ja kestävyys

Vihreän siirtymän ja vetytalouden ympäristövaikutusten arviointi	Resurssit ja kriittiset raaka-aineet	Elinkaarianalyysi vetytaloudessa	Teollisuuden muutoksen seuraaminen, edistäminen ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa
--	--------------------------------------	----------------------------------	--

4 Energian ja vedyn varastointi sekä siirto

Vedyn varastointi	Vedyn putkisiirron vertailu muihin vaihtoehtoihin	Vetykomponenttien materiaalitutkimus
-------------------	---	--------------------------------------

5 Energia ja sähköjärjestelmä

Sähkön ja energian varastointi ja jousto	Vedyn tuotannon sivuvirtojen hyödyntäminen	Sähkön ja energian kulutuksen ja kysynnän jousto
--	--	--

6 Puhtaan vedyn valmistus

Tehokkaiden ja/tai vaihtoehtoisten elektrolyysimateriaalien etsiminen	Elektrolyysiteknologioiden energiatehokkuuden parantaminen (alkali ja PEM)	Elektrolyysiteknologioiden tuotannollisten rajoitteiden poistaminen (alkali ja PEM)
---	--	---

7 Markkinat ja yhteiskunta

Liiketoimintamallien kehityksen seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa	Makrotalouden ja Suomen kilpailukykyyn seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa
---	--

8 EU-sääntely ja politiikka

Keskeisen EU-sääntelyn vaikutusarviointi ja vaikuttaminen Suomen vihreän siirtymän ja vetytalouden edistämiseksi	Geopolitiikka ja huoltovarmuus	EU-sääntelykehityksen tilannekuvan muodostaminen ja tämän vaikuttavuuden edistäminen
--	--------------------------------	--

Tutkimustarpeet jakautuvat lyhyen, keskipitkän ja pitkän aikavälin tavoitteisiin.

1-3 vuotta **LYHYT**

3-5 vuotta **KESKIPITKÄ**

5-10 vuotta **PITKÄ**

KANSALLISEN STRATEGISEN VETYTUTKIMUKSEN TARPEET

– SUOMEN VETYTUTKIMUSFOORUMIN NÄKYMÄ

PtX-teknologiat muuntavat uusiutuvan energian erilaisiksi polttoaineiksi tai kemikaaleiksi, usein hiilidioksidin ja vedyn avulla. Nämä ovat keskeisiä vihreän sähköistymisen teknologioita, jotka voivat korvata fossiiliset polttoaineet ja jalosteet. Vetytalouden arvoketju koostuu vedyn tuotannosta, kuljetuksesta, varastoinnista ja suoraikäytöstä. Vedyn tuotanto vaatii puhdasta primäärienergian tuotantoa ja vesivaroja, ollen tulevaisuudessa olennainen osa energiajärjestelmää.

Tutkimuksen aikajänteet ja tarpeet

Tutkimustarpeet jakautuvat lyhyen (1–3 vuotta), keskipitkän (3–5 vuotta) ja pitkän (5–10 vuotta) aikavälin tavoitteisiin. Lyhyellä aikavälillä korostuvat teollisen soveltamisen pullonkaulojen ratkaiseminen, keskipitkällä aikavälillä teknologioiden kustannuskilpailukyvyyn parantaminen ja pitkällä aikavälillä läpimurtoteknologioiden kehittäminen ja kestävyuden arviointi.

