This document is downloaded from the
VTT Research Information Portal
https://cris.vtt.fi

VTT Technical Research Centre of Finland

Biokaasun jalostusarvon parantaminen vetyrikastuksen avulla

Lappalainen, Mikko; Kauppinen, Juho; Rasi, Saija; Kiviranta, Kirsikka

Published: 31/08/2023

Document Version
Publisher's final version

Link to publication

Please cite the original version:
Lappalainen, M., Kauppinen, J., Rasi, S., & Kiviranta, K. (2023). *Biokaasun jalostusarvon parantaminen vetyrikastuksen avulla*. HABA project.

VTT
https://www.vttresearch.com

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
P.O. box 1000
FI-02044 VTT
Finland

By using VTT Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.

Download date: 07. Feb. 2026

Biokaasun jalostusarvon parantaminen vetyrikastuksen avulla

Mikko Lappalainen (VTT), Juho Kauppinen (VTT),
Saija Rasi (Luke), Kirsikka Kiviranta (VTT)

2023

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Sisältö

- Tavoitteet
- In-situ vetyrikastus
- VTT:n H_2-syöttölaitteisto
- Vetysyöttökokeet
- Kustannustarkastelu
- Yhteenveto

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Tavoitteet

- Työn tavoitteena on suorittaa laboratorio- ja pilot-kokoluokan vetyrikastuskokeita, joissa selvitetään vedyn reagointia metaaniksi yhdessä biokaasussa olevan hiilidioksidin kanssa

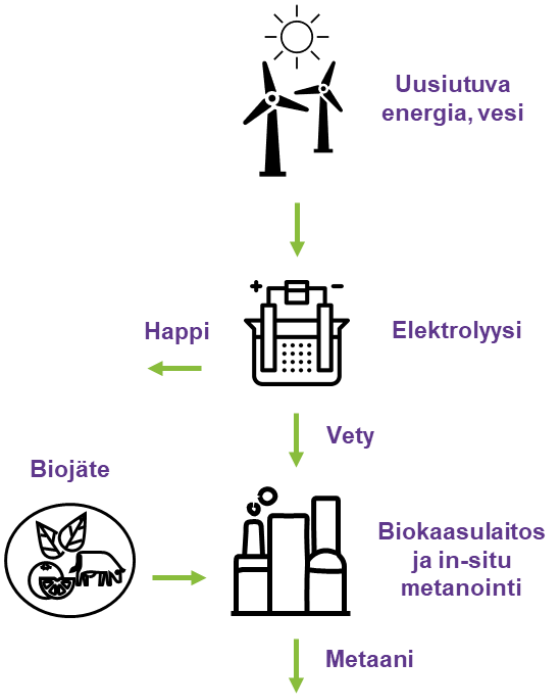
- Kokeiden perusteella suunnitellaan myös mahdollisesti parempiin konversioasteisiin tähtääviä ratkaisuja

- Hankkeen aikana on toteutettu labrakokoluokan kokeet, sekä pilot-kokoluokassa vedynsyöttölaitteiston suunnittelu, investointi, asennus ja testaus sekä vedynsyöttökokeet rakennetulla pilot-laitteistolla, sekä tulosten analysointi ja raportointi

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vedyn in-situ metanointi

- Uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyessä, energian erilaiset varastointiratkaisut tulevat entistä suurempaan rooliin
- Vedyn biologinen metanointi perustuu Sabatier –prosessiin
  - $4H_2 + CO_2 = CH_4 + 2H_2O$
- Biologisesta in-situ metanoinnista puhutaan, kun vetyä syötetään biokaasureaktoriin
  - Reaktorissa olevat metanogeenit hyödyntävät vedyn metaaniksi yhdessä prosesissa syntyvän hiilen kanssa
  - Ex-situ prosessista puhutaan, kun biologisessa prosessissa käsitellään vety- ja hiilidioksidi (tai –monoksidi) kaasua erikseen
- Kun hiilidioksidista ja vedystä tuotetaan metanoinnin avulla lisää biometaania, fossiilisia polttoaineita korvaavan biometaanin määrä kasvaa
  - Tämä voi tarkoittaa lisää tuloja biometaanin tuottajalle
- Prosessin tehokkuuteen vaikuttavat mm. vedyn osapaine, prosessin lämpötila sekä reaktorirakenne



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

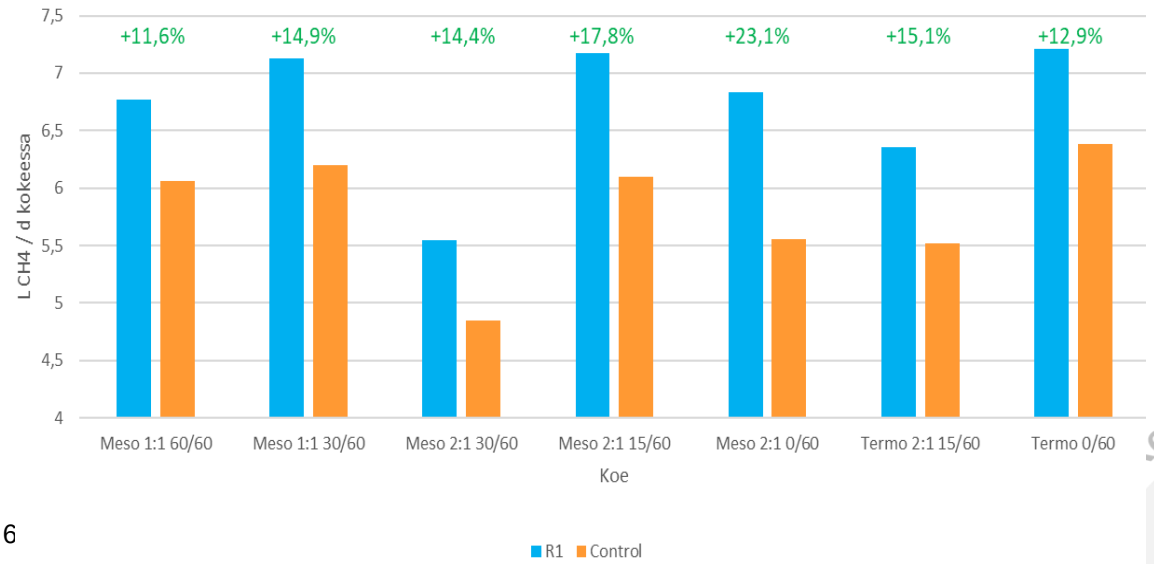
In-situ metanointi laboratoriomittakaavassa

- Kokeessa käytettiin jatkuvasekoitteisia reaktoreita (CSTR), joiden syötteenä erilliskerättyä biojätettä
  - Mesofiilinen ja termofiilinen lämpötila
  - HRT noin 20 päivää
  - Alhainen ORL jotta prosessi pysyisi tasaisena
- Vedyn syöttö testattiin erilaisilla parametreilla
  - Vedyn määrä 1:1 sekä 2:1 verrattuna CO_2 tuotantoon referenssi reaktorissa
  - Sekoitussuhteet 60/60 sekuntia (pois ja päällä), 30/60 sekä jatkuva sekoitus
- Lisäksi testattiin tuotetun kaasun kierrätystä prosessiin

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Tulokset laboratoriokokeista

- Kaikilla parametreilla tuotettu metaanimäärä oli suurempi testireaktoreissa, kuin referenssissä
- Jatkuva sekoitus tehosti metanointia
- Kaasun kierrätystä testattiin lyhyellä kokeella
  - Vetypanoksen kulutuksessa kului 3 päivää
    - 1 ajo, 55% vedystä kulutettu, syöttöaika 8h
    - 2 ajo, 80% jäljellä olevasta vedystä kulutettu, syöttöaika 22h
    - 3 ajo, 100% jäljellä olevasta vedystä kulutettu, syöttöaika 22h



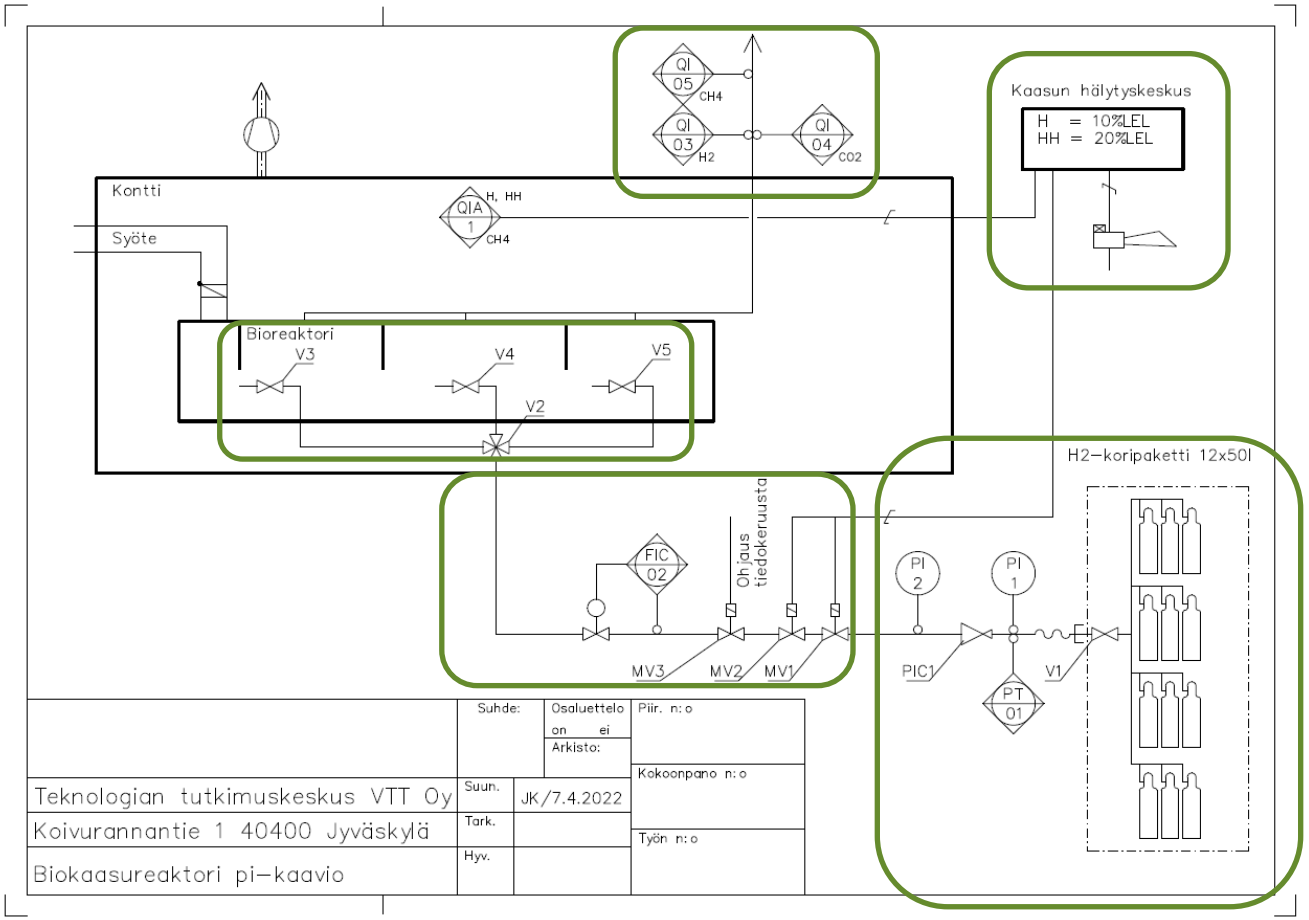
estävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