Keskeiset tutkimusalueet

- Puhtaan vedyn valmistus: Tehokkaampien elektrolyysi-järjestelmien kehittäminen ja kaupallistaminen.
- Energian ja vedyn varastointi sekä siirto: Optimaalisten siirto- ja varastointimenetelmien tutkiminen.
- Vedyn käyttö: Vetypolttokennojen ja puhtaan teräksen valmistuksen kehittäminen.
- Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö: Synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien kehittäminen vedystä.
- Energia- ja sähköjärjestelmä: Energiajärjestelmän sopeutuminen uusiutuviin energialähteisiin ja joustaviin ratkaisuihin.
- Markkinat ja yhteiskunta
- EU-sääntely ja politiikka
- Ympäristö ja kestävyys

Toteutustapa ja tulokset

Kansallisen strategisen vetytutkimuksen työhön osallistui 12 suomalaista yliopistoa ja tutkimuslaitosta, mukaan lukien Aalto-yliopisto, Helsingin yliopisto, Jyväskylän yli-

opisto, Luonnonvarakeskus, LUT-yliopisto, Oulun yliopisto, Tampereen yliopisto, Turun yliopisto, Itä-Suomen yliopisto, Vaasan yliopisto, Teknologian tutkimuskeskus VTT ja Åbo Akademi. Yhteistyössä kerättiin ja arvioitiin 83 tutkimusaihetta, joista valittiin 24 tärkeintä Suomen kilpailukyvyyn kannalta.

Tärkeimmäksi tutkimuskategoriaksi nousi ”Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö”. Toiseksi tärkein kategoria oli ”Vedyn käyttö”, ja kolmanneksi ”Ympäristö ja kestävyys”. Muita tärkeitä kategorioita olivat ”Energian ja vedyn varastointi sekä siirto”, ”Energia- ja sähköjärjestelmä” ja ”Puhtaan vedyn valmistus”. ”Markkinat ja yhteiskunta” sekä ”EU-sääntely ja politiikka” saivat vähiten pisteitä. Tärkeimmäksi tutkimuskategoriaksi nousseiden ”Vedyn synteettisten lisäarvotuotteiden ja hiilidioksidin sekä niiden käytön” kannalta on olennaista tutkia koko vedyn arvoketjua ja sen eri osa-alueita. On tärkeää ymmärtää arvoketjun muutos ja sen vaikutukset, jotta muutos voidaan toteuttaa mahdollisimman tehokkaasti.

Yhteenveto

Vety ja PtX-teknologiat ovat keskeisiä tekijöitä Suomen siirtyessä kohti kestävämpää ja omavaraisempaa energiajärjestelmää. Kansallisen vetytutkimusstrategian tavoitteena on vahvistaa Suomen asemaa vetytalouden edelläkävijänä ja hyödyntää maan ainutlaatuisia uusiutuvan sähkön ja biopohjaisen hiilidioksidin resursseja. Tämä edellyttää laajamittaista tutkimus- ja kehitystyötä sekä merkittäviä investointeja. Suomen yliopistojen ja tutkimuslaitosten yhteistyö on ratkaisevassa roolissa tämän strategian toteutuksessa.

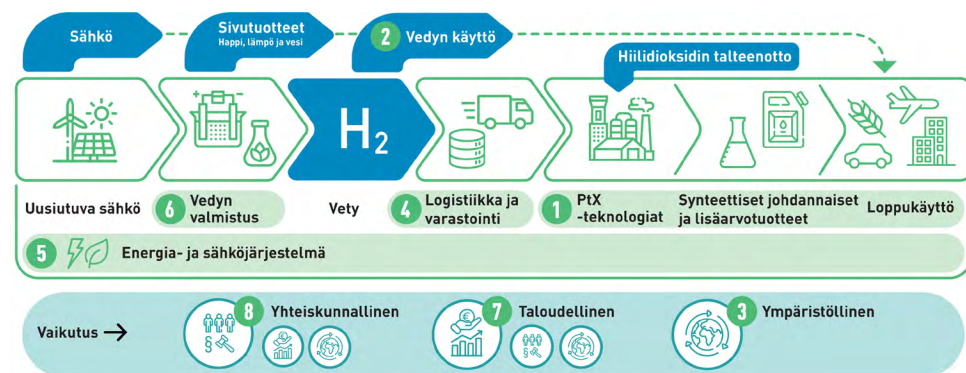
Lisätietoja:

Pertti Kauranen, Professori, LUT Yliopisto, Vetytutkimusfoorumin puheenjohtaja, sähköposti: peritti.kauranen@lut.fi
Petteri Laaksonen, TkT, Tutkimusjohtaja, LUT Yliopisto, sähköposti: petteri.laaksonen@lut.fi
Eeva Lähdesmäki, KM, Projektipäällikkö, LUT Yliopisto, sähköposti: eeva.lahdesmaki@lut.fi
Teemu Tuomisalo, KTT, Tutkija, LUT Yliopisto, sähköposti: teemu.tuomisalo@lut.fi

KANSALLISEN STRATEGISEN VETYTUTKIMUKSEN TARPEET

– SUOMEN VETYTALouden TUTKIMUSTARPEIDEN VERTAILU TEOLLISUUDEN JA TUTKIMUKSEN NÄKÖKULMASTA

Vedyn arvoketju ja tutkimusalueet tärkeysjärjestyksessä



Tutkimustarpeiden ymmärtämiseksi Suomen talouden näkökulmasta on tärkeää tarkastella myös teollisuuden tarpeita tutkimukselle. Teollisuuden näkökulmasta korostuvat käytännönläheiset ratkaisut, jotka tukevat vetytalouden nopeaa kaupallistamista ja kilpailukyyn vahvistamista. Toisaalta tutkimusorganisaatioiden painopisteet liittyvät laajemmin kestävyteen, innovaatioihin ja pitkän aikavälin vaikutuksiin. Yhdistämällä nämä näkökulmat voidaan luoda kattava ja tasapainoinen käsitys siitä, millaista tutkimusta tarvitaan tukemaan sekä teknologian kehitystä että kansantalouden tavoitteita vetytalouden edistämiseksi.

Tutkimustarpeet jakautuvat lyhyen, keskipitkän ja pitkän aikavälin tavoitteisiin.

1-3 vuotta **LYHYT**
3-5 vuotta **KESKIPITKÄ**
5-10 vuotta **PITKÄ**

	Teollisuuden tutkimuksen tarpeet	Teollisuuden ja tutkimusorganisaatioiden näkökulma Suomen vetytalouden tutkimuksen tarpeista	Tutkimusorganisaatioiden tarpeet
1 Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö	-	<ul style="list-style-type: none"> e-metanoli Hiilidioksidin erotusteknologiat 	<ul style="list-style-type: none"> Kestävät lentopolttoaineet (SAF) e-ammoniakki
2 Vedyn käyttö	<ul style="list-style-type: none"> Vedyn käyttöön liittyvä infrastruktuuri 	<ul style="list-style-type: none"> Vedyn hyödyntäminen puhtaiden terästen valmistuksessa Vedyn käyttö moottoreissa ja turbiineissa 	<ul style="list-style-type: none"> Polttokennot ja X-to-power (X2P) syklit ml. RESOC Vedyn käyttö meriliikenteessä
3 Ympäristö ja kestävyys	-	<ul style="list-style-type: none"> Vihreän siirtymän ja vetytalouden ympäristövaikutusten arviointi Elinkaarianalyysi vihreän siirtymän ja vetytalouden eri skenaarioissa 	<ul style="list-style-type: none"> Resurssit ja kriittiset raaka-aineet Teollisuuden muutosten seuraaminen, edistäminen ja tukeminen vetytaloudessa
4 Energian ja vedyn varastointi sekä siirto	-	<ul style="list-style-type: none"> Vedyn varastointi Vetykomponentteihin liittyvä materiaalitutkimus 	<ul style="list-style-type: none"> Vedyn rooli energiavarastona Vedyn putkisiirron turvallisuus Vedyn putkisiirron vertailu muihin vaihtoehtoihin
5 Energia ja sähköjärjestelmä	-	<ul style="list-style-type: none"> Sähkön ja energian varastointi sekä jousto Sähkön ja energian kulutuksen- ja kysynnän jousto 	<ul style="list-style-type: none"> Vedyntuotannon sivuvirtojen hyödyntäminen
6 Puhtaan vedyn valmistus	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysitekniologioiden (alkali/PEM) skaalaus gigawattiluokkaan Alemman valmiustason elektrolyysitekniologioiden (SOEC/AEM) kehitys 	<ul style="list-style-type: none"> Tehokkaiden ja/tai vaihtoehtoisten elektrolyysimateriaalien etsiminen Elektrolyysin energiatehokkuuden parantaminen (alkali ja PEM) 	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysitekniologioiden tuotannollisten rajoitteiden poistaminen (alkali ja PEM)
7 Markkinat ja yhteiskunta	<ul style="list-style-type: none"> Makrotalouden ja Suomen kilpailukyyn seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa 	-	<ul style="list-style-type: none"> Liiketoimintamallien kehityksen seuranta ja tukeminen vihreässä siirtymässä ja vetytaloudessa
8 EU-sääntely ja politiikka	<ul style="list-style-type: none"> EU-sääntelyrakenteen arviointi ja siihen vaikuttaminen 	<ul style="list-style-type: none"> Keskeisen EU-sääntelyn vaikutusarviointi ja siihen vaikuttaminen Suomen vihreän siirtymän ja vetytalouden edistämiseksi 	<ul style="list-style-type: none"> Geopolitiikka ja huoltovarmuus