VTT:n pilot-kokoluokan H_2-syöttölaitteisto

- Tavoitteena oli rakentaa **yksinkertainen** ja **pienillä investointikustannuksilla** saatava vetysyöttölaitteisto, jonka voi **integroida olemassa olevaan biokaasureaktoriin** pienillä muutoksilla.
- In-situ -vetyrikastuksen etuna ex-situ -menetelmään verrattuna voidaan nähdä pienemmät investointikustannukset
- Kirjallisuuden perusteella in-situ menetelmän haasteena tiedettiin oleva vedyn huono konversioaste biomassassa olevan hiilidioksidin kanssa. Vety kulkee helposti reagoimattomana ulos tuotekaasuihin sillä sen liukenevuus veteen on heikko.
- Erityisen tärkeä lähtökohtana H_2-syöttölaitteiston suunnittelussa ja toteutuksessa oli turvallisuus, sillä vety on ominaisuuksiltaan erityisen herkästi vuotava ja syttyvä kaasu.
- Vedynsyöttö haluttiin saada etäohjattavaksi, jotta prosessia pystyttäisiin seuraamaan ja säätämään myös muualta kuin paikanpäältä.
- Mittauksista haluttiin myös saada tallennettua data jatkuvasti ja automaattisesti.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttölaitteisto PI-kaavio



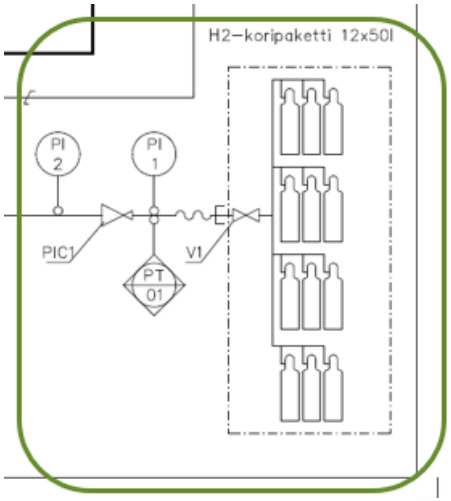
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttölaitteisto

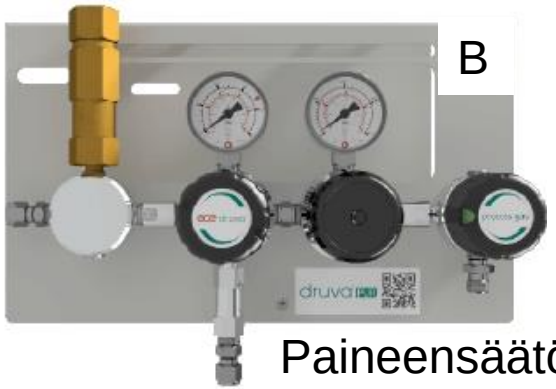
- Pilot-kokeissa vety saatiin prosessiin vetykoripaketista (A)
- Paine alennettiin 2 bar tasolle paineensäätöpaneelissa (B).
- Paineeksi valittiin mahdollisimman pieni arvo, jolla massavirtasäätimen ja syöttösintterien toiminta oli hyvällä tasolla
- Painelähettimestä (C) saatiin tieto koripaketin painetasosta eli paljonko vetyä on jälellä.



Woikoski

Vetykoripaketti

Painelähetin



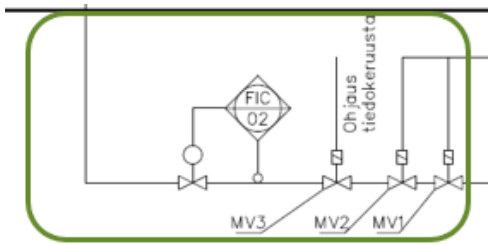
Paineensäätöpaneeli

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttölaitteisto

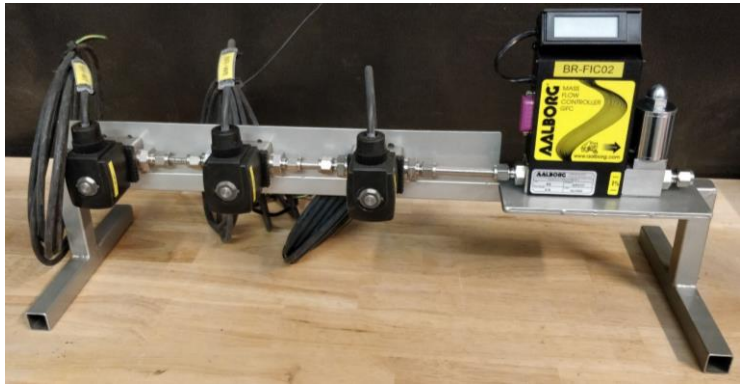


- Koripaketilta vety siirtyi haponkestävää teräsputkea (⌀ 6mm) pitkin ennen massavirtasäädintä oleville magneettiventtiileille.

- Kaksi ensimmäistä venttiiliä toimivat turva-automaation ohjaamana. Normaalitilanteessa ne olivat auki ja vety pääsi kulkemaan kolmannen venttiilin taakse, jota ohjattiin etäohjaus-järjestelmästä. Mikäli biokaasukontissa olisi havaittu metaani/vetyvuoto tai hätäseisnappi olisi painettu alas, automaatio olisi sulkenut kaksi ensimmäistä venttiiliä (tuplavarmistus).

- Vety kulkeutui massavirtasäätimelle, jos magneettiventtiili avattiin etäohajusjärjestelmästä. Massavirtasäätimen vedynsyöttöalue oli 0 – 10 Nl/min. Tämä alue valittiin aiempien kokeiden tuotekaasutuotannon perusteella. Tällä syöttökapasiteetilla pystyttäisiin myös teoreettiseen maksimaaliseen 4:1 (H_2:CO_2) syöttösuhteeseen. Todelliseksi alarajaksi huomattiin noin 0,5 Nl/min.

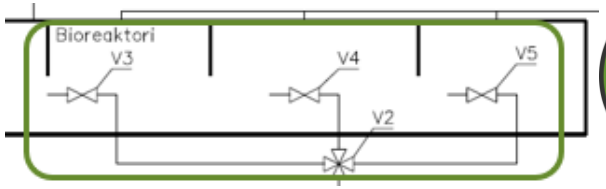
- Massavirtasäätimen ohjaus tapahtui etäohjausjärjestelmän kautta. Ohjaus- ja säätöarvojen data tallennettiin jatkuvasti.



Magneettiventtiilit (Burkert)
massavirransäädin (Aalborg)

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

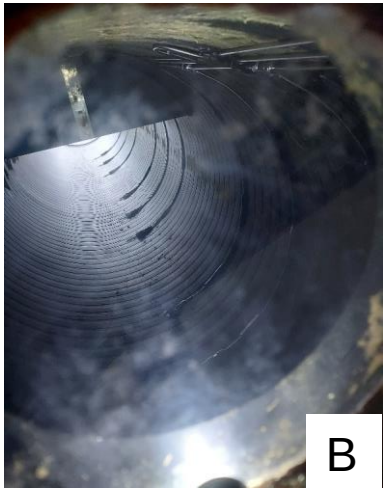
Vetysyöttölaitteisto



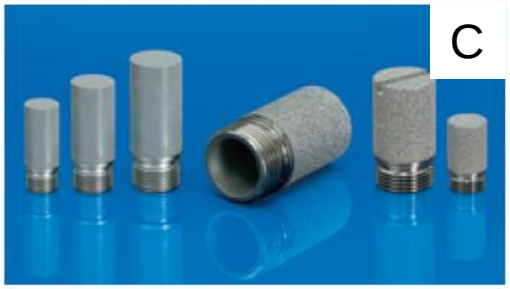
HABA

- Massavirtasäätimeltä syöttöputkistlinja jatkui syöttökammion valintaventtiileille (A), josta voitiin valita mihin osastoon/osastoihin vety syötetään.
- Valintaventtiileiltä putkisto on viety reaktorin sisään (B). Jokaiseen osastoon menevä linja haarautuu kolmeen osaan, joiden päässä on metallisintrattu huokoinen putki (C).
- Sintterin (SIKA-R1 AX, AISI 316L) pinta on niin tiheä, että neste ei pääse sen läpivetyputkeen hydrostaattisella paineella, vaikka kaasuvirtausta ei olisi.
- Tiheällä 1 µm huokoskoolla tavoiteltiin mahdollisimman pientä vedyn kuplakokoa, jolloin konversioaste olisi oletettavasti myös parempi.