KANSALLISEN STRATEGISEN VETYTUTKIMUKSEN TARPEET

– SUOMEN VETYTALouden TUTKIMUSTARPEIDEN VERTAILU TEOLLISUUDEN JA TUTKIMUKSEN NÄKÖKULMASTA

PtX-teknologiat muuntavat uusiutuvan sähkön erilaisiksi polttoaineiksi tai kemikaaleiksi, usein hiilidioksidin ja vedyn avulla. Nämä ovat keskeisiä vihreän sähköistymisen teknologioita, jotka voivat korvata fossiiliset polttoaineet ja jalosteet. Vetytalouden arvoketju koostuu vedyn tuotannosta, kuljetuksesta, varastoinnista ja suorakäytöstä. Vedyn tuotanto vaatii puhdasta primäärienergian tuotantoa ja vesivarjoja, ollen tulevaisuudessa olennainen osa energiajärjestelmää.

Tutkimuksen aikajänteet ja tarpeet

Tutkimustarpeet jakautuvat lyhyen (1-3 vuotta), keskipitkän (3-5 vuotta) ja pitkän (5-10 vuotta) aikavälin tavoitteisiin. Lyhyellä aikavälillä korostuvat teollisen soveltamisen pullonkaulojen ratkaiseminen, keskipitkällä aikavälillä teknologioiden kustannuskilpailukyvyyn parantaminen ja pitkällä aikavälillä läpimurtoteknologioiden kehittäminen ja kestävyden arviointi.

Keskeiset tutkimusalueet

- Puhtaan vedyn valmistus: Tehokkaampien elektrolyysijärjestelmien kehittäminen ja kaupallistaminen.
- Energian ja vedyn varastointi sekä siirto: Optimaalisten siirto- ja varastointimenetelmien tutkiminen.
- Vedyn käyttö: Vetytolltokennojen ja puhtaan teräksen valmistuksen kehittäminen.
- Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö: Synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien kehittäminen vedystä.
- Energia- ja sähköjärjestelmä: Energiajärjestelmän sopeutuminen uusiutuviin energialähteisiin ja joustaviin ratkaisuihin.
- Markkinat ja yhteiskunta
- EU-sääntely ja politiikka
- Ympäristö ja kestävyys

Toteutustapa ja tulokset

Teollisuuden näkemys Suomen vetytalouden tutkimustarpeista kartoitettiin yrityksille suunnatun kyselyn avulla. Kysely perustui Suomen tutkimusorganisaatioilta kerättyihin tutkimusaiheisiin, ja sama kysely toteutettiin yrityksille. Yritysten näkökulmasta kyselyyn vastasi 23 suomalaisen yrityksen edustajaa. Kyselyn perusteella korkeimmat keskiarvot ja siten suurin painotus yritysten tutkimusprioriteeteissa liittyivät vedyn synteettisiin lisäarvotuotteisiin ja hiilidioksidin käyttöön sekä puhtaan vedyn valmistukseen.