Reaktoriosaston valintaventtiilit



Reaktorin sisään vedetyt syöttölinjat



SIKA-R1 AX, AISI 316L sintteri

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttölaitteiston kaasuanalysaattorit

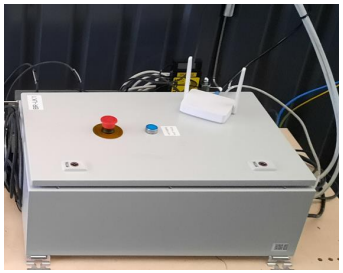
- **Reaktoriin syötön jälkeen vety kulki biomassan läpi osittain reagoiden metaaniksi, mutta suurilta osin se kuitenkin päätyi tuotekaasuihin.**
- **Tuotekaasut poistuivat jokaisesti reaktorin osastosta omaa linjaa pitkin ensin virtausmittareille ja sitten kaasuanalysaattoreille.**
- **Kaasuanalysaattorit sijoitettiin kontin ulkopuolelle, sillä ne eivät olleet ATEX-laitteita. Niille virtaavalle tuotekaasulle rakennettiin myös linjastot valintaventtiileillä, joiden avulla voitiin määrittää, minkä osastonjen kaasut menivät analysaattoreille.**
- **Bluesens-BCP –sensorit H_2-, CO_2- ja CH_4-kaasuille olivat sarjassa (A).**

A

	H_2	CO_2	CH_4
Metodi	TCD	IR	IR
Alue (%)	0 – 50	0 – 50	0 – 100
Tarkkuus (%)	± 3,1	± 3,1	± 3,2

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttölaitteiston automaatio ja datankeruu



Keskus

AWS

S3

Azure SQL-tietokanta

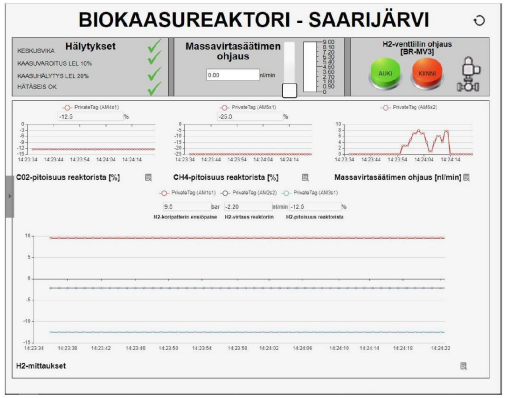
Kaasumittaukset
H_2, CH_4, CO_2

Kaasuhälytykset

H_2-syötön ohjaus

Hätäseis

Websivu
Etäohjaus



Power BI / Raportti

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Datankeruu ja pilvipalvelut

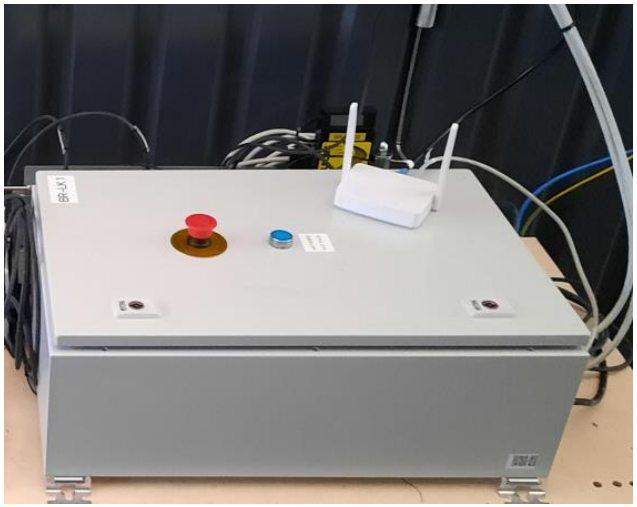
- Kerätty data säilötään ensin Amazon Web Services (AWS) pilvipalvelussa, johon logiikka päivittää datan aikaleiman kanssa WORD –muotoisena muutosten tapahtuessa. Tätä kautta päivitetään myös nettisivun lähettämä data.

- AWS repositoriosta data siirtyy pitkäaikaista säilytystä varten Amazonin sisällä S3 bucket –tietokantaan edelleen samassa muodossa.

- S3-bucketista data siirretään Microsoftin Azure palvelun SQL-tietokantaan, jolloin datan siirto PowerBI-sovellukseen on paremmin yhteensopiva kannan kanssa. SQL-tietokannassa data muutetaan integer-muotoon ja data siivotaan ylimääräisistä muuttujista pois.

- Data on abstraktia ulkopuolisille koko ketjun ajan, vaikka ulkopuolinen pääsisikin käsiksi tietokantaan.

- Dataa voi tarkastella PowerBI-sovelluksessa tai ladata csv-tiedostona jatkokäsittelyyn.



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

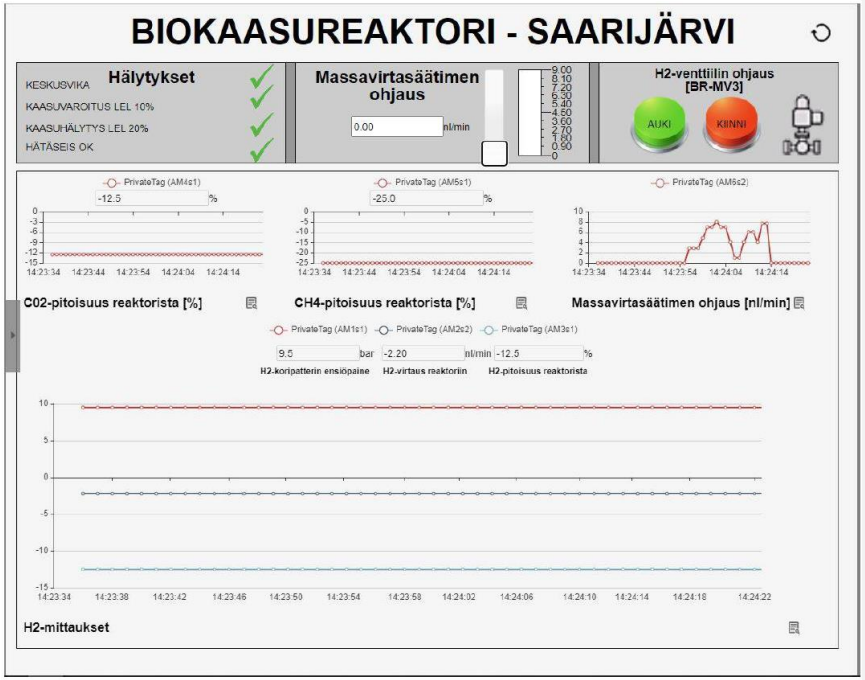
Etäohjausjärjestelmä

- Etäohjausjärjestelmällä oli mahdollista ohjata vetysyöttöjärjestelmään liitettyjä rele- ja analogialähtöjä, sekä seurata laitteistoon liitettyjä analogisia ja digitaalisia mittauksiatuloja.

- Ohjauslähdöt olivat analoginen massavirtasäätimen ohjaus (Nl/min) ja relelähtö magneettiventtiilin ohjaukselle (kiinni/auki).

- Mittauksista oli analogiatulot vetykoripatterin paineelle (bar), vetyvirtaukselle (Nl/min), H_2-, CO_2- ja CH_4-pitosuuksille (%).

- Mittauksista digitaaliset tulot olivat keskusvika, kaasuvaroitus LEL 10%, kaasuvaroitus LEL 20% ja hätäseis OK tapahtumille.



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

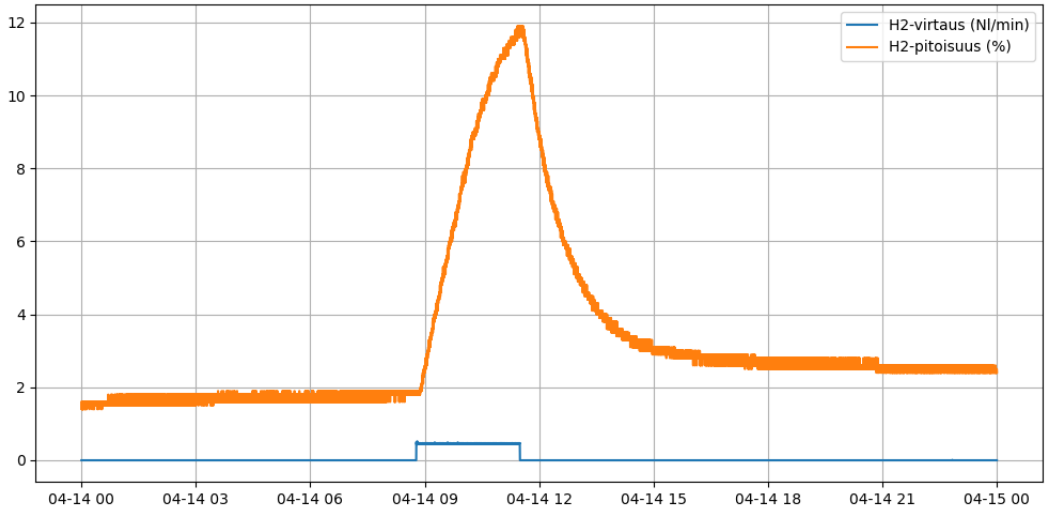
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttökokeet

- Vedynsyöttö aloitettiin 14.4.2023 pieninä määrinä pulsseittain, jotta voitiin tarkastella laitteiston toimintaa ja mahdollisia vetyvuotoja. Vedyn syöttömäärä pidettiin alussa maltillisena, jolloin mikrobiston annettiin adaptoitua vähän kerrallaan ylimääräiselle vedylle. Adaptaation myötä vedyn hyödyntämisen odotettiin paranevan.

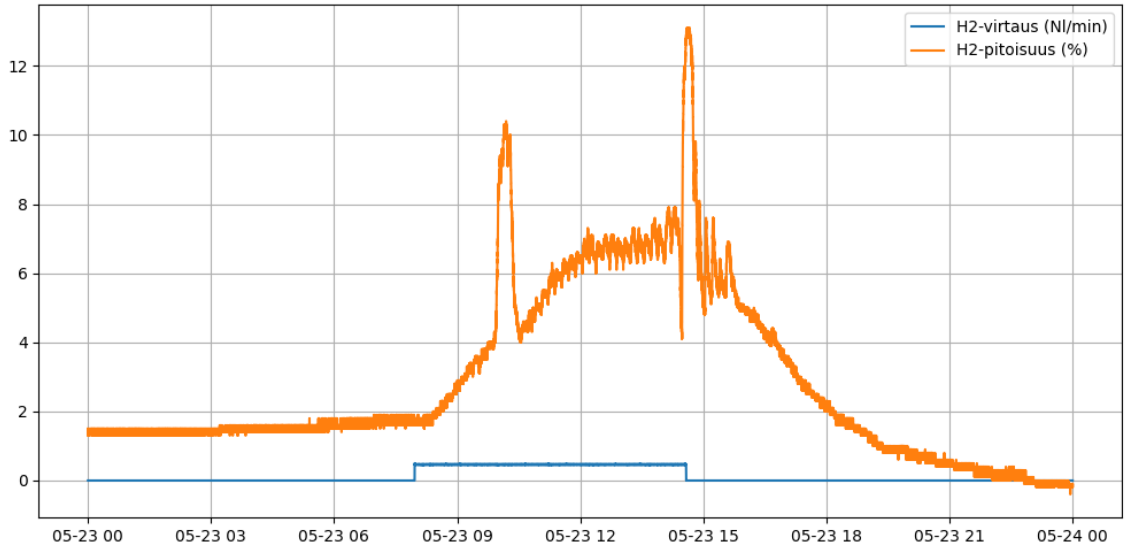
- Alla kuvaaja ensimmäisestä 3h jaksosta 0,5 Nl/min vetysyötöllä. Noin 10 min kuluttua syötön aloituksesta, vety havaittiin tuotekaasussa. Vedyn konsentraatio lähti myös jyrkkään kasvuun kunnes vetysyöttö suljettiin ja konsentraatio alkoi nopeasti laskea. Vetytaso jäi kuitenkin hieman lähtötasoa korkeammaksi.



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttökokeet tasainen syöttö

- Alla olevassa kuvaajassa on 7h syöttöjakso 0,5 Nl/min vetyvirtauksella. Vetypitoisuus tuotekaasussa nousi jatkuvalla syötöllä lähelle syötettävän vetymäärän ja prosessin tuottaman muun kaasun suhdetta useamman tunnin kuluessa.
- Vetypitoisuudessa esiintyi myös melko suuria hetkellisiä heilahduksia. Noin 10 min välein esiintyvät heilahdukset johtuivat sekoittimen pyörähdyksistä, jolloin tuotekaasuja vapautui ilmeisesti massasta enemmän.

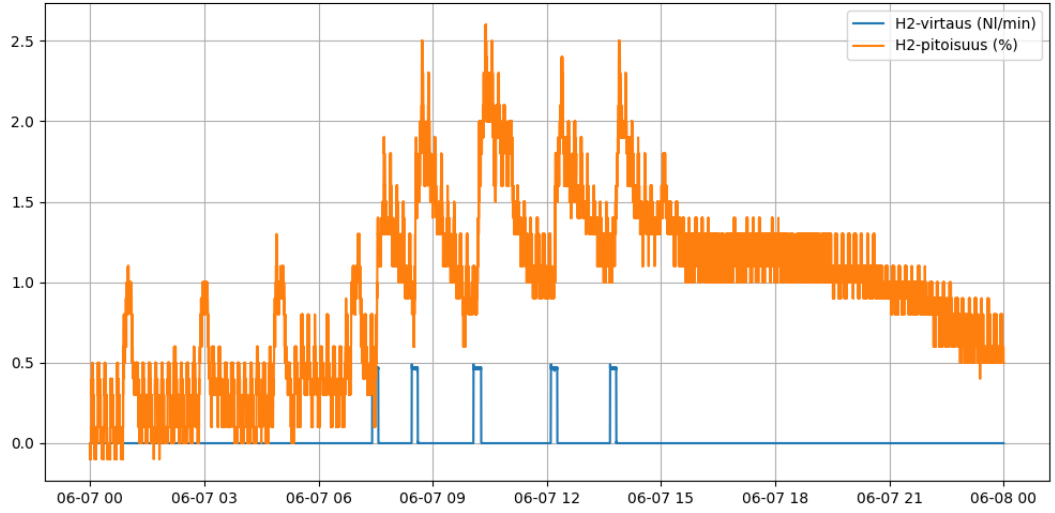


Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttökokeet lyhyillä syötöpulsseilla

- Paremman vedyn konversioasteen saavuttamiseksi tehtiin testejä lyhyillä vetysyöttöpulsseilla. Vetyä syötettiin reaktoriin, kunnes vetypitoisuus alkoi nousta tuotekaasussa ja tällöin syöttö lopetettiin. Kun vetypitoisuus oli laskenut lähelle alkutilannetta, syöttöä jatkettiin.

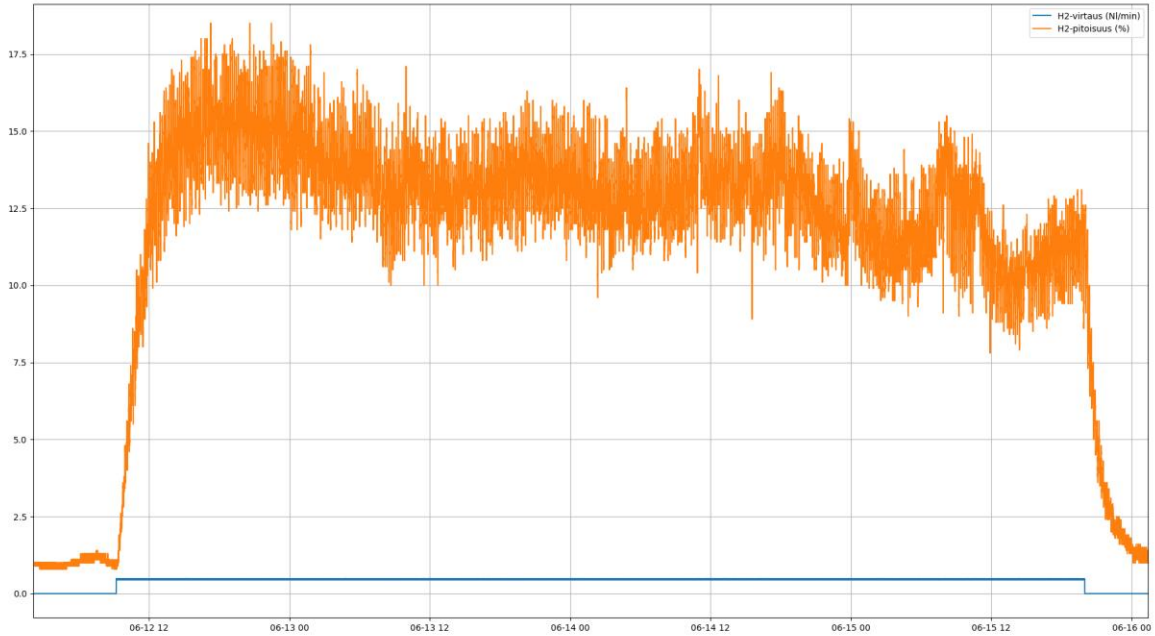
- Kyseisellä syöttötavalla vedyn hukkaa voitiin minimoida. Syötettävän vedyn määrä jäi kuitenkin pieneksi. Pulssittainen syöttö vaikuttaa kuitenkin potentiaaliselta syöttötavalta, varsinkin ilman kaasunkierrätystä, jolla hukkavety saataisiin takaisin reaktoriin.



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vetysyöttökokeet jatkuvalla syötöllä

- Viimeisellä koeviikolla syötettiin 0,5 Nl/min jatkuva vetyvirtaus reaktoriin.
- Vetypitoisuus kaasussa nousi ensimmäisen vuorokauden aikana 15 % tasolle, mutta laski noin 10 % tasolle. Kokonaiskaasuntuotantoon suhteutettuna syötetystä vedystä saatiin hyödynnettyä prosessiin 9 – 22 %.
- Vetypitoisuuden vaihtelut vaikuttivat tasaantuvan viikon aikana.