Seuraavaksi tärkeimpinä tutkimuskategorioina nähtiin vedyn käyttö, energian ja vedyn varastointi sekä siirto, ja energia- ja sähköjärjestelmä kokonaisuudessaan. Yritysten vähäisemmän painotuksen saivat markkinoiden ja yhteiskunnan vaikutusten arviointi sekä ympäristönäkökulmat vetytalouden kestävyden parantamisessa. EU-sääntelyyn ja politiikkaan liittyvät kysymykset olivat yrityksille kaikkein vähiten merkityksellisiä tutkimuksen näkökulmasta.

Vedyn synteettiset lisäarvotuotteet ja hiilidioksidi sekä niiden käyttö nousivat prioriteetissa ensimmäiseksi sekä yliopistojen että yritysten osalta. Vedyn suora käyttö oli myös tärkeä kummankin osapuolen näkökulmasta. Energian ja vedyn varastointi sekä siirto sekä energia- ja sähköjärjestelmä sijoituivat järjestyksessä neljänneksi ja viidenneksi kummankin osapuolen osalta.

Suurimmat eroavaisuudet löytyivät puhtaan vedyn tuotannon sekä ympäristön ja kestävyden kategorioissa. Puhtaan vedyn tuotanto nousi teollisuudessa toiseksi, kun taas tutkimusorganisaatioiden näkökulmasta se oli kuudenneksi tärkein. Ympäristö ja kestävyys oli tutkimusorganisaatioiden kyselyssä kolmanneksi tärkein, kun taas yritysten kyselyssä se oli kahden vähiten pistettä saaneen kategorian joukossa.