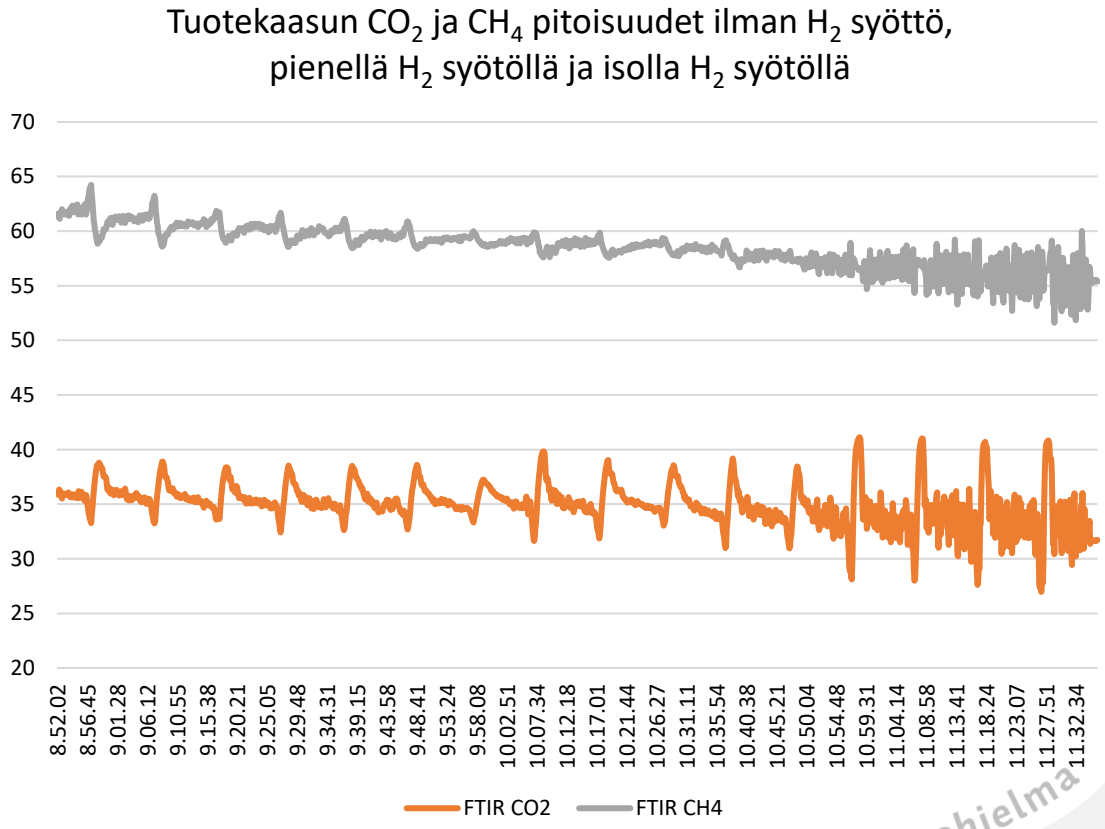
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

FTIR-mittaus tuotekaasuista

- Koska jatkuvatoimisten Bluesens-mittareiden epätarkkuuden vuoksi, käytiin prosessia mittaamassa FTIR-mittalaitteella, jolla päästiin parempaan tarkkuuteen CH_4 ja CO_2 kaasujen konsentraatioista.
- Kuvassa oikealla näkyy mittaus tuotekaasuista. Piikit kaasujen trendeissä ovat sekoittimen pyörähdyksen ajoilta.
- Alussa ilman H_2 syöttöä CH_4 62% ja CO_2 36% tasolla.
- Kun H_2-syöttö aloitetaan alkaa CH_4 taso pudota enemmän ja CO_2 taso maltillisemmin.
- Lopussa kun H_2-syöttö nostetaan isommaksi, alkaa mittaukset heilua enemmän.



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Havaintoja vetysyöttölaitteistosta ja kokeista

- Syöttölaitteisto saatiin rakennettua yksinkertaiseksi ja turvalliseksi. Vedynsyötöstä ei aiheutunut hälytyksiä eli vuotoja ei ilmennyt. Myöskin yhteydet etäjärjestelmään pysyivät kunnossa ja datan keruu onnistui. Vety saatiin syötettyä halutulla tilavuusvirralla reaktoriin ja tuotekaasujen mittaus antoi tietoa prosessin tilasta.

- Suurempi määrä mittauksia kuitenkin helpottaisi prosessin seurantaa ja vedynsyötön vaikutuksia. Etäohjausjärjestelmään lisättäviä mittauksia esim. kammiokohtaiset painemittaukset, tuotekaasun virtausmittaukset, pH-mittaus, sekoittimen tilannetieto/ohjaus, sekä muut mädätteen syöttöön, poistoon ja koostumukseen liittyvät mittaukset.

- Automaattisen ohjauksen lisääminen vedyn syöttöön voisi olla hyödyllistä, sillä vedyn pulssittainen syöttö vaikuttaa potentiaalisesti järkevimmältä tavalta, mutta tällä hetkellä manuaalisesti tapahtuva ohjaus ei soveltunut kyseiseen ohjaukseen pitkällä aikavälillä. Myös lisämittauksista saatava tieto voisi ohjata syötettävän vedyn määrää automaattisesti ja ennakoivasti pitäen prosessin optimaalisessa tilassa.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Havaintoja vetysyöttölaitteistosta ja kokeista

- Reaktoriin syötetty vety havaittiin nopeasti tuotekaasussa, noin 10 min päästä syötön aloituksesta. Samoin syötön lopetus havaittiin nopeasti tuotekaasun koostumuksessa. Kokeet aloitettiin pienellä syötöllä, mutta vetyä havaittiin silti suhteellisen paljon tuotekaasussa ja konversioaste jäi pieneksi. **Suhteellisen pienikin määrä vetyä virtaa kokeissa käytetyn reaktorin ja syötemassan läpi, jolloin viiveaika jää lyhyeksi**.

- Pidemmissä, vedyn jatkuvan syötön kokeissa, vedyn konversio vaihteli 9 – 22 % välillä. Luvut perustuvat syötetyn ja tuotekaasusta mitatun vedyn arvoihin. Spekuloitavaksi jää, olisiko prosessi tasaantunut tai konversioaste parantunut pitemmän koejakson aikana. Mahdollisesti myös prosessi olisi voinut alkaa inhiboimaan runsaan vetypitoisuuden vuoksi pitemmällä aikavälillä.

- Koska referenssireaktoria ei ole pilot-kokoluokassa helposti järjesteltävissä, edellisellä kalvolla mainitut lisämittaukset antaisivat varmuutta prosessin tilasta, jolloin voitaisiin paremmin ymmärtää mitkä muuttujat vaikuttavat prosessin muutoksiin eri tilanteissa.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Mädätyksen vetyrikastus - kustannustarkastelut

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Tarkasteltavat kohteet

- Vetyrikastuksen taloudellista kannattavuutta arvioidaan erilaisissa markkina- ja toimintaympäristössä
  - Vedyn avulla tuotetun ”lisä”biometaanin arvoa verrataan tuotantokustannuksiin
- Laskennassa otetaan huomioon kaksi eri kokoluokan biokaasulaitosta, mikä mahdollistaa vetyrikastuksen taloudellisen kannattavuuden arvioinnin eri kokoluokissa
  - Laitos 1 kuvaa **suuren maatilan biokaasulaitosta**
  - Laitos 2 kuvaa **kunnallista biokaasulaitosta**
- Esimerkkilaitosten lähtödatat on esitetty oheisessa taulukossa

Parametri	Laitos 1	Laitos 2
	Suuri maatila	*Kunnallinen biokaasulaitos*
Raaka-aine (t/v)	Naudan lietelanta 10 000 + säilörehu 1 000	Biojäte 14 000 + vesi 5 600 + mädätteen nestejae 10 900
Raakabiokaasun tuotanto (m^3/d)	980	6 650
CH_4-vol% (ennen metanointia)[1]	60%	60%
Tuotettu hiilidioksidi (tCO_2/a)	280	1 900
Biokaasulaitoksen lämmöntarve[2] (MWh/a)	360	680

Laskennassa käytettyjen esimerkkilaitosten lähtödatat.
[1] Oletetaan, että loppuosa on hiilidioksidia
[2] Reaktorin lämmintarve

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Hiilidioksidin ja vedyn konversio

- Perustuen hankkeessa tehtyyn kirjallisuuskatsaukseen, laskennassa tuotekaasun CH_4-pitoisuuden oletetaan nousevan kohdelaitoksella 60 %:sta 80 %:iin, jolloin biokaasussa olevan **hiilidioksidin konversioasteeksi saadaan 50%**
  - Tässä yhteydessä konversioaste viittaa siihen, kuinka suuri osa hiilidioksidista muuntui metaaniksi
- Laskennassa hiilidioksidin metanointiin vaadittava vetymäärä laskettiin 4:1 H_2/CO_2 moolisuhteella perustuen Sabatier-reaktioon
- **Vedyn konversioasteeksi oletettiin 100%,** joka voisi olla mahdollista esim. vedyn kierrätyksen avulla
  - Käytännössä vedyn konversioasteeseen vaikuttaa moni tekijä, kuten biokaasun sekoitus ja vedyn syötön syklittäisyys
  - Kaasunkierron edellyttämä pumppausenergia ja investointi on arvioitu vähäiseksi suhteessa elektrolyysilaitteen investointiin ja sen tarvitsemaan energiaan, joten siksi vedynkierron kustannuksia ei ole huomioitu laskelmissa
- Oletetaan, että uutta investointia biokaasun jalostuslaitteistoon ei tarvitse tehdä, sillä vetyrikastusyksikkö integroidaan jo olemassa olevaan biokaasulaitokseen, jossa biokaasua jalostetaan biometaaniksi
  - Metanointi ei kasvata biokaasun jalostuslaitteiston investointikustannuksia, koska raakakaasun tilavuus pysyy samana ja vain metaanipitoisuus kasvaa (toisin sanoen samasta raakakaasumäärästä saadaan jalostettua enemmän biometaania)

Sabatier-reaktio

$$4\,H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2\,H_2O$$

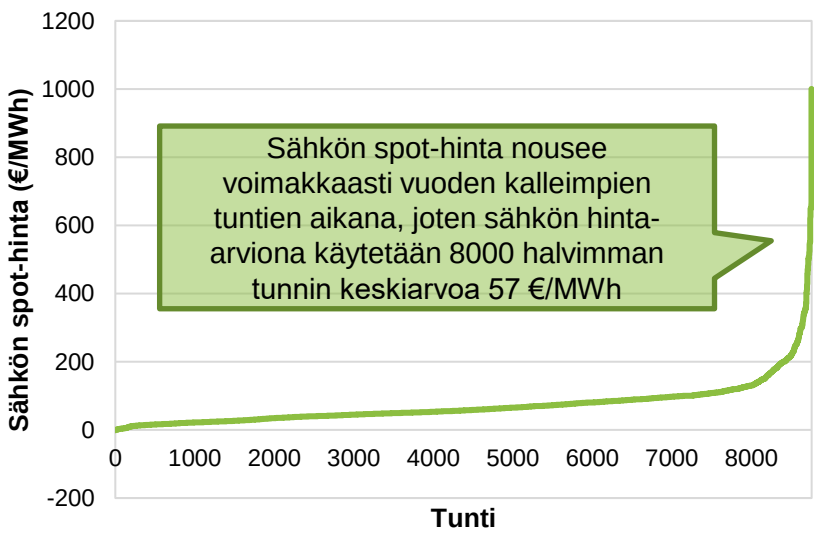
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Elektrolyyseri ja sähkö

- Elektrolyysin kapasiteetti mitoitettiin niin, että se voi tuntitasolla tuottaa tarvittavan määrän vetyä hiilidioksidin metanointia varten
  - Arvioitu vuotuinen **elektrolyyserin käyttöaika on 8000 tuntia**: vetyä ei tuoteta sähkön kalliimpien tuntien aikana, mitoitus ei välttämättä edusta optimaalisinta vaihtoehtoa
- Sähkön hinta-arviossa hyödynnetään Suomen **vuoden 2021 spot-hintatietoja**
  - Huomioon otetaan myös sähkön siirron kustannukset ja Verot, oletuksena sähköveron osalta veroluokka II
  - Koska sähkön spot-hinnat ovat vaihdelleet viime vuosina, lasketaan myös skenaario, jossa sähkön hintana käytetään vuoden 2020 keskiarvoa 24 €/MWh
- Lasketaan myös skenaario, jossa elektrolyyserin saadaan **investointituki**
- Elektrolyyserin lisäksi tarvitaan vedynsyöttölinjasto elektrolyyseristä biokaasureaktoriin
  - Investointikustannus oletetaan pieneksi suhteessa elektrolyyserin investointikustannukseen

Parametri	Arvo
Investointikustannus	1050 €/kW [2]
Lainan laskennallinen korkokanta	5%
Laitoksen pitoaika	20 vuotta
Skaalauskerroin	0.85
Elektrolyyserin operointikustannus	50 €/(kg H_2/d)/a [1]
Elektrolyyserin operointitunnit	8000 h/a
Elektrolyyserin sähkönkulutus	50 kWh/kgH_2 [1]
Sähkön hinta	57 €/MWh
Sähkön siirto ja verot	16 €/MWh
Veden hinta	1.7 €/t
Elektrolyyserin investointituki	Laitos 1: 50% Laitos 2: 30%

Elektrolyyserin ja sähkön kustannusparametrit lähtötilanteessa.



Sähkön spot-hinnan pysyvyyskäyrä vuonna 2021.

Elektrolyyserin sivutuotteet

- Elektrolyysissä syntyy matalalämpötilaista (~60-70 °C) hukkalämpöä, joka voidaan mahdollisesti hyötykäyttää biokaasulaitoksella tai sitä ympäröivissä rakennuksissa
  - Hukkalämmön hyödyntämispotentiaali riippu mm. laitosten lämmöntarpeen kausi- ja vuorokausivaihteluista ja muista lämmöntuotantotavoista
- Tarkasteltavien biokaasulaitosten vuotuisen lämmöntarpeen perusteella **maatilakokoluokan laitoksella 100% ja kunnallisen biokaasulaitoksella 75% tuotetusta hukkalämmöstä hyödynnetään** reaktorin lämmityksessä korvaten kaukolämpöä (80€/MWh)
- Elektrolyysin sivutuotteena syntyy myös happea
  - Happen arvoksi on oletettu 0€/t, sillä pienillä volyymeillä sille voi olla vaikea löytää ostajaa

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

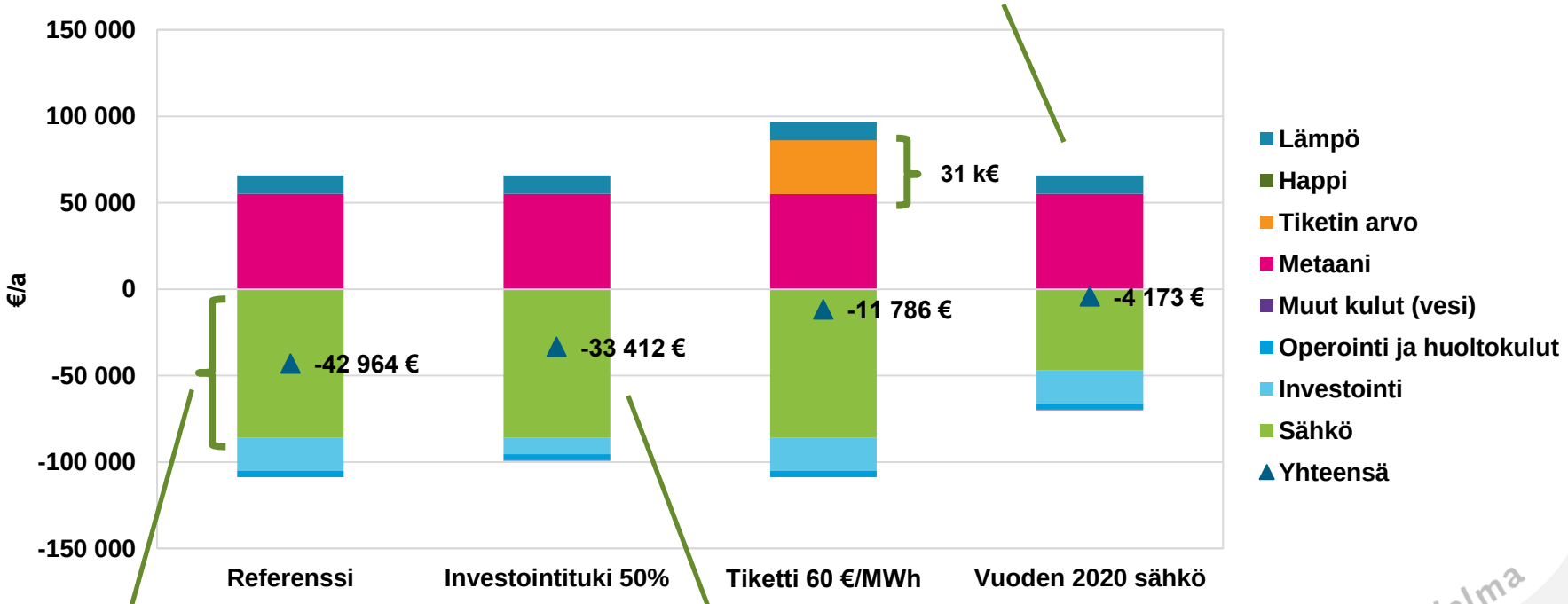
Biometaanin ja tiketin arvo

- Laskennassa oletetaan, että **biometaanin tuottaja myy kaiken tuotetun biometaanin liikennekäyttöön**
- Oletusarvona biometaanin pumppuhinnalle on käytetty nykyistä markkinahintaa 1.7 €/kg, alv. 24% (n. 126 €/MWh)
- Pumppuhinnasta vähennetään arvonlisä- ja valmisteverot, jolloin biometaanin arvo tuottajalle on noin **85 €/MWh**
  - Vähennettävä valmistevero on korkeintaan 16.884 €/MWh
- Tikettikaupan osalta lasketaan skenaario, jossa **80% myydystä biometaanista voidaan myydä tiketteinä** muille toimijoille
  - Oletuksena on, että jakeluvelvoite on 20%, jolloin biokaasun jakelija (tuottaja) täyttää 20%:lla omaa jakeluvelvoitettaan
- Tiketin myyntihintana käytetään **60 €/MWh** perustuen Afryn (2020) arvioon tiketin hinnasta (60-65 €/MWh) [1]
  - Tiketin todellinen arvo riippuu tiketin myyjän ja ostajan kahdenvälisistä sopimuksista

Maatilakokoluokka: kustannusjakauma

Vuoden 2020 sähkön hinnalla kannattavuus paranee huomattavasti: mikäli tuloja saataisiin vielä tikettikaupasta (+30 k€), kannattavuus paranisi merkittävästi

Parametri	Arvo
Tuotettu lisämetaanin määrä	650 MWh/a
Elektrolyyserin kapasiteetti	147 kW_e
Vedyn vuosituotanto (8 000h)	23.5 t/a
Elektrolyyserin sähkönkulutus	1 180 MWh/a
Tuotettu hukkalämpö	135 MWh/a



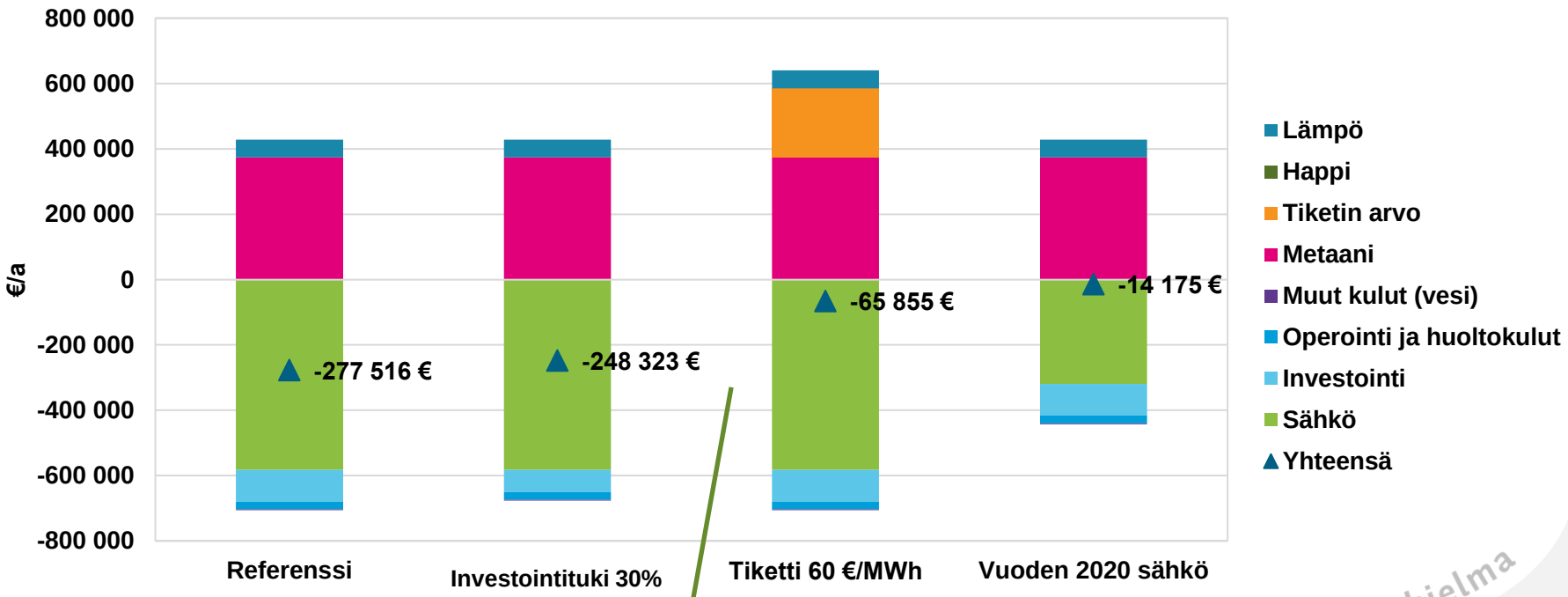
Elektrolyysin tarvitsema sähkön on suurin yksittäinen kustannustekijä