Yhteenveto

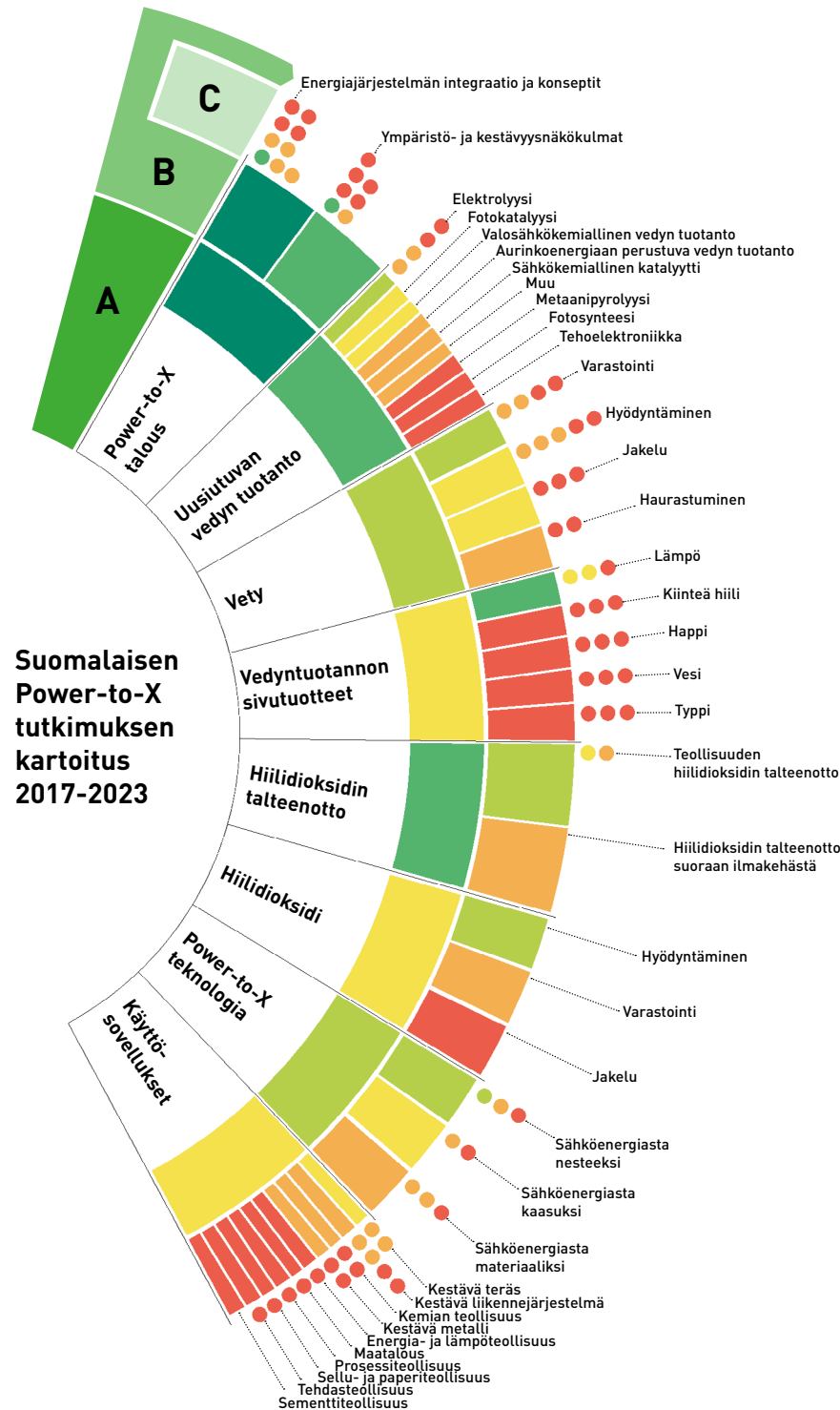
Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka sekä teollisuuden että yliopistojen ja tutkimuslaitosten näkemykset korostavat vetytalouden merkitystä kestäväen ja omavaraisen energiajärjestelmän rakentamisessa, niiden painotukset tutkimuskohteissa eroavat joiltakin osin. Teollisuus korostaa enemmän välittömiä ja käytännönläheisiä sovelluksia, kuten puhtaan vedyn tuotantoa ja synteettisten lisäarvotuotteiden kehittämistä. Tutkimusorganisaatiot puolestaan painottavat laajemmin kestävyttä ja ympäristövaikutuksia, mikä heijastaa akateemisen tutkimuksen pitkäjänteisyyttä ja monialaisuutta.

Lisätietoja:

Pertti Kauranen, Professori, LUT Yliopisto, Vetytutkimusfoorumin puheenjohtaja, sähköposti: pertti.kauranen@lut.fi
Petteri Laaksonen, TkT, Tutkimusjohtaja, LUT Yliopisto, sähköposti: petteri.laaksonen@lut.fi
Eeva Lähdesmäki, KM, Projektipäällikkö, LUT Yliopisto, sähköposti: eeva.lahdesmaki@lut.fi
Teemu Tuomisalo, KTT, Tutkija, LUT Yliopisto, sähköposti: teemu.tuomisalo@lut.fi

SUOMEN VETYTALOUDEN TUTKIMUKSEN KARTOITUS

Power-to-X (PtX) -teknologiat ovat keskeisiä ilmastonmuutoksen torjunnassa ja energian omavaraisuuden lisäämisessä. Tämä yhteenveto tarjoaa katsauksen Suomen PtX-tutkimukseen viime vuosina. Tutkimus perustui bibliometri- seen analyysiin ja kyselyyn suomalaisille tutkimuslaitoksille.



Kategoria A
Tutkimusalueet ja prosessit vetyarvoketjussa

Kategoria B
Vetyarvoketjun tutkimusalueiden tuotteet, teknologiat ja menetelmät

Kategoria C
Vetyarvoketjun teknologioiden ja menetelmien alaluokat ja komponentit

Tutkimuksen tila



Lainsäädännölliset-, materiaali- ja turvallisuusnäkökulmat



Suomen vetytalouden tutkimuksen kartoitus

Power-to-X (PtX) -teknologiat ovat keskeisiä ilmastomuutoksen torjunnassa ja energian omavaraisuuden lisäämisessä. Tämä yhteenveto tarjoaa katsauksen Suomen PtX-tutkimukseen viime vuosina. Tutkimus perustui bibliometriseen analyysiin ja kyselyyn suomalaisille tutkimuslaitoksille. Bibliometrinen analyysi kattoi kaikki Scopus-tietokannan avulla tunnistetut suomalaiset PtX-artikkelit vuosilta 2017-2023. Kyselyyn ja haastatteluihin osallistui 12 suomalaista yliopistoa ja tutkimuslaitosta, mukaan lukien Aalto-yliopisto, Helsingin yliopisto, Jyväskylän yliopisto, Luonnonvarakeskus, LUT-yliopisto, Oulun yliopisto, Tampereen yliopisto, Turun yliopisto, Itä-Suomen yliopisto, Vaasan yliopisto, Teknologian tutkimuskeskus VTT ja Åbo Akademi.

Tutkimuksessa luotiin viitekehys, jonka avulla rajattiin PtX-talouteen liittyvä tutkimus ja luotiin rakenne tulevien tutkimusten tutkimustoiminnalle. Viitekehys koostui kolmesta kategoriasta: pääkategoria A kuvasi tutkimusaiheita ja prosesseja vetyarvoketjussa, kategoria B sisälsi vetyarvoketjun tutkimusaiheiden tuotteet, teknologiat ja menetelmät, ja yksityiskohdaisempi kategoria C sisälsi vetyarvoketjun teknologioiden ja menetelmien alaluokat ja komponentit.

Keskeiset löydökset

Suomen PtX-tutkimuksen painopiste on PtX-taloudessa, erityisesti energiajärjestelmien tutkimuksessa. Ympäristö- ja kestävyysnäkökohdat, erityisesti ilmastomuutos, ovat keskeisiä tutkimusaiheita, ja niitä tutkitaan usein yhdessä energiajärjestelmäintegraation ja -konseptien kanssa. Suosituttuja aiheita ovat myös uusiutuvan vedyn tuotanto elektrolyysin avulla sekä hiilidioksidin talteenotto teollisuuslähteistä. Lisäksi PtX-teknologioiden osalta

e-metanoliin liittyvä tutkimus PtL-teknologioissa on vakiintunutta. Myös vedyn varastointi, hiilidioksidin hyödyntäminen ja vedyntuotannon sivuvirtojen tuottama lämpö ovat vakiintuneita tutkimusaiheita. Tulokset osoittavat, että myös lainsäädäntö- ja materiaalitutkimus ovat merkittäviä osa-alueita Suomen PtX-tutkimuksessa. Lainsäädäntötutkimus on keskittynyt PtX-talouteen yleisellä tasolla, ja materiaalitutkimus painottuu erityisesti uusiutuvan vedyn tuotantoon ja elektrolyysiteknologiaan.

Tulevaisuuden suuntaukset ja tutkimusaukot

Suomen PtX-tutkimuksessa on lukuisia tutkimusaukkoja. PtX-talouden energiajärjestelmäintegraation ja -konseptien osalta on puutteita energiamuutoksen, arvoketjujen ja liiketoimintamallien, elinkaariarvioinnin, huoltovarmuuden, infrastruktuurin, vetylaaksojen, koneoppimisen ja tekoälyn sekä tietotekniikan tutkimuksessa. Ympäristö- ja kestävyysnäkökohdissa on aukkoja vaurauden luomisessa, kiertotaloudessa, biodiversiteetissä, maankäytössä, kestävyudessa ja yleisessä hyväksyttävyydessä.