Lähtöarvo-oletuksia käyttäen, vetyrikastus ei ole kannattavaa, vaikka elektrolyysilaitteisto saisi 50%:n tuen

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Kunnallinen biokaasulaitos: kustannusjakauma

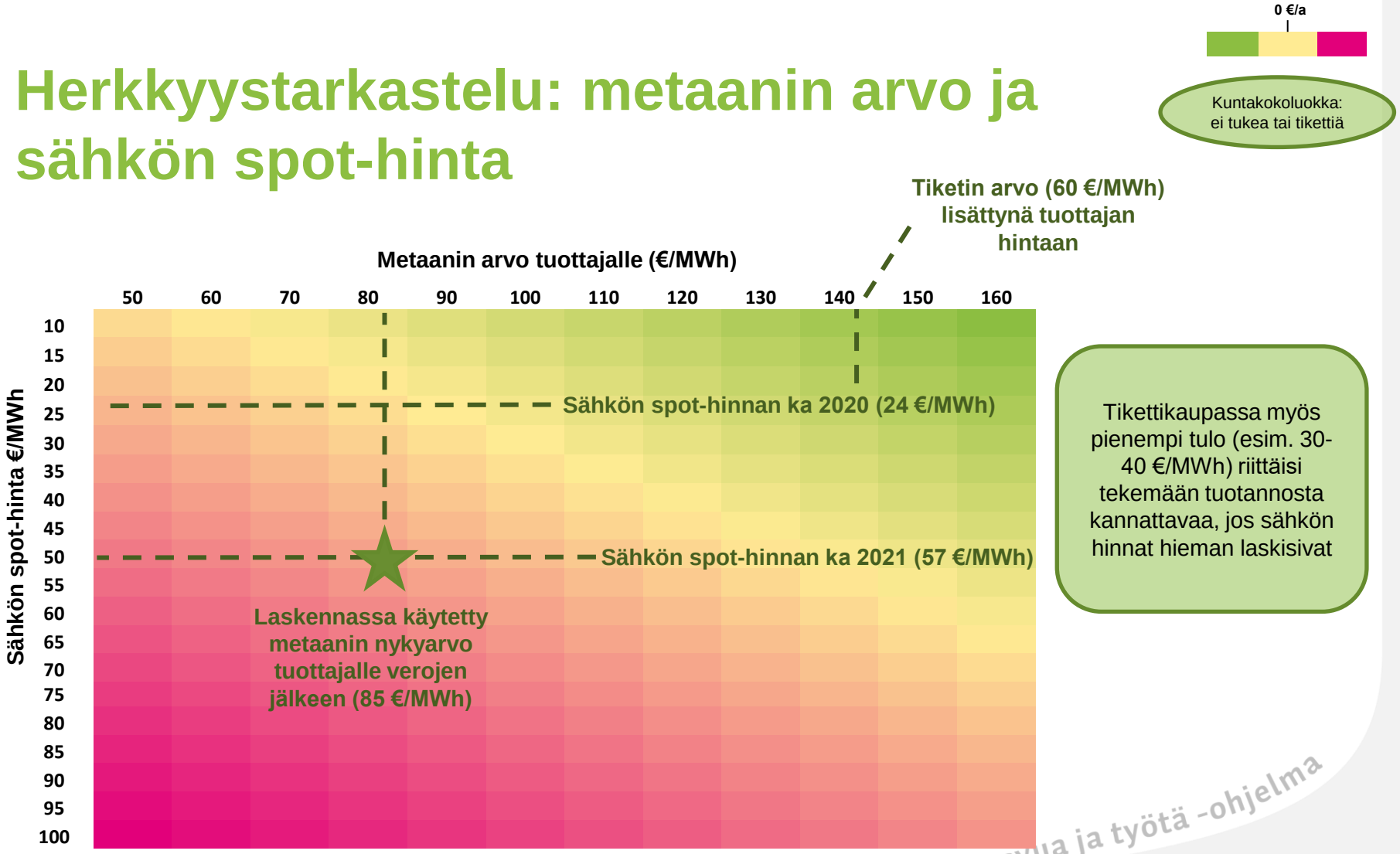
Parametri	Arvo
Tuotettu lisämetaanin määrä	4 410 MWh/a
Elektrolyyserin kapasiteetti	1 MW_e
Vedyn vuosituotanto (8 000h)	160 t/a
Elektrolyyserin sähkönkulutus	8 000MWh/a
Tuotettu hukkalämpö	910 MWh/a



Maatilakokoluokan laitoksen tapaan nykyisillä kustannuksilla ja tuloilla vetyrikastus ei ole kannattavaa. Kuitenkin, jos sähkön hinta laskisi ja lisätuloja saataisiin tikettikaupasta, tuotanto voisi olla kannattavaa.

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Herkkyystarkastelu: metaanin arvo ja sähkön spot-hinta



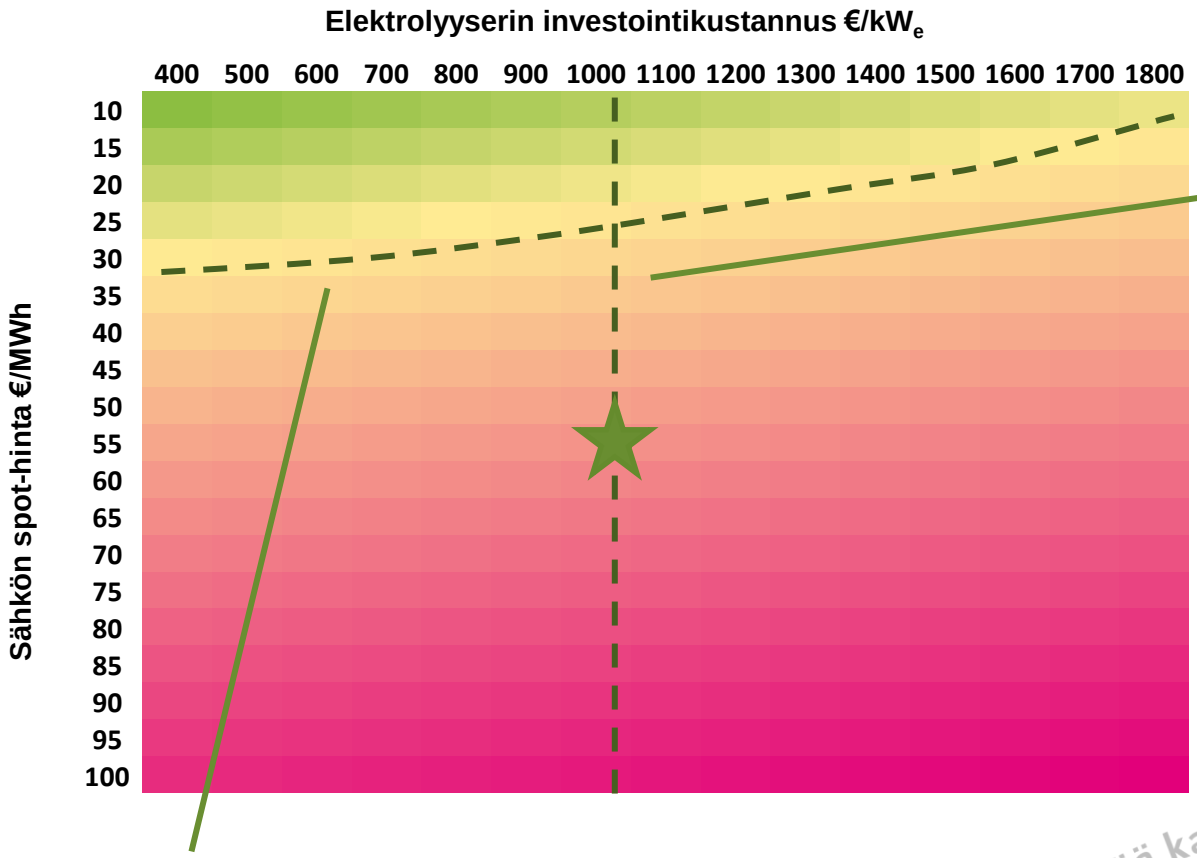
Tikettikaupassa myös pienempi tulo (esim. 30-40 €/MWh) riittäisi tekemään tuotannosta kannattavaa, jos sähkön hinnat hieman laskisivat

Vaikka sähkön spot-hinnat laskisivatkin esim. 2020 tasolle, biometaanin arvon on noustava esimerkiksi tikettikaupan ansiosta, jotta vetyrikastus olisi kannattavaa

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Herkkyystarkastelu: elektrolyyserin investointikustannus ja sähkön spot-hinta