Uusiutuvan vedyn tuotannossa on puutteita fotosynteesin, aurinkovedyn, PEM-, AEM- ja SOEC-teknologioiden, tehoelektronikan ja metaanipyrolyysin tutkimuksessa. Hiilidioksidin talteenotosta sekä suoraan ilmakehästä että teollisista, erityisesti biogeenisistä, pistelähteistä, on vain vähän tutkimusta. Hiilidioksidin osalta vähemmän tutkittuja aiheita ovat hiilidioksidin varastointi ja siirto.

Vedyn osalta on lukuisia tutkimusaukkoja. Vedyn hyödyntämistä on tutkittu lähinnä lämmöntuotannon osalta, missä vedyn tuotannosta syntyvää lämpöä talteen otetaan ja hyödynnetään. Sen sijaan tutkimusaukkoja on vielä sähkön, polttokennojen, kaasuturbiinien ja polttomootoreiden osalta. Vedyn siirrossa

ei ole lainkaan tutkimusta kompressiosta, putkistoista tai merikuljetuksista. Vedyn varastoinnissa ei ole tutkimusta kaasun, nesteen ja metallin varastoinnista eikä kompressiosta. Vetyhaurastumisen osalta on vain vähän tutkimusta. Vedyntuotannon sivutuotteiden osalta puuttuu tutkimusta kiinteän hiilen, hapen ja typen osalta.

PtX-teknologioiden osalta tutkimus on rajallista. PtL-teknologiassa e-polttoaineiden, PtG-teknologiassa e-ammoniakin ja e-metaanin sekä PtM-teknologiassa e-ruoan ja e-sementin osalta. Käyttösovelluksissa on puutteita kestävässä liikennejärjestelmässä, kestävässä metalleissa, kemianteollisuudessa, maataloudessa, sementtiteollisuudessa, valmistavassa teollisuudessa, prosessiteollisuudessa, paperi- ja selluteollisuudessa sekä sähkö- ja lämpöteollisuudessa.

Lainsäädäntö-, materiaali- ja laatuasioissa on myös merkittäviä tutkimusaukkoja. Lainsäädäntö- ja politiikatutkimus ei ole käsitellyt PtX-talouden ulkopuolisia aiheita, mikä on merkittävä tutkimusaukko. Lisäksi laatu- ja turvallisuusnäkökohdat puuttuvat Suomen PtX-tutkimuksesta. Materiaali- ja raaka-ainetutkimusta voisi laajentaa uusiutuvan vedyn tuotannosta hiilidioksidin talteenottoon ja vetyyn, kuten haurauteen, siirtoon ja varastointiin.

Yhteenveto

Suomen PtX-tutkimus on kehittynyt vahvasti viime vuosina, vaikkakin haasteita on vielä ratkaistavana. Kansainvälinen yhteistyö on merkittävässä roolissa tutkimuksen vaikuttavuuden lisäämisessä. Lisäksi kotimaisten tutkimusorganisaatioiden yhteistyötä ja eri tiedekuntien välistä yhteistyötä tulisi edistää. Tutkimuksen tulokset voivat toimia pohjana kansallisille ja kansainvälisille vertailuille sekä edistää PtX-teknologian kehitystä ja taloutta globaalisti.

Lisätietoja:

Eeva Lähdesmäki, KM, Projektipäällikkö, LUT Yliopisto, sähköposti: eeva.lahdesmaki@lut.fi
Teemu Tuomisalo, KTT, Tutkija, LUT Yliopisto, sähköposti: teemu.tuomisalo@lut.fi