Kuntakokoluokka:
ei tukea tai tikettiä



Elektrolyyserin investointikustannuksen tulee tulee laskea nykyisestä oletuksesta (**1050 €/kWe**), joka voi jo alkujaan olla matala nykyisessä toimintaympäristössä

Isossa kokoluokassa (100 MW) on arvoitu, että elektrolyyserin investointikustannus vuonna 2030 olisi 400 €/MWh [1], kunnallisen biokaasulaitoksen arvioitu elektrolyyserikoko on noin 1 MW$_e$

Sähkön spot-hinnan keskiarvon tulee olla alle **30 €/MWh**, jotta toiminta voisi olla matalla investointikustannuksella, ilman tikettituloja tai investointitukea, kannattavaa

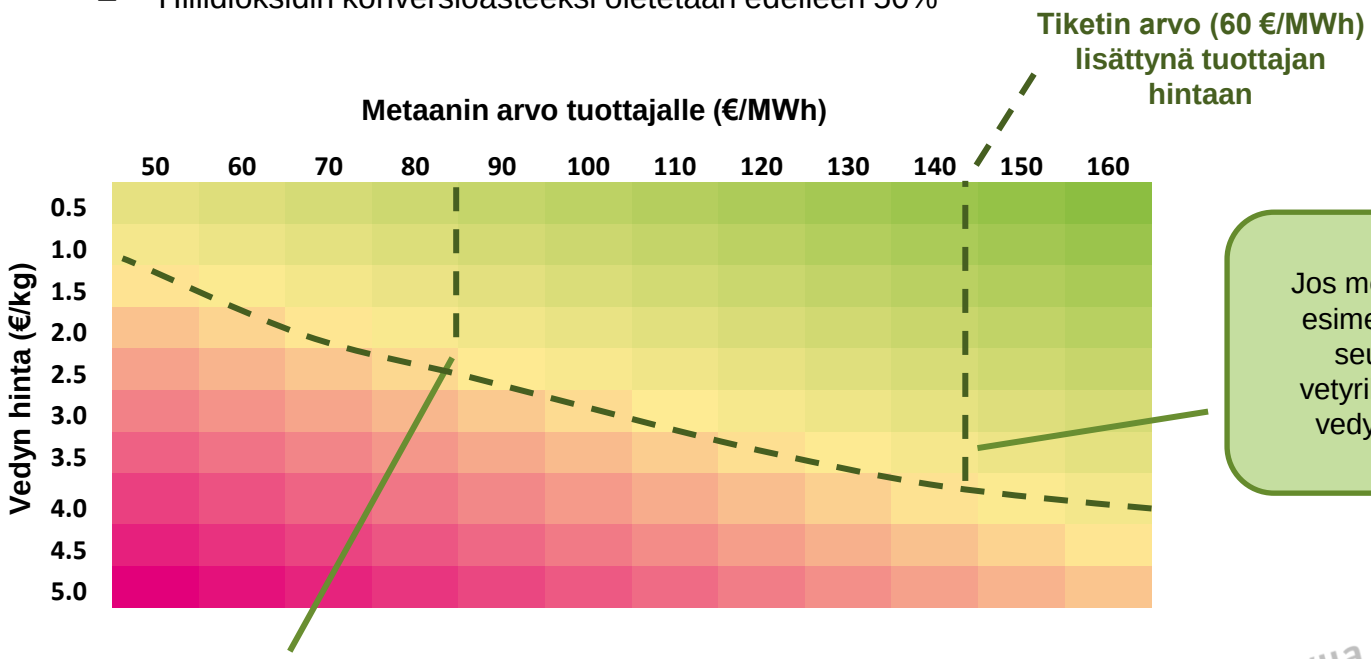
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Sivutuotevedyn käyttö vetyrikastuksessa

- Lasketaan myös skennario, jossa elektrolyysin sijaan vetyrikastuksessa käytetään sivutuotteena saatua vetyä
  - Vetyä syötetään vuoden ympäri
  - Hiilidioksidin konversioasteeksi oletetaan edelleen 50%



Jos metaanin arvo kasvaa esimerkiksi tikettikaupan seurauksena, myös vetyrikastukseen ostetun vedyn hinta voi nousta

Nykyisellä tuottajalle jäävällä metaanin arvolla sivutuotevedyn hinta saisi olla korkeintaan n 2.0 €/kg, jotta metanointi olisi annetuilla oletuksilla taloudellisti kannattavaa

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Kustannustarkasteluiden yhteenveto

- Biometaanin tuotantoa voidaan tehostaa in-situ metanoinnilla/vetyrikastuksella, jolloin biokaasureaktoriin syötetty vety reagoi biokaasussa olevan hiilidioksidin kanssa muodostaen lisää metaania
  - Lisäbiometaanin tuotanto voi tarkoittaa lisää tuloja biometaanin tuottajalle ja täten parantaa biokaasuntuotannon kannattavuutta
- Tarkastelimme mädätyksen vetyrikastuksen kustannustehokkuutta kahdessa eri kokoluokassa eri markkina- ja toimintaympäristöissä
  - Valituilla kustannusparametreillä in-situ metanointi ei ollut kannattavaa
- Mikäli vetyä tuotetaan elektrolyyttisesti, elektrolyysin tarvitsema sähkö on biometanoinnin suurin yksittäinen kustannustekijä
  - Sähkönhinnan suhteen tarkasteltavalla vuodella oli merkittävä vaikutus tuotannon kannattavuuteen: esimerkiksi vuoden 2020 ja 2021 sähkönhinnoissa oli merkittävä ero
- Vaikka sähkön hinta laskisikin, biometaanin arvon on noustava esimerkiksi tikettikaupan ansiosta, jotta vetyrikastus voisi olla kannattavaa maatilakokoluokassa tai kunnallisen biokaasulaitoksen kokoluokassa
- Teollisuudesta saatavan sivuvedyn käyttö voisi myös olla mahdollinen vedyn lähde biometanoinnille
  - Haasteena voi olla sivuvedyn kustannustehokas keräys ja kuljetus käyttöpaikalle

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Liite 1. RED II –näkökulmia mädätyksen vetyrikastukseen

Saija Rasi (Luke)

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Uusiutuvan energian direktiivi II & III

- Uusiutuvan energian direktiivi sisältää sitovat EU-tason kestävyyskriteerit energian tuotannossa käytettäville biomassoille
- Voimassa oleva uusiutuvan energian direktiivi (RED II) on vuodelta 2018
- RED III -direktiivi julkaistiin EU:n virallisessa lehdessä lokakuussa 2023 ja se tuli voimaan 20.11.2023.
  - Tästä käynnistyy jäsenmaissa 18 kuukauden aika toimenpanna direktiivin velvoitteet.
  - Uuden RED III direktiivin mukaiset säädökset tulee saattaa voimaan jäsenmaissa viimeistään 21.5.2025
- Tavoitteena on, että unionista tulee ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä ja että kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään vähintään 55 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä

- Biokaasun ja –metaanin tuotannon ja käytön tulee täyttää RED III direktiivin kestävyyskriteerit
  - Biomassan alkuperää koskevat kriteerit
  - Biopolttoaineilta, bionesteiltä ja biomassapolttoaineilta vaaditut KHK -päästövähennyksiä koskevat kriteerit
- Muuta kuin biologista alkuperää olevia uusiutuvia nestemäisiä ja kaasumaisia liikenteen polttoaineita käyttäen aikaan saatujen kasvihuonekaasupäästöjen vähennysten on oltava vähintään 70 prosenttia 1 päivästä tammikuuta 2021
- Toukokuussa 2022 Komission antoi tiedonannon REPowerEU-suunnitelmasta
  - pyritään unionin riippumattomuuteen Venäjän fossiilisista polttoaineista hyvissä ajoin ennen vuotta 2030
  - esitetään tuuli- ja aurinkoenergian käyttöönoton nopeuttamista, tällaisen energian keskimääräisen käyttöönottoasteen nostamista sekä uusiutuvan energian kapasiteetin lisäämistä vuoteen 2030 mennessä muuta kuin biologista alkuperää olevien uusiutuvien polttoaineiden tuotannon lisäämiseksi

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

- Laskettaessa jäsenvaltion uusiutuvien energialähteiden osuutta muuta kuin biologista alkuperää olevat uusiutuvat polttoaineet olisi laskettava mukaan sillä toimialalla, jolla ne kulutetaan
  - Kaksinkertaisen laskennan välttämiseksi kyseisten polttoaineiden tuotannossa käytettävää uusiutuvaa sähköä ei pitäisi sisällyttää laskentaan
- Muuta kuin biologista alkuperää olevia uusiutuvia polttoaineita, kuten uusiutuvaa vetyä, voidaan käyttää raaka- aineena tai energialähteenä teollisissa ja kemiallisissa prosesseissa sekä lento- ja meriliikenteessä, hiilestä irtautumisessa aloilla, joilla suora sähköistäminen ei ole teknisesti mahdollista tai kilpailukykyistä.
  - Niitä voidaan käyttää myös energian varastoinnissa tarvittaessa energiajärjestelmän tasapainottamiseksi, joten sillä on merkittävä rooli energiajärjestelmän integroinnissa
- EU:n delegoitu säädös uusiutuvan (vihreän) vedyn valmistuksessa käytettävän energian valmistuksesta on hyväksytty 20.6.2023
  - Vety lasketaan uusiutuvaksi, jos uusiutuvan sähkön voimalaitos ja elektrolyysi sijaitsevat samassa laitoksessa tai niiden välillä on suora yhteys eikä sähköverkosta saatavaa sähköä käytetä elektrolyysissä. Lisäksi uusiutuvan sähköntuottajan on oltava tullut käyttöön enintään 36 kuukautta ennen elektrolysaattoria.
  - Verkosta otettu sähkö voidaan pitää täysin uusiutuvana, jos se täyttää täydentävyyden, maantieteellisen korrelaation ja ajallisen korrelaation kriteerit

Kiitos!

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto