

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

School of Energy Systems
School of Engineering Science

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

141

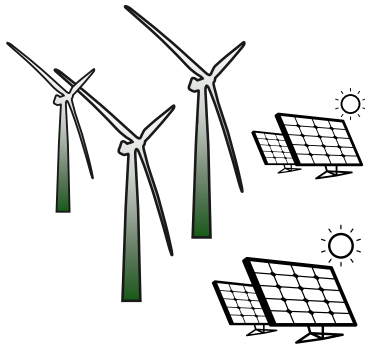
Aleksi Mankonen, Juha Kaikko, Kristian Melin, Arto Laari, Esa Vakkilainen

Vety-/metanolitalous – Ekosysteemimallinnus, case Puhos

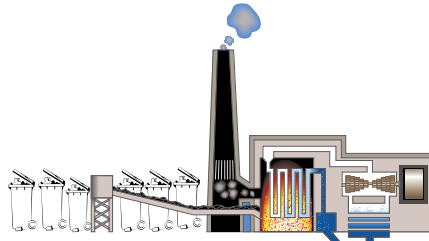
Loppuraportti

 LUT
University

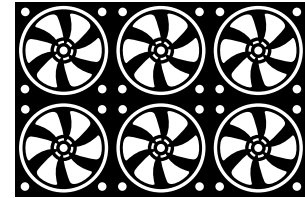
Puhoksen uusiutuva ekosysteemi



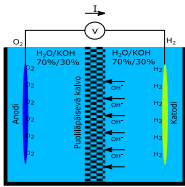
Uusiutuva primäärienergia



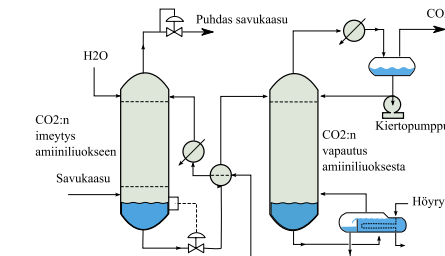
Materiaalin kierrätys energiaksi



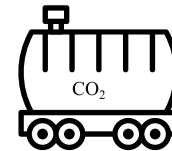
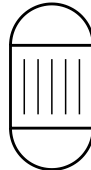
CO₂:n suora kaappaus ilmasta



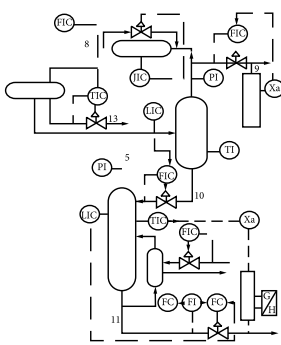
Sininen vety



RWGS
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ CO₂:n talteenotto

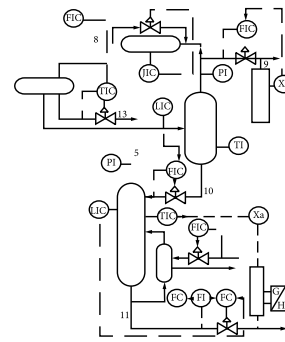
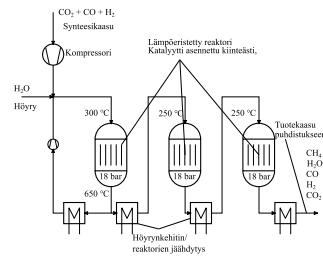


CO₂:n suora hyödyntäminen



Metanolin jatkojalostus liikennepolttoaineiksi Vihreä metanolisynteesi

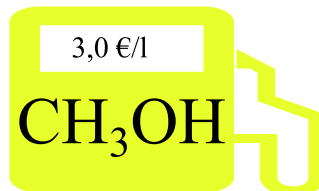
Kemiallinen CO₂:n muunnos synteetikaasuksi



Kemianteollisuus
Metanoli alkeeneiksi (MTO)



Jakelu liikenteeseen



Jakelu liikenteeseen



POHJOIS-KARJALA
Maakuntaliitto

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
School of Engineering Science

Tutkimusraportti 141

Alexi Mankonen, Juha Kaikko, Kristian Melin, Arto Laari, Esa Vakkilainen

Vety-/metanolitalous - Ekosysteemimallinnus, case Puhos

Loppuraportti

ISBN 978-952-335-828-7 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2022

Tiivistelmä

Aleksi Mankonen, Juha Kaikko, Kristian Melin, Arto Laari, Esa Vakkilainen
Vety-/metanolitalous - Ekosysteemimallinnus, case Puhos

Lappeenranta 2022

99 sivua

Raportti

Avainsanat: vetytalous, P2X, metaani, metanoli, energian tuotanto, ekosysteemi

Hankkeen tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet investoida kemikaalien ja polttoaineiden valmistukseen uusiutuvalla energialla sekä uusiutuvan tuulisähkön alueellinen potentiaali Kiteen Puhoksen teollisuusalueelle ympäristöineen. Tavoitteena on myös vähentää alueen teollisuuden ja energian tuotannon hiilidioksidipäästöjä sitomalla hiilidioksidia puuteollisuuden liimoihin.

Hankkeessa esitettiin ekosysteemin tekniset ja taloudelliset suuntaviivat. Kolmelle ekosysteemikokonaisuudelle tehtiin alustava investointilaskelma, jotta jatkotoimenpiteille on pohjaa. Ekosysteemiä tukemaan tehtiin tarkastelu mahdollisesta uusiutuvan tuulienergian tuotannosta alueella. Tuotettu vety ajateltiin käytettävän kemiallisessa synteesissä polttoaineiden (metaani) tai kemikaalien (metanoli) valmistukseen. Esimerkkinä syntyvää metanolia käytetään Puhoksessa tehtaalla sekä muilla ekosysteemin osapuolilla. Synteesissä tarvittava hiilidioksidi kaapataan esimerkiksi suunnitteilla olevasta jätteenpolttolaitoksesta tai muusta seutukunnallisesta kohteesta (esim. biokaasun tuotanto) ja kuljetetaan synteesilaitoksen alueelle. Prosessissa syntyvä hukkalämpö otetaan talteen ja myydään kaukolämpönä.

Hankkeella on merkittävä vaikutus alueen teollisuuden liiketoimintamahdollisuuksien parantamiseen, teollisuuden investointien lisäämiseen ja teollisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Toteutuessaan hankkeen vaikutus alueen työllisyyteen on merkittävä. Mahdollisen tuulivoiman ja ekosysteemissä rakennettavan elektrolyysi- ja synteesiprosessin investointivaiheessa työpaikkoja olisi satoja.

Abstract

Aleksi Mankonen, Juha Kaikko, Kristian Melin, Arto Laari, Esa Vakkilainen
Hydrogen-/methanol economy – Ecosystem modelling, case Puhos

Lappeenranta 2022

99 pages

Report

Keywords: hydrogen economy, P2X, methane, methanol, energy production, ecosystem

The purpose was to investigate the regional potential around Kitee Puhos industrial area to invest in the manufacture of chemicals and e-fuels using renewable fuels as well as the regional potential of wind electricity generation. The aim was to reduce regional fossil carbon dioxide emissions from industry by binding carbon to wood industry glues.

In this project the economic and technical directions were laid out. Three ecosystem entities were evaluated through investment and profitability estimations. To support the ecosystem a study on wind electricity generation potential was performed. The produced hydrogen was intended to be used in a chemical synthesis to make motor fuels (methane) or chemicals (methanol). As an example, the methanol produced was intended to be used at Puhos or at other regional sites. The carbon dioxide used for the upgrading could be sourced from planned waste combustion facility or from regional biogas production and transported to the manufacturing site. Waste heat produced could be sold as district heat.

The ecosystem has a significant role in improving the regional business possibilities, increasing industrial investments, and reducing industrial fossil carbon dioxide emissions. When realized, the ecosystem significantly increases the local employment. Building and maintaining the wind electricity generation together with the chemicals manufacturing plant would generate hundreds of jobs.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Sisällysluettelo

Lyhenneluettelo	11
1 Johdanto	13
1.1 Vetytalous.....	14
1.1.1 Puhtaan vedyn käyttö	16
1.1.2 Vedyn varastointi	16
1.1.3 Vedystä poltto- ja raaka-aineiksi.....	16
1.2 Esimerkkejä Suomesta	17
1.2.1 Joutseno.....	17
1.2.2 Neo-Carbon Energy	18
1.2.3 Ahvenanmaa.....	18
1.2.4 Perämeren tuulivoimahanke.....	18
1.2.5 Lahti metaani.....	19
1.2.6 Vantaa metaani.....	19
1.2.7 Harjavalta	19
1.3 E-polttoaineet ja biopolttoaineet	20
1.4 Vihreän vedyn kriteerit.....	20
1.5 Toimenpiteet.....	22
1.6 Organisointi	22
2 Pohjois-Karjala	25
2.1 Elinkeinorakenne.....	25
2.2 Puhos	26
2.2.1 Bakelite Oy	28
2.2.2 Jätteenkäsittely	29
2.2.3 Hiilidioksidin talteenottopotentiali.....	30
3 Uusiutuva energia- ja kemikaaliekosysteemi	31
3.1 Uusiutuvien tuotteiden sähköenergian tarve	32
3.1.1 Uusiutuva primäärienergia	33
3.1.2 Suljettu sähköverkko.....	33
3.1.3 Liityntä sähköverkkoon.....	34
3.1.4 Sähköverkko.....	36
3.2 Hiilidioksidi.....	37
3.3 Vedyn tuotanto	38
3.3.1 Vetypuskuri.....	39
3.4 Hiilidioksidin ja vedyn jatkojalostus.....	41

3.4.1	Synteetikaasureitti	41
3.4.2	Hiilidioksidin ja vedyn suora synteetireaktio	41
3.4.3	Polttoaineet.....	41
3.4.4	Kemikaalituotanto	42
3.5	Hiilidioksidin suora hyödyntäminen	42
3.6	Hapen tuotanto ja hyödyntäminen.....	42
4	Synteettisten polttoaineiden valmistus	43
4.1	Hiilidioksidin talteenotto	45
4.1.1	Teknologian yleiskuvaus.....	47
4.2	Synteetikaasu	48
4.2.1	Synteetikaasun nykyinen tuotanto	49
4.2.2	Polttoaineeksi kaasuttaminen	49
4.2.3	Synteetikaasu uusiutuvassa energijärjestelmässä	52
4.2.4	Hiilidioksidin ja vedyn seos synteetissä	52
4.3	Energiatase	52
4.4	Vedyn valmistus alkalielektrolyysillä	55
4.4.1	Vedyn ominaisuudet	57
4.4.2	Reaktiokemia	59
4.4.3	Sähkökemia	60
4.4.4	Paine.....	61
4.5	Metaanin valmistus.....	61
4.6	Metanolin valmistus	64
4.6.1	Valmistusteknologia.....	67
4.7	Bensiinin valmistus	68
4.8	Dieselin valmistus	68
5	Raaka-aineiden toimittajat	69
5.1	Hiilidioksidi.....	69
5.2	Biomassa	70
5.3	Vesi.....	71
6	Lopputuotteiden ostajat	72
7	Sähkönhankintavaihtoehdot	73
7.1	Pörssisähkö.....	74
7.2	PPA tuulivoimalle	74
7.3	Oma tuulivoima.....	74
7.4	Aurinkosähkö	75
8	Tulokset ja vaikutus	76
8.1	Prosessivaihtoehdot	76
8.1.1	Metanoli	76
8.1.2	Vety	76
8.1.3	Metaani.....	76
8.2	Kustannusarvio	76

8.3	Kannattavuus	77
8.3.1	Sähkön hinnan raja-arvo kannattavuudelle	79
8.3.2	Metanolitonin hinnan raja-arvo kannattavuudelle	80
8.4	Laitoksen koon vaikutus.....	80
8.5	Biomassan kaasutukseen perustuva metanoliprosessi.....	80
8.6	Tuulisähkön kustannukset Puhoksessa.....	83
8.6.1	Tuulivoiman tuotantoalue ja turbiinityyppi	83
8.6.2	Arvioitu vuosituotanto ja energian tuotantokustannus.....	85
8.7	Jatkotyö ja -ehdotukset.....	88
8.7.1	Kiteen Lämpö Oy:n rooli	89
8.7.2	Itä- ja Etelä-Suomen vetyklusteri.....	90
9	Yhteenveto	91
	Lähdeluettelo	93
	Liite A: Laitosvaihtoehtojen kustannusarviot	103
	Liite B: Laitosvaihtoehtojen kannattavuuslaskelmat	111
	Liite C: Vetyelektrolyysin tase	127

Lyhenneluettelo

MTG	Metanolista bensiiniksi -prosessi (methanol-to-gasoline)
MTO	Metanolista alkeeneiksi -prosessi (methanol-to-olefins)
PPA	Pitkäaikainen sähkön hankintasopimus (power procurement agreement)
P2X	Sähköllä tuotettu polttoaine tai kemikaali (power-to-X)
P2G	Sähköllä tuotettu kaasumainen (polttoaine) (power-to-gas)
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

1 Johdanto

Työ- ja elinkeinoministeriö on osoittanut maakuntien liittojen käyttöön kansallisen määrärahan alueiden kestäväen kasvun ja elinvoiman tukemiseen. Rahoitusta tarvitaan, jotta Pohjois-Karjalassa saadaan aikaan uutta liiketoimintaa, tulevaisuudenuskkoa ja kyetään vahvistamaan kasvua.

LUT-yliopisto laati tiekarttaa Ahvenanmaan merkittävän tuulivoimapotentiaalin hyödyntämiseksi. Ahvenanmaan maakuntahallitus on tilannut toimeksiannon tiekartasta, jossa kuvataan merituulivoiman lisärakentamisen ja sen myötä jopa 30 terawattituntiin vuodessa kasvavan sähköntuotannon mahdollisuuksia. Alueen investointisuunnitelmien tueksi kaivataan tarkempaa kuvausta, kuinka taloudelliset hyödyt voitaisiin maksimoida.

LUT-yliopisto on toteuttanut synteettisten polttoaineiden pilotlaitoksen selvitystyön Joutsenossa. Hankkeessa LUT-yliopisto ja ryhmä yrityksiä tekivät synteettisten polttoaineiden pilotlaitoksen toteutettavuustutkimuksen (feasibility study). Kyseessä on power-to-x-teknologiaan (P2X) perustuva teollisen mittakaavan pilotlaitos, jossa tuotettaisiin hiilineutraaleja liikennepolttoaineita. Pilotlaitos sijoittuisi Joutsenoon, ja suunnitellun tuotannon pääraaka-aineet ovat Finnsementin Lappeenrannan tuotantolaitoksen päästöistä talteen otettava hiilidioksidi ja Kemiran tehtaan tuotannon ylijäämävyty. Hiilidioksidi ja vety yhdistetään kemiallisessa synteessissä, josta saadaan synteettistä metanolia.

Euroopan Unioni on Vihreän siirtymän osana käynnistänyt vetystrategian, jossa "Fossiilisen öljyn ja kaasun käyttö polttoaineina tulee päättymään. Ne pitää korvata hiilineutraaleilla polttoaineilla, joita voidaan käyttää nykyisissä moottoreissa ja näin nollata liikenteen CO₂-päästöt. Hiilidioksidin kierrätys teollisuuden päästölähteistä tarjoaa suomalaisyrityksillekin ison mahdollisuuden kääntää polttoainetuotantoa hiilineutraaliksi", sanoo tutkimusjohtaja Petteri Laaksonen, LUTin energiajärjestelmien yksiköstä.

Siksi LUT-yliopisto uskoo pystyvänsä avustamaan Pohjois-Karjalaa maakunnan liiketoiminnan uudistamiseen, tulevaisuudenuskoon ja parantamiseen tähtäävässä projektissa.

Hankkeen tavoitteena on selvittää mahdollisuudet investoida kemikaalien ja polttoaineiden valmistukseen uusiutuvalla energialla sekä uusiutuvan tuulisähkön alueellinen potentiaali Kiteen Puhoksen teollisuusalueelle ympäristöineen.

Tavoitteena on myös vähentää alueen teollisuuden ja energian tuotannon hiilidioksidipäästöjä sitomalla hiilidioksidia puuteollisuuden liimoihin. Lopputuloksena on toimivan ekosysteemin kuvaus

Ekosysteemiä pyritään laaventamaan maakunnalliseksi kartoittamalla mahdollisia maakunnallisia toimijoita eri tuotteiden alihankkijana tai hyödyntäjänä.

1.1 Vetytalous

Vedestä ja ilmasta on mahdollista valmistaa synteettisiä polttoaineita, joiden käyttö ei kiihdytä ilmastonmuutosta¹. Polttoaineet; maakaasu, metanoli, bensiini ja diesel ovat hiilivetyjä. Ne ovat aikoinaan muodostuneet biomassasta. Niitä voidaan tehdä myös keinotekoisesti; tarvitaan vain hiiltä (C) ja vetyä (H₂). Kuva 1. Hiiltä saadaan ilmassa olevasta tai kestävästi olemassa olevasta prosessista vapautuvasta hiilidioksidista (CO₂).

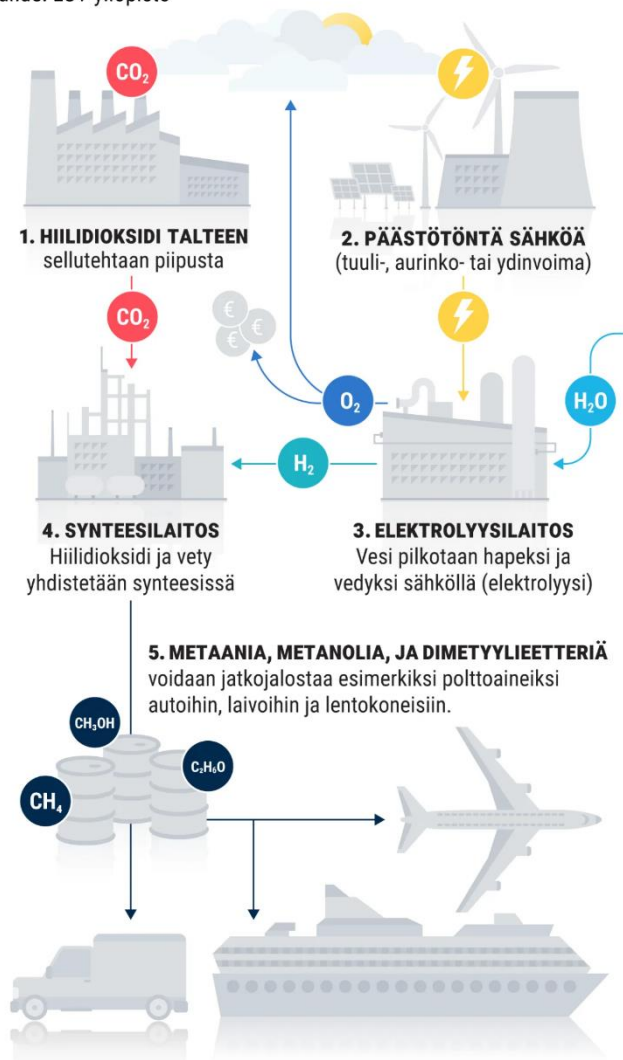
- Vetyä saa vedestä (H₂O) pilkkomalla molekyylejä sähköllä. Tätä kutsutaan elektrolyysiksi.
- Hiili ja vety voidaan yhdistää kemiallisessa synteesissä.
- Lopputuotteena on esimerkiksi synteettistä metanolia, metaania ja dimetyylieetteriä, joita voidaan käyttää polttoaineina tai kemianteollisuuden raaka-aineina.

¹ <https://yle.fi/uutiset/3-10818795>

Keinotekoisesti valmistettuja polttoaineita on jo tuotettu pilottilaitoksissa eri puolilla maailmaa, myös Suomessa. Synteettisillä polttoaineilla voi olla tulevaisuudessa ratkaisevan tärkeä rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä.

Synteettisten polttoaineiden valmistus

Lähde: LUT-yliopisto



Kuva 1: Synteettisten polttoaineiden tuotanto

1.1.1 Puhtaan vedyn käyttö

Vety puhtaana, ilman että sitä on mitenkään jatkojalostettu tai sekoitettu, on itsessään liikenne- ja voimalaitospolttoaine [1]. Eräs yksittäinen puhtaan vedyn käyttösovellus on raudan pelkistys, jossa fossiilinen hiili korvataan pelkistäjänä ja hiilidioksidin sijaan sivutuotteena syntyy vettä [2]. Näin puhdas vety pystyy huomattavasti vähentämään terästeollisuuden päästöjä.

1.1.2 Vedyn varastointi

Vedyn varastointiin, kuljetukseen ja käyttöturvallisuuteen liittyy ratkaisemattomia kysymyksiä. Yhdysvaltojen energiavirasto pitää vedyn varastoinnin ja turvallisuuden haasteita yhtenä oleellisimmista pullonkauloista uusiutuvaan energian käyttöönottoon liittyen [3]. Huoneenlämpöinen ja normaalipaineinen vety vaatii liian suuria säiliöitä taloudelliseen varastointiin, vedyn paineistamisessa on räjähdysvaara ja vedyn kryogeeninen (kylmätekninen) nesteyttäminen vaatii monimutkaista ja kallista tekniikkaa [3]. Kylmäteknikka sinänsä on olemassa ja käytössä, sillä typen, hapen ja maakaasun nesteyttäminen on arkipäivää. Vedyn varastoimiseksi tutkitaan sen kemiallista sitomista muihin helposti varastoitaviin ja kuljetettaviin aineisiin, joista se pystytään vapauttamaan käyttökohteessa [3]. Yksi lupaavimmista vetyvarastoista on vihreä ammoniakki (NH_3) [4]. Ammoniakin energiatiheys on riittävä, että varaston mitat pysyvät kohtuullisina ja nesteyttäminen vaatii vain yksinkertaista kylmäteknikkaa. Ammoniakin raaka-aineet ovat vety ja ilmakehän typpi. Wärtsilä kehittää parhaillaan ammoniakilla käyvää polttomootoria laiva- ja voimalaitoskäyttöön [5]. Vedyn voi myös palauttaa ammoniakista.

1.1.3 Vedystä poltto- ja raaka-aineiksi

Mahdollisuus tehdä vedystä poltto- ja raaka-aineita perustuu vedyn epästabiiliin tilaan. Veteen sitoutuneena vety on hyvin stabiilia, mutta elektrolyysissä vety irrotetaan erikseen. Vetykaasu on stabiilia vain eristettynä ja se reagoi muiden aineiden kanssa erittäin herkästi. Vetykaasu reagoikin jopa hyvin stabiilin hiilidioksidin kanssa muodostaen hiilimonoksidia ja vettä. Elektrolyysissä vetyyn ladataan energiaa, joka

vapautuu osittain poltto- ja raaka-ainesynteesissä ja lopullisesti tuotteiden palaessa taas vedeksi ja hiilidioksidiksi. Veden hajottamista elektrolyysillä voi verrata akun lataamiseen ja vedyn palamista vedeksi akun purkamiseen. Hiilen tapauksessa kiertokulku ei ole yhtä yksinkertainen, sillä hiili ei ole samalla tavalla helposti saatavilla kuin nestemäinen vesi. Tällä hetkellä maailmanlaajuisesti hiili otetaan käyttöön fossiilisista lähteistä kuten kivihielestä, maakaasusta tai raakaöljystä. Fossiililähteissä hiili on kätevästi valmiiksi käyttökelpoisessa muodossa irrallaan esimerkiksi hapesta. Fossiilisen hiilen käytöstä on kuitenkin siirryttävä toisiin hiililähteisiin, kuten tehtaista päästettäviin hiilidioksidin pistelähteisiin tai ilmakehän hiilidioksidiin. Hiilidioksidiin sitoutuneen hiilen käyttö on vaikeampaa kuin fossiilisen, sillä pieniin pitoisuuksiin laimentuneen kaasun erottaminen sekä CO₂-molekyylin hapen vaihtaminen vedyksi vaativat paljon energiaa. Fossiiliraaka-aineen käyttöä voisikin verrata mäen laskemiseen aloittaen jo mäen huipulta, kun taas ilmakehän tai pistelähteiden hiiltä käytettäessä mäki täytyy kiivetä ensin ylös.

Reitti vedystä ja hiielestä poltto- ja raaka-aineiksi on löydetty ja osoitettu toimivaksi jo viime vuosisadan alkupuolella ja ollut osittain myös käytössä tämän ajan. Fossiiliraaka-aineista tehdään tälläkin hetkellä valtaosa maailman vedystä (maakaasu ja öljy sisältävät vetyä) ja tärkeistä kemianteollisuuden raaka-aineista, kuten metanolista. Fossiilisesta kivihielestä tehdään myös kaupallisesti maakaasua, johon vety saadaan vedestä. Prosessit ovat periaatteiltaan samat uusiutuvia hiili- ja vetylähteitä käytettäessä. Uusiutuvat raaka-aineet vaativat jalostukseen kuitenkin huomattavasti enemmän energiaa.

1.2 Esimerkkejä Suomesta

1.2.1 Joutseno

Vetytaloutta on suunniteltu Joutsenoon, missä natriumklooraatin (NaClO₃) tuotannon sivutuotteena syntyvää vetyä yhdistettäisiin sementin valmistuksessa syntyvään hiilidioksidiin. Lopputuotteiksi teknistaloudellisessa tarkastelussa suunniteltiin metanolia ja liikennepolttoaineita. Tarkastelun perusteella uusiutuvaa sähköntuotantoa tarvitaan

lisää, sähkön hinnan täytyy olla kohtuullinen ja tuotantoprosessien täytyy olla lähellä toisiaan parhaan kannattavuuden saavuttamiseksi. Suurin tekninen epävarmuus liittyy tarkastelun perusteella liikennepolttoaineiden, erityisesti lentopolttoaineiden, valmistukseen. [6]

1.2.2 Neo-Carbon Energy

Neo-Carbon Energy on Business Finland:in (entinen Tekes) noin 10 M€:lla rahoittama tutkimusprojekti, jossa suunnitellaan täysin uusiutuva energijärjestelmä, joka on myös samalla hajautettu. Neo-Carbon-energiajärjestelmässä energiavarastot ja synteettiset polttoaineet ovat keskeisessä roolissa [7]. Pääasiassa LUT-yliopiston, VTT:n, Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen ja Turun yliopiston Neo-Carbon Energy -projektin puitteissa tekemien tutkimusten perusteella täysin uusiutuvaan sähköenergiaan ja synteettisiin polttoaineisiin perustuva energijärjestelmä voisi teknistaloudellisesti korvata nykyisen energijärjestelmän esimerkiksi Pohjois-Amerikassa, Suomessa, Intiassa ja Iranissa [8].

1.2.3 Ahvenanmaa

Ahvenanmaa pystyisi sopivalla sähköntuotantorakenteen muutoksella ja synteettisiä polttoaineita hyödyntämällä siirtymään täysin uusiutuvaan energijärjestelmään vuoteen 2030 mennessä [9]. Tällä hetkellä 70% Ahvenanmaan sähköenergiasta tuodaan Ruotsista, mutta tuulivoimarakentamiselle on varattu 1000 km² merialueita läheltä [10]. Jos koko LUT-yliopiston tutkiman hankkeen suunnittelema kapasiteetti toteutuu, niin Ahvenanmaan tuulivoimalat tuottavat noin puolet Suomen nykyisestä sähköenergian tuotannosta, mikä tarkoittaisi 500 tuulivoimalayksikköä. Lisäksi LUT-yliopistossa tutkitaan mahdollisuutta tuottaa Ahvenanmaalla sähköstä vetyä, jota voitaisiin kuljettaa putkistossa myytäväksi ja käyttää laivaliikenteessä [10].

1.2.4 Perämeren tuulivoimahanke

Ruotsalainen OX2-yhtiö suunnittelee 310 tuulivoimalayksikön rakentamista Hailuodon ja Pietarsaaren alueelle [11]. OX2:n suunnittelemat voimalat tuottaisivat noin

kolmanneksen Suomen nykyisestä sähköenergian tuotannosta [11]. OX2:n tarvitsema lupakäsittely on valtiollinen [12]. Monet aikaisemmat merituulivoimahankkeet eivät ole johtaneet toteutukseen ja läpimurron odotetaan tapahtuvan, jos valtio helpottaa merituulivoiman verotukseen liittyviä rasitteita ja valtakunnallinen sähköverkko laajentuu myös merelle siten, etteivät kaikki sähköistyksen kustannukset kohdistu tuulivoiman rakentajalle [12].

1.2.5 Lahti metaani

Lahti Energia Oy ja Nordic Ren-Gas Oy ovat kehittämässä uusiutuvaa metaania ja vihreää vetyä tuottavaa Power-to-Gas-tuotantolaitosta. Hanke on toteutettavuussuunnittelussa. Projektissa nousisi Lahteen Kymijärven voimalaitosalueelle Power-to-Gas-laitoskokonaisuus, jonka lopullinen teho olisi 120 MW. Tavoite on tuottaa n. 50 miljoonaa litra ekvivalenttia vastaava määrä uusiutuvaa kaasupolttoainetta raskaan liikenteen käyttöön. Investoinnin arvo olisi noin 250 miljoonaa euroa.

Ren-Gasin tavoitteena on toteuttaa Suomeen hajautettu puhtaiden kaasupolttoaineiden tuotanto- ja jakeluketju raskaan tieliikenteen käyttöön. Samanlaisia hankkeita aiotaan saada useampia pystyyn.

1.2.6 Vantaa metaani

Wärtsilä ja Vantaan Energia aikovat toteuttaa synteettistä metaania tuottavan Power-to-Gas (P2G)-laitoksen. Aie on saada vuonna 2025 käyttöön laitos, joka tuottaa 10 MW polttoaineteholla kaupallisessa mittakaavassa hiilineutraalia, synteettistä metaania. Synteettinen metaani tuotetaan Vantaan Energian jätteenpolttolaitoksella talteenotetusta hiilidioksidista sekä uusiutuvalla energialla tuotetusta vedystä. Hankkeessa Wärtsilä on vastuussa P2G-laitoksen teknisestä suunnittelusta.

1.2.7 Harjavalta

P2X Solutions Oy projektoi vihreän vedyn tuotantolaitosta Harjavaltaan. Valmistuessaan laitos tuottaa vihreää vetyä mm. teollisuuden tarpeisiin uusiutuvalla energialla tuotetulla

sähköllä. Laitoksen kapasiteetti on 20 megawattia ja sen sivuvirtoina syntyy teollisuuden tarvitsemaa happea ja lämpöenergiaa. Investoinnin odotetaan toteutuvan niin että laitoksen käyttöönotto on vuoden 2024 ensimmäisellä vuosipuoliskolla.

1.3 E-polttoaineet ja biopolttoaineet

Vedestä ja hiilidioksidista sähkön avulla valmistettuja tuotteita kutsutaan E-tuotteiksi, kuten E-diesel ja E-metanoli. Biomassapohjaisia vastineita kutsutaan vastaavasti biodieseliksi ja biometanoliksi. Erona E-tuotteen ja biotuotteen välillä on erityisesti se, että E-tuotteen valmistaminen tarvitsee huomattavasti enemmän sähköä ja on usein kalliimpaa.

1.4 Vihreän vedyn kriteerit

TEM on antanut eduskunnalle tiedoksi seuraavaa: ”*Komissio antoi 8.7.2020 tiedonannot EU:n energiajärjestelmän integrointistrategiasta (COM(2020) 299 final) ja vetystrategiasta (COM(2020) 301 final). Strategiat ovat osa Euroopan vihreän kehityksen ohjelmaa (European Green Deal). Osa komission elpymispakettiehdotuksen rahoituksesta koskee ratkaisuja, joilla pyritään edistämään energiajärjestelmän integrointia ja vetytaloutta.*”

Vetyä voidaan valmistaa monella tavalla ja riippuen sen valmistustavasta siitä käytetään eri värikoodeja. Näitä ovat mm.

- Ruskea vety: Tuotetaan hiiltä kaasuttamalla ja tuotantoprosessin aikana vapautuu hiilidioksidia.
- Harmaa vety: On yleisin vetylaatu ja sitä saadaan maakaasua hajoittamalla höyryreformoinnilla. Esimerkiksi Neste tuottaa vetyä näin. Vedyn lisäksi syntyy fossiilista hiilidioksidia, joka päästetään taivaalle.
- Sininen vety: Tuotetaan maakaasusta höyryreformoinnilla, mutta prosessissa otetaan talteen kaikki (tai suurin osa) fossiilisesta hiilidioksidista ja varastoidaan se pysyvästi. Tuottaa vähän tai ei lainkaan fossiilista hiilidioksidia.

- Vihreä vety: Tuotetaan vesielektrolyysillä käyttämällä uusiutuvista energialähteistä peräisin olevaa sähköä. Ei tuota hiilidioksidia.

EU on säätämässä uusiutuvan vedyn määritelmästä. Aiemmin esitettiin erittäin tiukkoja vaateita vedyn tuotannolle mm. rajoittaen millaista sähköä voidaan käyttää

- lisäisyys eli käytetyn sähkön on oltava sellaista uusiutuvaa, joka on rakennettu tätä vedyntuotantoa varten.
- erotettava verkosta eli laitos ei saa käyttää verkkosähköä, jottei kansallisen sähköverkon fossiiliperäistä sähköä käytetä.

Nyt näyttää, että näihin vaatimuksiin tulee lievennyksiä, toki parlamentti ja jäsenvaltiot eivät ole sanoneet lopullista sanaansa. Eli sääntely on vielä kesken. Ilmeisesti sininen vety hyväksytään raaka-aineeksi niin kauan kuin se täyttää 70 % hiilipäästöjen vähenemisvaatimuksen. Vaatimus on sama kuin bioperäisille liikennepolttoaineilla RED III -paketissa. Tämä on syy miksi esim. Neste on aloittamassa hiilidioksidin varastointikokeilut yhdessä sinisen vedyn tuotannon kanssa (Talouselämä, 12.12.2021).

Uusiutuvia sähköisiä polttoaineita voisi tuottaa siis kahdenlaisella vedyllä:

1. Uusiutuvalla vedyllä, joka täyttää seuraavat kriteerit
 - i. käytetty sähkö on uusiutuvaa mutta ei peräisin biomassan poltosta
 - ii. aiheuttaa todistetusti 70 % hiilipäästöjen vähenemän verrattuna fossiilisten käyttöön
2. Matalahiiliselä vedyllä, joka aiheuttaa todistetusti 70 % hiilipäästöjen vähenemän verrattuna fossiilisten käyttöön

On huomattava, että vielä ei ole olemassa esitystä laskentamenetelmästä johon 70 % vähenemä perustuu, mutta on selvää, että hiilidioksidintalteenottoa ei voida laskea kahteen kertaan ts. kerran varastointiin ja toisen kerran päästöalena tuotteessa.

1.5 Toimenpiteet

Hankkeessa tehdään alustava selvitys tuulisähköön perustuvasta P2X-prosessista ja sen kannattavuudesta Puhoksen alueella. Mahdollisina lopputuotteina tarkastellaan vetyä, metaania ja metanolia eri kokoluokissa.

Selvitys pitää sisällään prosessisynteesin arvioinnin sekä eri prosessivaihtoehtojen tarkastelun, taseet ja kustannusten arvioinnin. Tuulisähkön osalta valitaan tuotantoalueen alustava sijoitus ja arvioidaan tuotantokapasiteetti sekä tuotetun sähkön hinta.

Investointi- ja kustannuslaskennan perusta on LUT-yliopiston muissa projekteissa luoma käsitys vastaavien laitosten kannattavuudesta.

Selvitystä voidaan hyödyntää prosessin liiketoimintamahdollisuuksien arvioinnissa Pohjois-Karjalassa.

Hankkeella on merkittävä vaikutus alueen teollisuuden liiketoimintamahdollisuuksien parantamiseen, teollisuuden investointien lisäämiseen ja teollisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen.

Toteutuessaan hankkeen vaikutus alueen työllisyyteen on merkittävä. Mahdollisen tuulivoiman ja ekosysteemissä rakennettavan elektrolyysi- ja synteesiprosessin investointivaiheessa työpaikkoja olisi satoja.

Hanke tukee myös Pohjois-Karjalan tavoitteita hiilineutraaliuden saavuttamiseksi.

1.6 Organisointi

Projekti oli organisoitu niin että sitä ohjasi ohjausryhmä ja sen toteutuksesta vastasi LUT-yliopisto.

Projektin ohjausryhmän koostumus oli seuraava:

Pekka Hirvonen (Kitee), Puheenjohtaja

Risto Hiltunen (Keski-Karjalan Kehitysyhtiö Oy)

Taina Hyppölä (St1 Oy)

Jukka Karttunen (Itä-Suomen Murskauskeskus Oy)

Martti Kettunen (Keski-Karjalan Kehitysyhtiö Oy)

Petteri Laaksonen (LUT)

Ulla-Riitta Pölönen (Pohjois-Karjalan maakuntaliitto)

Pasi Rouvinen (Bakelite Oy)

Timo Tahvanainen (Business Joensuu Oy)

Toteutuksesta vastasi

Esa Vakkilainen, vastuullinen johtaja

Jussi Saari, projektipäällikkö

Kristian Melin, apulaisprofessori

Aleksi Mankonen, tutkija

Juha Kaikko, dosentti

Arto Laari, tutkijatohtori

2 Pohjois-Karjala

Pohjois-Karjala on 164 000 asukkaan maakunta, joka koostuu 13 kunnasta, joista Joensuu, Kitee, Lieksa, Nurmes ja Outokumpu ovat kaupunkeja. Väestö on keskittynyt Pohjois-Karjalassa keskustaajamiin, kuten Joensuuhun, mutta silti puolet asukkaista asuvat tilastoluokituksen perusteella maaseudulla. [13]

2.1 Elinkeinorakenne

Pohjois-Karjalassa on vahvaa metsäbiotalouden tutkimusta ja osaamista, suuret bioenergiavarat sekä yli 500 alan yritystä. Tärkeinä tekijöinä elinvoiman ylläpitämisessä ja kehittämisessä pidetään osaavan työvoiman vetämistä ja liikenneyhteyksiä. Lähivuosina nousevia elinkeinoja ovat olleet metsä- ja muoviteollisuus. Toisaalta lähiaikoina työpaikkoja on hävinnyt maataloudesta sekä varuskunnan ja hätäkeskuksen lakkauttamisen takia. [14]

Huomattavia teknologiayritysten toimipisteitä Pohjois-Karjalan alueella ovat mm. Abloy Oy:n tehdas Joensuussa, Stora Enson Enocell-sellutehdas Uimaharjussa, Oy All-Plast Ab:n komposiittitehdas Heinävaarassa, Phillips-Medisizen terveysteknologian tuotantolaitos Kontiolahdella, kemianteollisuusyritys Bakeliten tehdas Kiteen Puhoksella sekä UPM:n vaneritehdas Joensuussa, jonka vaneria käytetään nesteytetyn maakaasun kuljetusalusten lämmöneristeenä estämään laivan kylkien jäätyminen [15]. Lähihistoriassa merkittävä tuotantolaitos oli Perlos Oy:n tehdas, jossa valmistettiin telekommunikaatiolaitteiden muoviosia, ja jonka ruiskuvalutoiminta jatkuu tiloissa edelleen [16]. Perlokselta siirtyneitä osajia on ollut mukana tällä hetkellä Ylämyllyllä toimivan automaattioratkaisuja vievän Kaptas Oy:n perustamisessa [17].

Pohjois-Karjalassa teknologiavienti on taloudelle tärkeässä roolissa. Viennin kohdemaita ovat Saksa, Ruotsi ja Kiina. Suurin yksittäinen teknologiainvestointi on ollut Enocellin liukosellun tuotantolinja. Huomattavia investointeja on tapahtunut myös biotaloudessa. [14]

Pohjois-Karjalan tavoitteena on olla fossiilisesta öljystä riippumaton maakunta. Tavoitteen saavuttamisessa auttaa se, että yli 60% energiasta on tuotettu uusiutuvista energianlähteistä, joissa 51% energiasta on peräisin puusta. Fossiilista lämmitysöljyä käytetään vain 5% koko energian kulutuksesta. Pohjois-Karjalan hiilijalanjälki on kansallista keskiarvoa alemmalla tasolla. [14]

2.2 Puhos

Kiteellä sijaitsevassa Puhoksen keskustaajamassa on 4 669 asukasta [18]. Puhoksessa toimii 776 yritystä, joista neljä työllistää yli 100 työntekijää [19]. Suurimmat teollisuusyritykset liikevaihdon perusteella ovat nosto- ja siirtolaitteita valmistava Kesla Oyj 40 M€ [20] sekä Bakelite Oy 38 M€ [21] (aikaisemmalta nimeltään Momentive Specialty Chemicals Oy [22], kaupparekisterissä nimellä Bakelite Oy [21]). Bakelite Oy:n lähellä sijaitsee myös toinen kansainvälinen kemianteollisuuden erikoistunut suuri yritys Surfactor Oy, joka toimittaa pinnoiteaineita muulle teollisuudelle [23, 24]. Puhoksessa on myös Pohjois-Karjalan koulutuskuntayhtymä Riverian ammatillinen koulutusyksikkö, josta valmistuu mm. koneistajia ja teollisuuden asentajia [25].

Puhoksessa toimi vuonna 1993 perustetun Puhos Board Oy:n lastulevytehdas nykyisten Bakelite Oy:n ja Surfactor Oy:n lähellä, joka lopetti toimintansa syksyllä 2011 ja venäläisen sijoitusyhtiö Fiater Oy:n piti jatkaa sen toimintaa [26]. Vuonna 2013 kesäkuussa näytti siltä, että Puhos Boardin tuotantolaitteet myydään pois Kiteen tiloista [27]. Puhos Boardin liikevaihto oli vuonna 2007 62 M€ [28], ja se työllisti 86 henkilöä [29]. Lisäksi vuoden 2019 lopussa Kiteeltä lakkautettiin Stora Enson kuusisahatavaran tuotanto perusteena keskittää toiminto Varkauteen. Stora Enson sahan sulkeminen johti 73 henkilön irtisanomiseen [30]. Sulkemista seuraavien kahden vuoden aikana havaittiin kuitenkin sahatavaran hinnassa historiallinen nousu [31].

Puhoksen teollisuusalueen itäpuolelta kulkee valtatie 6 ja alueella on olemassa satama- sekä raideyhteydet. Teollisuus on yhdistetty Fingridin 110 kV siirtolinjaan kytkinasemalla. Puhos Boardin entiset tuotantotilat on yhdistetty sähköverkkoon 10 MW

tehoisella 20 kV sähköliittymällä [22]. Teollisuusalueelta Kiteen asuintaajamaan on noin 14 kilometrin matka. Puhos Boardin toimitiloihin etsitään uutta toimijaa [22, 32]. Puhos Boardin toimitilan sijainti Bakelite Oy:n, Puhoksen syväsataman, raideyhteyden ja Fingridin kytkinaseman läheisyydessä voisi tehdä tilan sopivaksi uusiutuvien polttoaineiden tuotantoon.



Kuva 2: Suurien teollisuusyritysten sijainti Puhoksen teollisuusalueella [33].



Kuva 3: Kemianteollisuuden sijainti Tolosenmäen teollisuusalueeseen ja Kiteen asuintaajamaan nähden [33].

2.2.1 Bakelite Oy

Kiteen liimatehdas perustettiin vuonna 1971 [34]. Ainakin vuodesta 1975 lähtien liimatehdas toimi nimellä Dynoresin Oy [35]. Yhdysvaltalainen Bakelite Oy osti Kiteen liimatehtaan toiminnot Dynoresin Oy:ltä vuonna 2000 [36]. Bakelite Oy toimi nimillä Momentive Specialty Chemicals Oy [34] ja Hexion Specialty Chemicals Oy [37] kunnes vaihtoi nimensä takaisin Bakelite Oy:ksi alkaen syyskuusta 2021 [38].

Bakelite Oy:llä on Puhoksen tehtaalla kolme kemian tuotantoprosessia sekä energiantuotantoprosessi. Kemian prosessit ovat formaliinin, hartsien sekä jauhekovetteen valmistus [37]. Tärkeimpiä käytettäviä raaka-aineita ovat urea, fenoli, metanoli, lipeä ja melamiini [37]. Tehdas tuottaa kaiken tarvitsemansa lämmön kevyellä polttoöljyllä, jätekaasulla ja nestekaasulla kahdessa polttokattilassa. Tehdas hyödyntää lisäksi formaliiniprosessin jätelämpöä [37]. Tehtaalla ollaan aloittamassa myös triatsiinin valmistusta [37]. Triatsiinia käytetään poistamaan hiilidioksidia ja korroosiota aiheuttavia rikkiepäpuhtauksia hiilivedyistä, kuten maakaasusta [39, 40]. Rikkiyhdisteet poistetaan myös niiden myrkyllisyyden takia ja lisäksi erotetulla ja alkuainemuotoon jalostetulla rikillä on myös myyntiarvoa [40].

Liimatehtaan aloittaessa suurin nykyisen Bakelite Oy:n asiakas oli Puhos Boardin lastulevytehdas ja Bakelite Oy vie edelleen ulkomaille lastulevyhartseja [38]. Aivan liimatehtaan vieressä sijaitseva Surfactor Oy (entinen Dynea Overlays Oy [41]) on myös suuri asiakas [38]. Tällä hetkellä käynnissä oleva siirtyminen betonirakentamisesta puurakentamiseen parantaa tehtaan kannattavuutta, koska tehtaan tuotteita käytetään vaneri- ja kertopuutuotteiden valmistuksessa [34, 38]. Vaneri- ja kertopuutuotteiden liima-aineena käytetty fenoliformaldehydihartsia on tuotantomäärältään Bakelite Oy:n tärkein valmistama kemikaali [37]. Vuonna 2014 70 % liimatehtaan tuotteista jäi Suomeen [34].

2.2.2 Jätteenkäsittely

Kiteen jätteenkäsittely toteutetaan Sopensuolla sijaitsevalla käsittelyasemalla [42, 43]. Käsittelyasemalta yhdyskuntajäte toimitetaan Fortum Waste Solutions Oy:n (entisen Ekokem Oy:n) Kotkan jätteenpolttolaitokselle ja biojätteestä tehdään biokaasua Biokymppi Oy:n biokaasulaitoksella, joka sijaitsee myös Sopensuolla [43]. Sopensuolla sijaitsee myös kaatopaikka puhtaille ylijäämämaille ja pysyväksi luettaville rakennusjätteille [42]. Kiteen kaupungille on edullisempaa luovuttaa yhdyskuntajäte Fortum Waste Solutions Oy:lle kuin sijoittaa se kaatopaikalle, koska tällöin jätteestä ei makseta 70 €/tonni -suuruista jäteveroa, vaan 62,82 €/tonni suuruinen käsittelymaksu [44].

Ekokem Oy kartoitti mahdollisuutta rakentaa yhdyskuntajätettä polttava voimalaitos, mutta toistaiseksi rakentamisen valmistelu on keskeytetty [45, 46]. Voimalaitoshankkeen kannattavuudelle on tärkeää jätteen saatavuus riittävän korkealla jätteen toimittajalta saatavalla käsittelymaksulla [45]. Lisäksi kannattavuudelle tärkeää on sähkö- ja lämpöenergiasta saatava hinta [45]. Fortum Waste Solutions Oy:n edustajan mukaan Puhoksen teollisuusalueeseen liittyvät muut kehityshankkeet voivat edesauttaa jätteenpolttolaitoksen rakentamishankkeen ottamista uudelleen käsittelyyn [46].

Ekokem Oy:n jätevoimalan rakennus- ja investointisuunnitelmien tekovaiheessa 2010-luvun alussa Joensuun sitoutuminen toiseen jätevoimalasuunnitelmaan Varkauden

Riikinnevalle sai mahdollisesti osittain Ekokem Oy:n toteamaan suunnitelman Puhoksen jätevoimalasta toistaiseksi kannattamattomaksi [46]. Nykyisin Puhos Oy, Joensuun ja neljän lähikunnan Ilomantsin, Kontiolahden, Liperin ja Polvijärven omistama jätehuolto-yhtiö on osakkaana Riikinvoima Oy:ssä, jonka voimalaitokseen Varkauteen Pohjois-Karjalan maakuntakeskuksen jätteet kuljetetaan [47, 48]. Ekokem Oy:n alkuperäisten suunnitelmien mukaan Varkauden Riikinnevan voimalaitoksella tai Puhos Boardin tehtaan sulkemisella ei ole yksittäisinä tekijöinä käänteentekevää vaikutusta Puhoksen jätevoimalan kannattavuudelle ja jätteen saatavuus on riittävä [49, 50]. Olennainen tekijä kannattavuudessa on kuitenkin lämmönkäyttäjien rooli [51]. Vuonna 2005 tehdyn jätteenpolttoa Puhoksen teollisuusalueella koskevan ympäristövaikutusten arviointiraportin [52] mukaan jätteenpolttolaitos sulkisi teollisuuden lämpökattiloita.

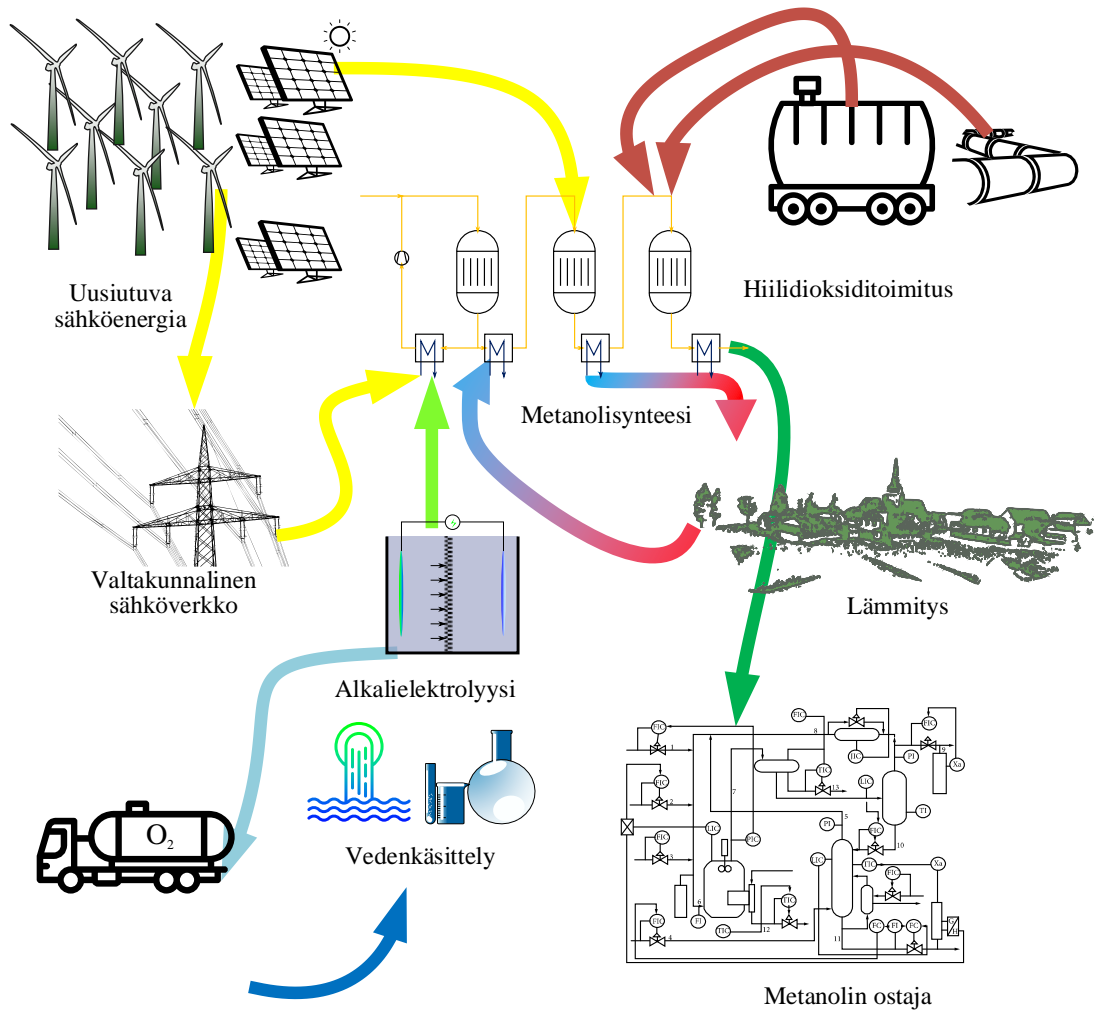
2.2.3 Hiilidioksidin talteenottopotentiali

Suomen ympäristökeskuksen mukaan Kiteen teollisuus ei aiheuta lainkaan kasvihuonekaasupäästöjä [53], joten teollisuudesta päästöistä ei ole mahdollista hankkia hiilidioksidiraaka-ainetta. Suurin hiilidioksidipäästö tulee maataloudesta, jossa päästöt olivat 36 300 hiilidioksidiekvivalenttitonnia vuodessa, mutta maatalouden hiilidioksidipäästöt koostuvat usein typen oksideista ja metaanista, joita ei voi käyttää raaka-aineina synteesiprosessissa. Sen sijaan ympäristökeskuksen tilastointikategoria ”Muu lämmitys” sisältää 20 000 hiilidioksidiekvivalenttitonnia vuodessa, joka koostuu suurella todennäköisyydellä Kiteen Lämpö Oy:n kaasutusta käyttävien kaukolämpökattiloiden päästöistä [54]. Molekyyli-painojen kautta laskettuna Kiteen Lämpö Oy:n lämpökattiloiden päästöt riittäisivät vuosittain 14 500 metanolitonniin.

3 Uusiutuva energia- ja kemikaaliekosysteemi

Lukuisten ympäristö- ja talousnäkökohtien vuoksi niin energiantuotanto kuin -kulutuskin käyvät läpi siirtymää kohti fossiilivapaita, uusiutuvia toimintamalleja [55–59]. Keskeinen rooli siirtymässä on päästöttömällä sähköenergialla [60]. Puhtaan sähköenergian tuotannossa erityisesti tuulivoiman asennettu kapasiteetti Suomessa on kasvanut lähtien vuodesta 2010 lähes olemattomasta noin 3500 MW tehoon kymmenessä vuodessa ja sen odotetaan kasvavan seuraavan kahden vuoden aikana lähes 50 % nykyisestä [61]. Kokonaissähköenergian tuotannosta tuulivoima kattaa jo 10 % [62]. Lisäksi fossiilivapaata sähköenergiaa Suomeen alkaa tuottaa Olkiluoto 3 ydinvoimala, jonka odotetaan toimivan täydellä 1600 MW teholla 2022 kesäkuussa [63]. Uusiutuvalla tuuli- ja ydinenergialla pystytään tuottamaan fossiilivapaasti liikenteen polttoaineita ja kemianteollisuuden raaka-aineita. Liikenteen energiankulutus Suomessa oli vuonna 2020 noin 46 TWh polttoaineita ja alle 1 TWh sähköä [64] kun taas sähkön hankinta oli noin 81 TWh [62].

Kuva 4 on esitetty uusiutuvan ekosysteemin materiaali- ja energiavirtoja pääpiirteissään. Uusiutuvan ekosysteemin ero fossiiliseen toimintamalliin on siinä, että hiiltä ja energiaa pyritään sitomaan lopputuotteeseen sen sijaan, että fossiilienergiaa vapautettaisiin. Kuva 4 esimerkkiekosysteemissä hiilidioksidi sidotaan metanoliin ja synteessiprosessissa vapautuvaa lämpöä käytetään kaukolämpöverkossa.

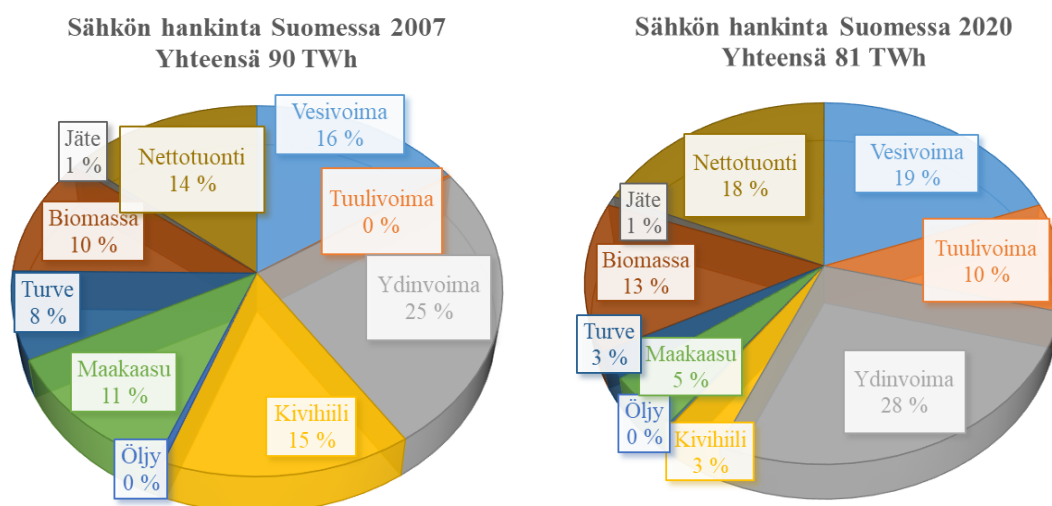


Kuva 4: Mahdollinen ekosysteemi

3.1 Uusiutuvien tuotteiden sähköenergian tarve

Uusiutuva materiaali- ja polttoaine-ekosysteemi tarvitsee sähköntuotantokapasiteettia. Jätteenpoltto ja monet materiaalien synteessiprosessit vapauttavat energiaa, mutta erityisesti vedyn tuotanto kuluttaa niin paljon sähköenergiaa, että uusiutuvia polttoaineita ja materiaaleja tuottava ekosysteemi kokonaisuutena sitoo energiaa. Energiankulutus on väistämätöntä jo pelkästään polttoaineen ja sen raaka-aineiden veden ja hiilidioksidin sidosenergioita tarkastelemalla – korkean energiasisällön tuotteen valmistamiseksi energia on otettava jostain. Minimisähköenergian tarve pystytään laskemaan

energiataselaskennalla ja energiatehokkuuden parantamisessa pyritään pääsemään mahdollisimman lähelle teoreettista minimienergian tarvetta.



Kuva 5: Sähkön hankinta Suomessa [62]

3.1.1 Uusiutuva primäärienergia

Uusiutuvan materiaali- ja polttoaine-ekosysteemin käyttämä sähkö on oltava tuotettu kestävästi tuuli-, aurinko-, geotermisellä- tai vesivoimalla tai käyttämällä kestäviä polttoaineita kuten soveltuvaa biomassaa tai jätettä. Kestävän jäte- tai biovoimalan sähkö muunnettuna kestäviksi raaka-aineiksi tai polttoaineiksi vähentää fossiilisesti tuotettujen vastaavien tuotteiden tarvetta.

3.1.2 Suljettu sähköverkko

Kun sähköverkkotoimintaa harjoitetaan maantieteellisesti rajatulla teollisuus- tai elinkeinoalueella eikä sähköä toimiteta kuluttaja-asiakkaille, siihen voi saada sähkömarkkinalain 11 § mukaisen suljetun jakeluverkon sähköverkkoluvan [65]. Suljetun sähköverkon lupa vapauttaa verkonhaltijan tietyistä julkiselta sähköverkolta vaadituista velvoitteista ja voi tuoda kustannussäästöjä sähköä tuottavalle ja käyttävälle yritykselle tai yhteisölle [66]. Suomessa suljettuja sähköverkkoja on vain neljä, joista yksi sijaitsee

Porvoon Kilpilahden öljynjalostamon alueella [67]. Jos suljetun sähköverkkoluvan hakija ei täytä teknisiä ja turvallisuuteen liittyviä kriteereitä, sen täytyy ostaa verkkopalvelut jakeluverkkoyhtiöltä [67]. Suomessa suljetun sähköverkon toimilupa on seuraavilla sähköverkoilla:

- Kiteen Puhoksen teollisuusalueen Liimaniemen sähköliittymä Oy
- Porvoon Kilpilahden teollisuusalueen Aurora Kilpilahti Oy
- Kotkan Karhulan teollisuuspuiston sähköverkko Kotkan Energiaverkot Oy
- Googlen Haminan datakeskuksen Tuike Finland Oy [68].

3.1.3 Liityntä sähköverkkoon

Puhoksen teollisuusalue sijaitsee Pohjois-Karjalan Sähkö Oy:n (PKS Oy:n) sähkönsiirtoverkon (sama kuin sähköjakeluverkon) alueella [69]. Kuva 6 on esitetty PKS Oy:n jakeluverkon toiminta-alue. Sähköä kuluttava teollisuusasiakas voi ostaa sähköliittymänsä jakeluverkkoyhtiöltä, jolloin liityntäpisteestä maksetaan PKS Oy:n liityntähinnaston [70] mukainen liittymismaksu 10,5 €/kVA. Lisäksi verkkoyhtiölle maksetaan kiinteä kuukausimaksu, kiinteä liityntätehosta riippuva maksu, kiinteä loistehomaksu sekä kulutetusta sähköenergiasta verkkopalveluhinnaston mukainen siirtomaksu [71].



Kuva 6: Pohjois-Karjalan sähkö Oy:n jakeluverkon toiminta-alue [49]

Puhoksen teollisuusalue sijaitsee Kuva 7 mukaisesti kantaverkkoyhtiö Fingrid Oy:n 110 kV voimalinjan läheisyydessä. Fingrid Oy tarjoaa mahdollisuuden asiakkaan suoralle liittymälle 110 kV voimajohtoon joko kytkinlaitosliittymällä tai voimajohtoliittymällä [72]. Voimajohtoliittymän enimmäisteho kulutukselle on 25 MW kun taas kytkinlaitosliittymällä enimmäisteho on 250 MW [72]. ”Liitettävän tehon määrä riippuu myös alueen muiden hankkeiden sijoittumisesta sähköverkkoon. Liitettävyyden ja kantaverkon kapasiteetti varmistuvat sopimusvaiheessa [72]”. Fingrid Oy:n kaikille avoimeen tietoon perustuen Puhoksen teollisuusalueelle on rakennettu kytkinasemalla liittytäpiste kantaverkkoon, mutta todellinen Fingrid Oy:n sallima kytkinaseman kuormitus ei ole avointa tietoa. Ylärajana teollisuusalueen kokonaissähköteholle voidaan pitää Fingrid Oy:n kantaverkkoon liittyjän oppaan mukaista arvoa 250 MW [73]. Kuva 7 Puhoksen 110/20 kV sähköasema on siirtynyt 2010-luvun aikana Fingrid Oy:ltä PKS Oy:n omistukseen osana kantaverkon kehittämistä [74-77]. Tämänhetkinen sähköliityntä

Puhos Boardin entiseen toimitilaan on 20 kV, 10 MW [78]. Oletettavasti sähkön siirtokustannukset olisivat edullisemmat, jos Kuva 7 sähköasemalla olisi yrityksen omistuksessa oleva suora liityntä kantaverkkoon.



Kuva 7: Puhoksen suurimpien kemianteollisuuden yritysten sähköverkon kytkinaseman sijainti 110 kV sähkölinjan läheisyydessä [79].

3.1.4 Sähköverkko

Sähköverkolla on tärkeä rooli uusiutuvan ekosysteemin toiminnassa johtuen osakuormakysymyksistä. Kuten tuotantolaitokset yleensä, ekosysteemin prosessit toimivat taloudellisimmin, kun niiden tuotantoarvot, kuten vedyn, metanolin tai CO₂:n tuotanto eivät vaihtele, jolloin sähkönkulutuskaan ei vaihtele. Erityisesti uusi teknologia, mitä osa uusiutuvan ekosysteemin prosesseista edustaa, voi vaatia vakiona pysyviä tuotantoarvoja jo pelkästään toimiakseen. Suunniteltua pienempi tai suurempi tuotanto heikentää energiatehokkuutta myös hyvin tunnetuissa ja pitkään käytössä olleissa

sovelluksissa, mikä on tuttua jo henkilöautosta, missä vain tietyllä vaihteella ja nopeudella kilometriä kohti kulutettu energia on minimissään. Sähköverkosta saadaan uusiutuvaan ekosysteemiin täysin vakiona pysyvä sähköenergian syöttö.

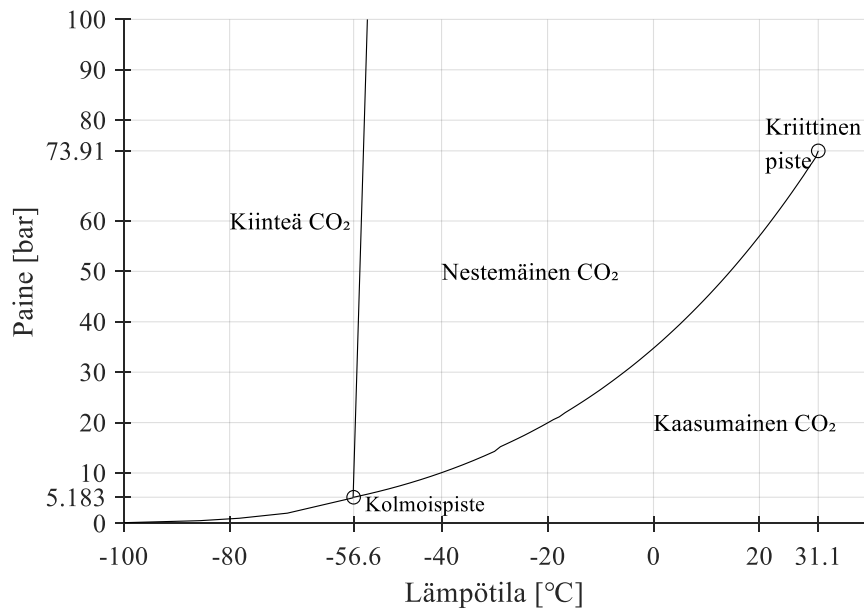
Jos uusiutuvassa ekosysteemissä on paikallista sähköenergian tuotantoa, kuten lähellä sijaitseva ja valtakunnallisesta sähköverkosta erillinen tuuli- tai aurinkovoimala ja energiantuotanto ja käyttö on saman toimijan hallussa, sähköä voi käyttää omakustannehintaan vero- ja siirtokustannusvapaasti. Tuuli- tai aurinkovoimalasta saatu teho vaihtelee olosuhteiden mukaan voimakkaasti asennetun tehokapasiteetin ja nollan välillä. Näin ollen kattaakseen koko energiantarpeen, sähköntuotanto pelkästään tuuli- ja aurinkovoimalla vaatii jopa monikymmenkertaista asennettua kapasiteettia ekosysteemin kulutukseen nähden. Sähköenergian ylituotanto ei ole taloudellisesti ongelma, koska ylijäämänsähkö voidaan myydä valtakunnalliseen sähköverkkoon tai sen avulla voidaan täyttää esimerkiksi vetypuskuria. Sen sijaan alituotanto ilman täydentävää tehoa valtakunnallisesta sähköverkosta johtaa ekosysteemin kalliisiin alas- ja ylösajotilanteisiin. Päätökseen paikallisen tuotantokapasiteetin suuruudesta vaikuttaa ennen kaikkea saatavilla olevan pääoman hinta. Jos tukia ja esimerkiksi pääomainoja on saatavilla, niin oman tuotannon rakentaminen voisi tulla kannattavaksi. Jos ekosysteemi rakennetaan verkkosähkön varaan, niin vety- ja muilla materiaalipuskureilla on mahdollista ajoittaa sähköntarvetta niin, että sitä edellyttävät prosessit voivat toimia koko ajan vakiokuormituksella.

3.2 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on uusiutuvan materiaali- ja polttoaine-ekosysteemin raaka-aine. Hiilidioksidi (CO_2) on toisaalta myös maapallon lämpenemistä edistävä kasvihuonekaasu, jonka pitoisuus kasvaa ja on tällä hetkellä 412.5 ppm maapallon ilmakehässä [80]. Toistaiseksi hiilidioksidia käyttävät raaka-aineena esimerkiksi virvoitusjuomateollisuus, sikojen teurastamot sekä kasvihuoneet [81, 82]. Tällä hetkellä suurin osa raaka-aineena käytettävästä hiilidioksidista tuotetaan maakaasusta ammoniakkituotannon yhteydessä [81]. Päästövähennysten saavuttamiseksi hiilidioksidi

täytyy kuitenkin hankkia raaka-aineeksi teollisuuden sivuvirroista, kuten voimalaitosten savukaasuista tai erottamalla ilmakehästä, vaikka fossiilinen hiilidioksidi olisikin edullisempaa.

Hiilidioksidi on huoneenlämmössä ja ilmakehän paineessa kaasu. Kuva 8 hiilidioksidin faasidiagrammista voi lukea paineen ja lämpötilan, missä olomuodon muutokset tapahtuvat. Ilmanpaineessa hiilidioksidi muuttaa olomuotoa suoraan kaasusta kiinteäksi kuivajääksi -78.5 °C lämpötilassa. Kaasumaisen hiilidioksidin nesteyttäminen vaatii paineen noston yli kolmoispisteen paineen, joka on noin 5 bar. Esimerkiksi 50 bar paineessa hiilidioksidikaasu nesteytyy jo noin 13 °C lämpötilassa. Epäpuhtaudet vaikuttavat faasimuutosten lämpötila- ja painerajoihin. Nesteytyksellä voi olla rooli hiilidioksidin varastoinnissa.



Kuva 8: Hiilidioksidin faasidiagrammi

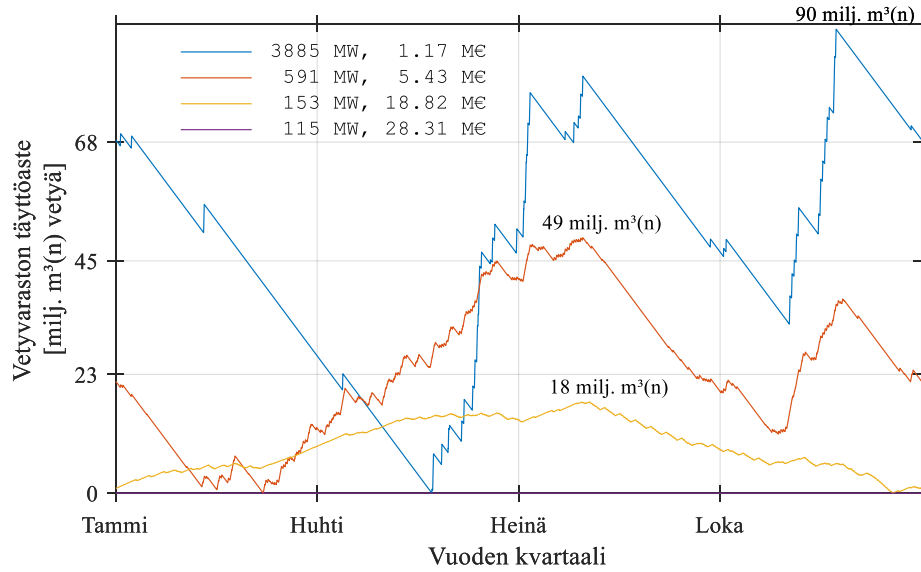
3.3 Vedyn tuotanto

Vedyn tuotannossa parasta teknologiaa edustaa tällä hetkellä alkalielektrolyysi, jolla pystytään edullisimmin tuottamaan vetyä suurella kapasiteetilla. Kuten monet

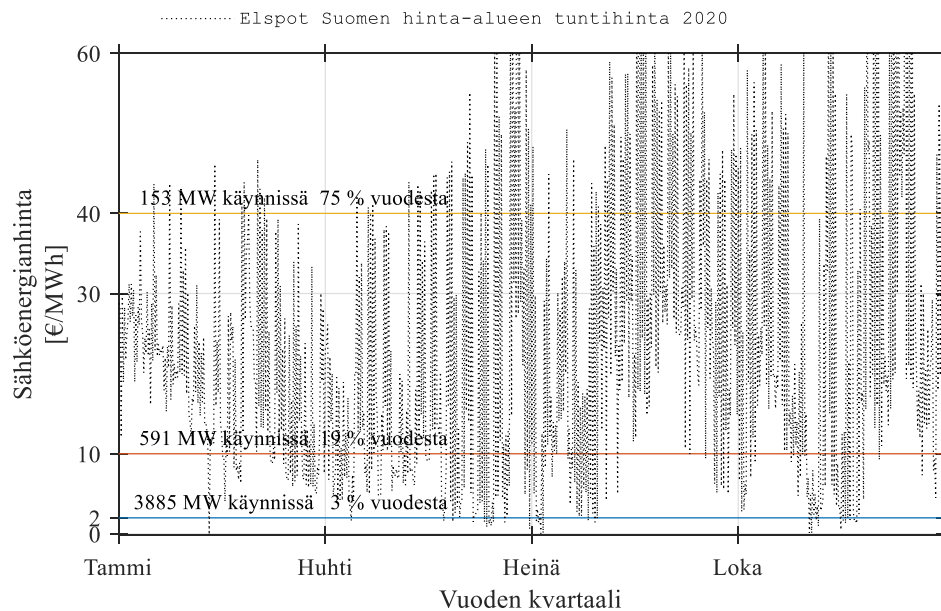
kemianteollisuuden prosessit, alkalielektrolyysi toimii parhaiten tasaisella tuotantoteholla.

3.3.1 Vetypuskuri

Käytettävän sähkön kustannukseen on mahdollista vaikuttaa tuottamalla vetyä vain silloin, kun sähköenergia on edullista. Laskettuna 100 000 tonnin metanolituotannolle vedyn tuotantoon kuluva sähkö maksaa noin 28 M€ vuodessa. Elektrolyysin tehoa kasvattamalla voidaan tuottaa vetyä varastoon, kun sähköenergian hinta on alhainen ja käyttää vetyä varastosta vakiokulutuksella ympäri vuoden. Lisäämällä asennettua elektrolyysitehoa noin 33 %, on sähkön hankintakustannus enää noin 19 M€. Mitä enemmän elektrolyysitehoa asennetaan, sitä harvemmin elektrolyysi on käynnissä ja sitä suurempi vetyvarasto tarvitaan. Kuva 9 on esitetty neljällä eri elektrolyysiteholla vetyvaraston täyttöaste, jos elektrolyysi käynnistetään aina sähköhinnan alittaessa sellaisen kynnyshinnan, että vuodelle kertyy tarpeeksi käyttötunteja vetytarpeen täyttämiseen. Tehoja vastaavat tuotannon aloittamisen/pysäyttämisen kynnyshinnat ja vuotuiset käyttöajat on esitetty sähkön hinnan kanssa Kuva 10.



Kuva 9: Vetyvaraston täyttöaste eri vuodenaikoina neljällä eri elektrolyyseritehovaihtoehdolla. Vetyvarastosta saatava sähköenergian kustannussäästö on ilmeinen, mutta tehokasta vetyvarastoteknologiaa ei ole vielä käytössä. Myös suuremman elektrolyyserin ja sille tuotavan sähkökapasiteetin asentaminen tuovat lisäkustannuksia.



Kuva 10: Sähköpörssin Suomen hinta-alueen vuoden 2020 sähköenergian hinta ja rajahinnat elektrolyyserin käynnistämiseksi kolmella eri elektrolyyserin teholla. Myös vuotuinen kokonaiskäyttöaika eri elektrolyyserivaihtoehdoille on esitetty.

3.4 Hiilidioksidin ja vedyn jatkojalostus

Hiilidioksidi ja vety ovat polttoaine- ja kemikaalisysteemin raaka-aineita, joista pystytään erilaisilla kemiallisilla yksikköprosesseilla tuottamaan sopivia lopputuotteita. Jos kaasutusta käytetään ekosysteemin osana, niin silloin myös hiilimonoksidia käytetään synteessin lähtöaineena.

3.4.1 Synteesikaasureitti

Synteesikaasusta eli hiilimonoksidin ja vedyn seoksesta esimerkiksi metanolia tuottava prosessi on laajasti käytettyä sekä suhteellisen edullista ja varmaa teknologiaa. CO₂:sta ja vedystä voidaan käänteisellä vesikaasureaktiolla tuottaa synteesikaasua. Jos hiilidioksidista tuotettua synteesikaasua käytetään metanolin tuotantoon hiilidioksidin ja vedyn sijasta, niin metanolisynteesiin liittyviä teknologian riskejä pystytään vähentämään. Toisaalta synteesikaasun tuottaminen hiilidioksidista vaatii oman erillisen prosessinsa, mikä lisää yksikköprosessien määrää.

3.4.2 Hiilidioksidin ja vedyn suora synteesireaktio

Hiilidioksidi ja vety reagoivat katalyytin avulla suoraan metanoliksi, mutta reaktio ei tapahdu yhtä täydellisesti ja voimakkaasti kuin synteesikaasun reaktio metanoliksi. Prosessi hiilidioksidin muuntamiseen metanoliksi on olemassa, mutta ei ole yhtä tunnettu kuin synteesikaasun muuntaminen. Hiilidioksidin suorassa reaktiossa syntyy myös vettä, joka on erotettava metanolista tislauksella.

3.4.3 Polttoaineet

Fischer-Tropsch-reaktio tuottaa synteesikaasusta ketjumaisten hiilivety-yhdisteiden seoksen, jonka koostumus muistuttaa dieselöljyä. Ero Fischer-Tropsch-reaktion ja metanolisynteessin välillä on reaktorin olosuhteet, kuten katalyytti, paine ja lämpötila. Myös synteesikaasun hiilimonoksidi-vety suhde on erilainen riippuen siitä, millaista lopputuotetta halutaan.

3.4.4 Kemikaalituotanto

Hiilidioksidista ja vedystä tuotettua metanolia käytetään sellaisenaan lukuisissa kemianteollisuuden prosesseissa ja on sellaisenaan arvokas tuote. Metanolista pystytään tuottamaan melko monimutkaisella prosessilla (MTO) alkeeneja, eli kaksoissidoksen hiilivetyjä. Alkeenit polymerisoituvat, minkä ansiosta niistä pystytään tekemään muovituotteita.

3.5 Hiilidioksidin suora hyödyntäminen

Hiilidioksidi on erityisesti elintarviketeollisuuden käyttämä lopputuote, jota voidaan myös myydä sellaisenaan. Hiilidioksidi on muun muassa virvoitusjuomissa käytetty happamuuden aiheuttaja, kasvihuoneissa välttämätön kasvun edellytys sekä hitsauksessa käytetty kaasu.

3.6 Hapen tuotanto ja hyödyntäminen

Elektrolyysi tuottaa tilavuudessa mitattuna 50% happea vedyn tuotantoon verrattuna puolittaessaan vesimolekyylin vety- ja happimolekyyleiksi. Happea käytetään sellaisenaan esimerkiksi sairaaloissa, metallinjalostuksessa sekä hitsauksessa. Happea pystytään myös käyttämään polttoaineiden, kuten jätteen tai biomassan kaasutukseen. Kaasutuksesta saatava synteetikaasu voi osoittautua talteen otettua hiilidioksidia edullisemmaksi raaka-aineeksi tuotesynteesiin.

4 Synteettisten polttoaineiden valmistus

Polttoaineiden valmistuksessa eräs merkittävä aikakausi on ollut Euroopassa 1800-luvun alusta 1970-luvulle, jolloin hiilestä tehtiin kuivatislauksella kaasua valaistus-, lämmitys- ja teollisuuskäyttöön. Jäännöskoksi käytettiin metallinjalostuksessa. Kaasuun saatiin enemmän vetyä höyrykäsittelyllä. Tämä aikakausi loppui maakaasun laajaan käyttöönottoon. Hiilikaasuista kuitenkin huomattiin, että ne reagoivat katalyyttien avulla esimerkiksi maakaasuksi ja metanoliksi. Nykyään polttoaine- ja kemikaalisynteesi aloitetaan samalla tavalla sopivasta kaasuseoksesta. Raaka-aineena käytettävä kaasuseos on kuitenkin tuotettava muutoin kuin fossiiliraaka-ainetta kaasuttamalla.

Euroopassa laajasti käytössä ollut hiilestä tuotettu talouskaasu tuotettiin kuivatislauksella eli pyrolyysillä, jossa kaasu saadaan irtoamaan kiinteästä hiilestä kuumennuksella. Tämä hiilikaasu ei kuitenkaan sovellu kemikaalisynteesin lähtöaineeksi. Kivihiiilestä, öljytuotteista, biomassasta ja maakaasustakin voidaan kaasutusprosessilla tuottaa kemikaalisynteesiin soveltuvaa kaasua. Kaasutuksen ero kuivatislaukseen (pyrolyysiin) on ilman, puhtaan hapen ja vesihöyryn lisääminen sopivan koostumuksen saavuttamiseksi. Kestävästi tuotetut kemikaalit edellyttävät synteetikaasun hankkimista uusiutuvasta biomassasta tai jäteraaka-aineesta kaasuttamalla. Synteetikaasuna voidaan myös käyttää talteen otetun hiilidioksidin ja veden elektrolyysillä tuotetun vedyn seosta, jolloin tuotannon aikaiset päästöt ja ympäristön kuormitus ovat pienimmillään. Ilmakehän hiilidioksidia käytettäessä raaka-aineina ovat ilma ja vesi. Nykypäivän uusiutuvia kemikaali- ja polttoainetuotantoprosesseja suunniteltaessa onkin tavoitteena teknisesti ja taloudellisesti soveltuvan synteetikaasutuotannon toteuttaminen käytettävissä olevista energia- ja raaka-ainelähteistä.

Valmet Oy on toimittanut Lahti Energia Oy:lle voimalaitosmittaluokan jätteen kaasutuslaitoksen energiantuotantotarkoitukseen. Prosessista saatava kaasu on tarkoitettu poltettavaksi. Kemikaalisynteesiin tarvittavalla kaasulla on erilaiset koostumus- ja puhtausvaatimukset. Sopivan kaasutuksen, kaasun jatkokäsittelyn ja synteetiproessin yhteensovittaminen vaatii suunnittelu- ja kehitystyötä. On kuitenkin selvää, että

kemikaalisynteesiin soveltuvan kaasun tuotanto edellyttää enemmän erilaisia fysikaalisia ja kemiallisia yksikköprosesseja kuin energiantuotantoon tarkoitettun, mikä tarkoittaa korkeampia kaasutuksen hankinta- ja käyttökustannuksia.

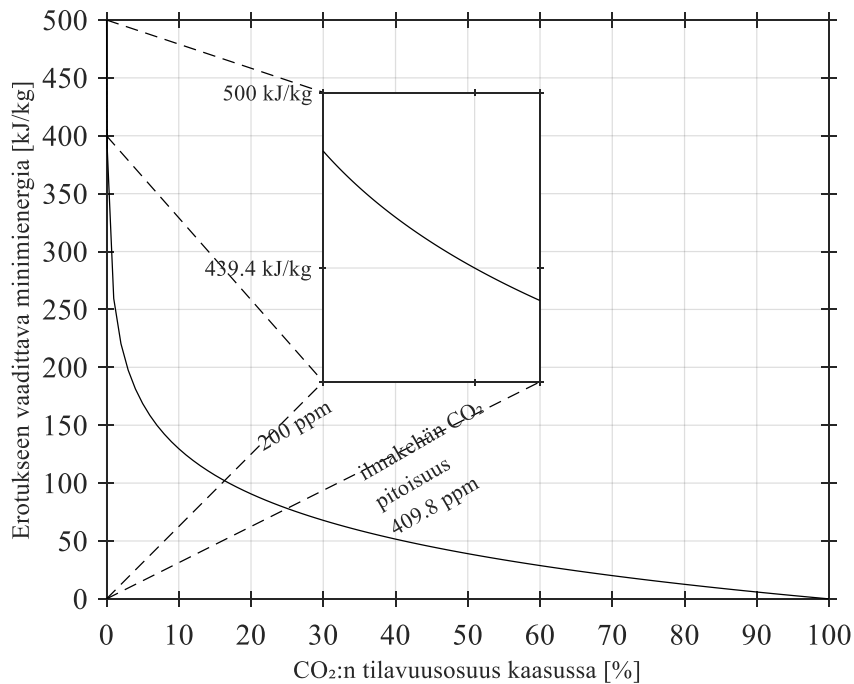
Taulukossa 1 on selkeytetty eroja maakaasun, synteetikaasun ja tuotekaasun välillä, joista kaikki ovat kemikaali- ja polttoainesynteesissä keskeisiä kaasuseoksia.

Taulukko 1: Eri kaasujen eroja

Kaasu	Maakaasu	Synteetikaasu	Synteetireaktorissa käytettävä kaasu
Jalostusaste	Matala	Keskitaso	Korkea
Tuotanto	Meren- tai maanalaisesta kaasukentästä tai öljynjalostuksen sivutuotteena hankittu. Voidaan myös tuottaa synteetikaasusta (tällöin korkea jalostusaste).	Jalostettu luonnollisesti esiintyvistä raaka-aineista, kuten kivihielestä, biomassasta, raakaöljystä tai jätteestä. Voidaan myös tuottaa maakaasusta.	Jatkojalostettu synteetikaasusta puhdistamalla ja koostumusta säätelemällä. Vaihtoehtoisesti valmistettu veden elektrolyysillä tuotetusta vedystä ja talteenotetusta hiilidioksidista sekoittamalla.
Koostumus	Pääkomponenttina metaani	Hiilimonoksidi, vety, hiilidioksidi, rikkikaasut, kiinteät epäpuhtaudet	Hiilimonoksidi, vety
Käyttötarkoitus	Kemikaalisynteesin raaka-aine, voimalaitos-, liikennepolttoaine, lämmitys Teollisesti tuotetun vedyn raaka-aine tällä hetkellä	Kemikaalisynteesin välivaihe, voimalaitos-, liikennepolttoaine, lämmitys	Hiilivetyjen synteesi

4.1 Hiilidioksidin talteenotto

Talteen otettava hiilidioksidi on niin teollisuuden sivuvirroissa kuin ilmakehän ilmassa kaasumaisessa olomuodossa. Kemiallisesti kaasut ovat aina toisiinsa sekoittuvia, jolloin niiden erottaminen vaatii energiaa. Kuten monissa muissakin teollisuuden prosesseissa, termodynamiikasta on laskettavissa minimienergiankulutus hiilidioksidin talteenotolle. Erotukseen vaadittava minimienergia riippuu hiilidioksidin konsentraatiosta kaasussa. Mitä enemmän hiilidioksidia kaasu sisältää, sitä vähemmän energiaa tarvitaan sen erottamiseen. Kuva 11 voi lukea erottamiseen riippuen hiilidioksidin osuudesta kaasussa. Ilmakehästä hiilidioksidin erottaminen kuluttaa vähintään 122 kWh energiaa yhtä hiilidioksiditonnia kohti nykyisellä ilmakehän CO₂-konsentraatiolla. Teollisuuden sivuvirroissa CO₂-konsentraatio on suurempi, jolloin erotukseen vaadittava minimienergia on pienempi. Tarvittava minimienergia riippuu teollisuuden pistemäisistä lähteistä erotettaessa myös siitä, mihin konsentraatioon asti kaasu puhdistetaan, koska erotusenergia CO₂-kilogrammaa kohti kasvaa kaasun puhdistuessa.



Kuva 11: Hiilidioksidin erottamiseen kaasuseoksesta teoriassa tarvittava energia

Nykyiset hiilidioksidin talteenottotekniikat perustuvat alun perin öljynjalostuksen happamien kaasujen erotukseen tarkoitettuun amiiniprosessiin. Amiiniprosessissa hiilidioksidi liukenee amiiniliuokseen vastavirtakolonissa. Hiilidioksidi sitoutuu huomattavasti tehokkaammin amiiniliuokseen kuin esimerkiksi puhtaaseen veteen. Hiilidioksidin vaikutuksesta ”happamasta” amiiniliuoksesta hiilidioksidi vapautetaan ajamalla se tulistetun höyryn läpi. Liuoksen lämpötilan nousu höyryn vaikutuksesta aiheuttaa hiilidioksidin liukoisuuden romahtamisen ja vapautumisen liuoksesta. Prosessin peruseriaate on sama riippumatta siitä, erotetaanko hiilidioksidia teollisuuden sivuvirrasta (korkean konsentraation pistelähde) vai ilmakehästä. Ilmakehästä erotettaessa hiilidioksidia kaappaavalla kemikaalilla, kuten amiiniliuoksella, ja ilmavirralla täytyy olla suuri kontaktiala ja samoin ilman virtausmäärän on oltava suuri verrattuna vastaaviin hiilidioksidin erotusmääriin pistemäisestä lähteestä. Suoralla kaappauksella ilmasta on siten korkeammat investointi- ja käyttökustannukset kuin

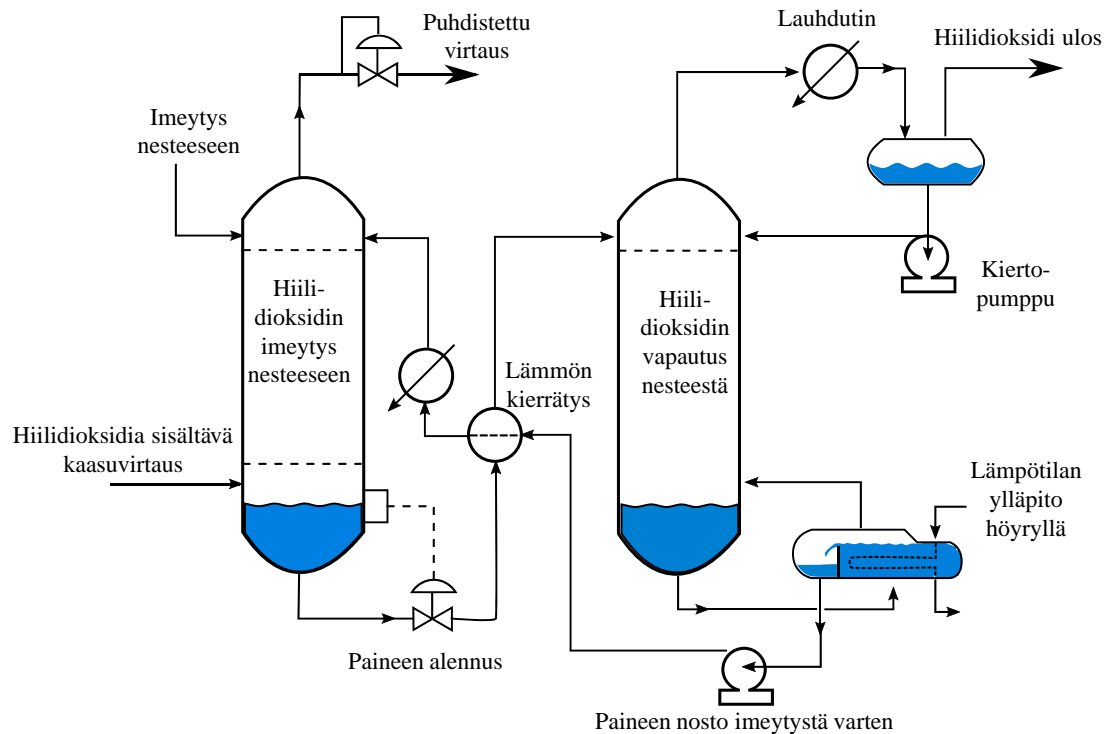
pistelähteestä kaappauksella. CO₂:n erottamisessa pistelähteestä todellinen energiankulutus on noin kymmenkertainen ja ilmakehästä noin kolminkertainen teoreettiseen verrattuna.

Taulukko 2: Hiilidioksidin erotuksen kaasuseoksesta energian kulutus.

	Erottaminen pistelähteestä				Erottaminen ilmakehästä			
	[kJ/kg]		[kWh/t]		[kJ/kg]		[kWh/t]	
	sähköä	lämpöä	sähköä	lämpöä	sähköä	lämpöä	sähköä	lämpöä
Teoreettinen	80	0	22	0	439	0	122	0
Nykytekniikka	1080	0	300	0	1256	7117	349	1977

4.1.1 Teknologian yleiskuvaus

Hiilidioksidin talteenotto perustuu nesteiden kykyyn sitoa hiilidioksidia kaasuseoksesta. Hiilidioksidia sisältävä kaasuseos tuodaan kontaktiin sopivan nesteen kanssa sopivassa paineessa ja lämpötilassa, jolloin hiilidioksidi siirtyy kaasusta nesteeseen. Neste saadaan vapauttamaan hiilidioksidi laskemalla hiilidioksidia sisältävän nesteen painetta ja korottamalla lämpötilaa. Nestettä, joka vuoroin sitoo ja vapauttaa hiilidioksidia, täytyy kierrättää, paineistaa ja lämmittää ja lisäksi erotettu hiilidioksidi myös paineistetaan, minkä takia prosessi kuluttaa energiaa. Kuva 12 on esitetty kaasupesuriin (imeytys nesteeseen) ja liuottimen regenerointiin (hiilidioksidin vapautus nesteestä) perustuvan hiilidioksiditalteenoton periaate.



Kuva 12: Hiilidioksidin erottaminen savukaasuista amiinipesulla

Tyypillisesti hiilidioksidia sitova neste on amiinin, kuten dietanoliamiinin, 2-aminoetanolin tai metyyli-dietanoliamiinin ja veden seos. Kaasuseosten amiinikäsittelyä on alun perin käytetty öljynjalostusteollisuudessa kaasujen puhdistamiseen ja sukellusveneiden ilmanpuhdistukseen. Tuotantolaitosten savukaasuvirtojen hiilidioksidin erottamiseen soveltuva sitoja-aine riippuu savukaasun koostumuksesta ja tarvittavasta erotustehokkuudesta.

4.2 Synteesikaasu

Synteesikaasu-termiä käytetään laajasti monista teollisuuden prosesseissa tuotetuista kaasuista. Tässä raportissa synteesikaasulla tarkoitetaan maakaasusta höyrykäsittelyllä sekä kivihiilestä, öljytuotteesta, biomassasta tai soveltuvasta jätejakeesta happi- ja höyrykaasutuksella (mutta ei ilmakaasutuksella) tuotettua kaasua. Lisäksi synteesikaasulla tarkoitetaan tässä yhteydessä hiilidioksidin elektrolyysillä tuotetusta

hiilimonoksidista ja veden elektrolyysillä tuotetusta vedystä sekoitettua kaasua. Mainituista synteetikaasun tuotantotavoista vain maakaasun höyrykäsittely sekä kivihiilen happi- ja höyrykaasutus ovat laajasti käytössä.

Synteetikaasu koostuu pääasiassa hiilimonoksidista ja vedystä, mutta voi sisältää tuotantotavasta riippuen epäpuhtautena hiilidioksidia, rikkikaasuja ja kiintoainehiukkasia. Synteetikaasua on jatkojalostettava ennen synteetiprosessia puhdistamalla sekä hiilimonoksidin ja vedyn suhdetta säätämällä. Kaupallisesti merkittävin synteetikaasun käyttökohde on metanolin tuotanto, vaikka synteettistä maakaasuakin myös tuotetaan.

4.2.1 Synteetikaasun nykyinen tuotanto

Synteetikaasua tuotetaan tällä hetkellä fossiiliraaka-aineiden, kuten kivihiilen, maakaasun tai muiden hiilivetyjen happi- ja vesihöyrykäsittelyllä eli kaasutuksella. Kaasutuksesta saatava tuotekaasu sisältää yleensä liian vähän vetyä hiilimonoksidiin verrattuna, minkä takia tuotekaasu käsitellään edelleen höyryllä. Höyrystä irtoaa vetyä kaasuun, mutta samalla hiilimonoksidi hapettuu hiilidioksidiksi synteetikaasussa. Hiilidioksidi poistetaan energiaintensiivisessä pesuriprosessissa. Fossiilisesta synteetikaasusta tuotetaan nykyisin valtaosa maailman metanolista.

4.2.2 Polttoaineeksi kaasuttaminen

Kiinteitä polttoaineita voidaan myös kaasuttaa polttoainekaasuksi, jolloin puhtaan hapen sijasta voidaan käyttää ilmaa. Ilman typpi jää polttoaineeksi kaasutettaessa tuotekaasuun, mistä ei ole haittaa energiasovelluksessa. Kemikaalisynteetissä typpi sen sijaan rikastuu synteetikaasun takaisinkierrätysreittiin sekä kasvattaa tarvittavaa reaktorikokoa. Pieni määrä typpeä ja muita reagoimattomia kaasuja päätyy aina metanolisynteettiin, mutta vähäkin määrä lisää typpeä synteetikaasussa huonontaa prosessin suoritusarvoja huomattavasti. Eräs biomassan kaasutukseen pohjautuvan prosessin haaste on, että biomassan kaasutuksessa muodostuu haihtuvia tervamaisia aineita. Tervayhdisteet voidaan kuitenkin muuttaa vedyksi ja häkäkaasuksi mm. katalyyttisen reformointivaiheen

avulla ja VTT on demonstroinut koko prosessin ketjun biomassan kuivauksesta Fischer-Tropsch (FT) -dieseliksi teknisesti toimivaksi Varkauden koelaitoksessa yhdessä Nesteen, Stora Enson ja VTT:n kanssa demonstraatiolaitoksen kokoluokassa 5 MW vuosina 2009-2013 [83]. VTT on tutkinut biomassan kaasutusta, syntyneen kaasun puhdistusta ja käyttöä esim. polttoaineen valmistukseen. Metanolin valmistuksessa vaadittu kaasunpuhdistusprosessi olisi suurin piirtein samanlainen kuin FT-dieselin tuotannossa vaadittu kaasunpuhdistusprosessi, koska käytettyjen katalyyttien epäpuhtauksien sietokyky on suurin piirtein samanlainen. Haasteena prosessissa on kuitenkin ollut korkeat polttoaineen kustannukset sekä taloudellisesti kestävänsä ison teollisuusmittakaavan laitoksen tarvitsema metsäbiomassan määrä ja sen logistiikka. Tämän vuoksi Suomessa ei ole vielä 2022 kevääseen mennessä investoitu ison mittakaavan kaasutuslaitokseen, joka tuottaisi liikennepolttoainetta. Suomessa on kuitenkin useita teollisuusmittakaavan kaasuttimia, joissa tuotetaan puun kuoresta poltettavaa kaasua sellutehtaan meesauunille esim. Metsä Fibren Äänekosken ja Joutsenon laitoksilla. Lisäksi poltтокаasua tuotetaan voimalaitokselle biomassasta Vaskiluodon Voiman kaasuttimella ja jätteestä Lahti Energian voimalaitoksella. Ulkomailla on kuitenkin jo teollisuusmittakaavan laitoksia, jotka tuottavat kaasutuksen kautta metanolia ja etanolia biomassan tai jätteen kaasutuksen kautta, mm. kanadalainen Enerkem-yritys [84].

Biomassan kaasutusprosessi synteetikaasun käyttöä varten sisältää yleensä seuraavat vaiheet:

1. Biomassan kuivaus kaasutusta varten
2. Biomassan kaasutus
3. Syntyneen kaasun puhdistus esim. tervoista
4. Tuotekaasun vety/häkä suhteen säätö jatkokäyttöä ajatellen
5. Tuotekaasun puhdistus mm. rikkiyhdisteistä ja ylimääräisestä hiilidioksidista
6. Tuotekaasun paineistus jatkokäyttöä varten.

Kaasutettava syöte, esimerkiksi biomassassa yleensä kuivataan ennen kaasutusta noin 10–20 p-%:in kosteuspitoisuuteen, koska tällöin syntyy enemmän haluttuja tuotteita häkää ja vetyä kaasutuksessa. Biomassan kaasutuksessa syntyy aina myös CO₂:a johtuen kaasutettavan aineen korkeasta happipitoisuudesta, jolloin osa biomassan hiilestä päätyy hiilidioksidiksi. Tervamaisten aineiden poisto voidaan tehdä esim. reformointiprosessilla, jossa tuotekaasuun syötetään happea.

Lisäksi syntyvän kaasun vety/häkä-suhdetta joudutaan yleensä säätämään jatkokäyttöä ajatellen tuottamalla tarvittava vety häkäkaasusta vesikaasun siirtoreaktion mukaisesti. Tämän menetelmän heikkous on kuitenkin se, että reaktiossa muodostuu lisää CO₂:a, jolloin vielä suurempi osa kaasutetun polttoaineen hiilestä muuttuu hiilidioksidiksi.

Hiilidioksidin ja tervan lisäksi biomassan kaasutuksessa syntyy pieniä määriä epäpuhtauksia kuten rikkivetyä, ammoniakkaa ja vetysyanidia, jotka on poistettava kaasutuskaasusta ennen kuin kaasua voidaan hyödyntää polttoaineiden ja kemikaalien tuotantoprosesseissa, koska niissä käytettävät katalyytit ovat herkkiä näille epäpuhtauksille. Epäpuhtauksien poisto vaatii useimmiten monivaiheisen prosessin. Aluksi veteen liukenevat epäpuhtaudet, esim. ammoniakki voidaan erottaa vesipesurilla ja seuraavaksi rikin epäpuhtaudet voidaan adsorboida esim. aktiivihiihi- tai sinkkioksidipidillä, jonka läpi puhdistettava kaasu johdetaan.

Monissa tapauksissa kaasutusprosesseissa syntyvä hiilidioksidi ja pääosa rikin epäpuhtauksista voidaan vaihtoehtoisesti erottaa vesipesurin jälkeen esim. luvussa 4.1 kuvatuilla amiiniliuoksilla, jotka absorboivat hiilidioksidin. Toinen tapa on lisätä tuotekaasun jatkokäytön vaatima vety tuottamalla lisävettyä esim. veden elektrolyysin avulla. Tällöin hiilidioksidia ei tarvitse poistaa.

Näiden vaiheiden jälkeen saadaan puhdasta synteesikaasua, jota voidaan käyttää esim. metanolin valmistukseen samoin kuin maakaasusta tuotettua synteesikaasua. Usein biomassan kaasutus tehdään joko ilman paineessa tai alle 10 baarin paineessa ja yleensä metanolin, metaanin tai Fischer-Tropsch-dieselin tai muun tuotteen valmistusta varten kaasun painetta joudutaan nostamaan kaasun puhdistuksen jälkeen.

4.2.3 Synteesikaasu uusiutuvassa energiajärjestelmässä

Synteesikaasu tulee tuottaa uusiutuvassa energiajärjestelmässä joko kestävästä biomassasta tai jätejakeesta happi- ja höyrykaasuttamalla. Veden elektrolyysistä saatua happea voidaan käyttää kaasutuksessa ja vedyllä voidaan säätää sopiva sekoitussuhde kaasuun ilman, että erillistä vesikaasureaktoria tarvitaan. Toisaalta synteesikaasu voidaan tuottaa uusiutuvasti hiilidioksidin suoralla elektrolyysillä saatua hiilimonoksidia ja veden elektrolyysillä saatua vetyä sekoittamalla. Polttoaine- tai kemikaalisynteesi voidaan myös toteuttaa suoraan hiilidioksidin ja vedyn seoksella tarvitsematta lainkaan synteesikaasua.

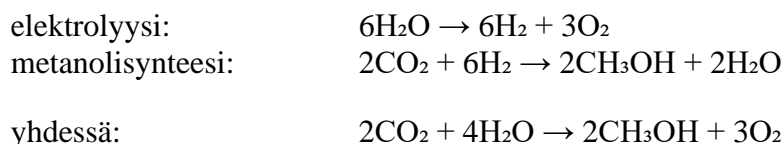
4.2.4 Hiilidioksidin ja vedyn seos synteesissä

Hiilidioksidi ja vety reagoivat myös synteesikaasun tavoin polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. CO_2/H_2 -kaasu on kuitenkin energiasisällöltään vähempiarvoista, vaatii erilaisia katalyyttejä sekä reagoi epätäydellisemmin tuotteiksi yhdellä läpiviennillä reaktorin läpi kuin synteesikaasu. Epätäydellinen reaktio johtaa suurempaan reaktoriin ja kierrätysreitit putkistoon CO_2/H_2 -kaasulla kuin synteesikaasulla. CO_2/H_2 -kaasulla toimivat synteesiprosessit ovat teknologiana vielä vähemmän kehittyneitä kuin synteesikaasulla toimivat.

4.3 Energiatase

Synteettisten polttoaineiden valmistus kaasuseoksesta erotetusta hiilidioksidista ja vedestä vaatii energiaa. Energia voi olla tarpeeksi korkean lämpötilatason lämpöä (höyry) tai sähköä. Sähkö on parasta energiaa siinä mielessä, että se voidaan aina muuntaa lämmöksi, kun taas lämmönlähteiden energia voidaan vain osittain muuntaa takaisin sähköksi. Energian kulutuksella tarkoitetaan energian muuntumista toiseen muotoon, koska energiaa ei häviä. Kaikissa prosesseissa energian ”jalostusaste” kokonaisuutena huonontuu.

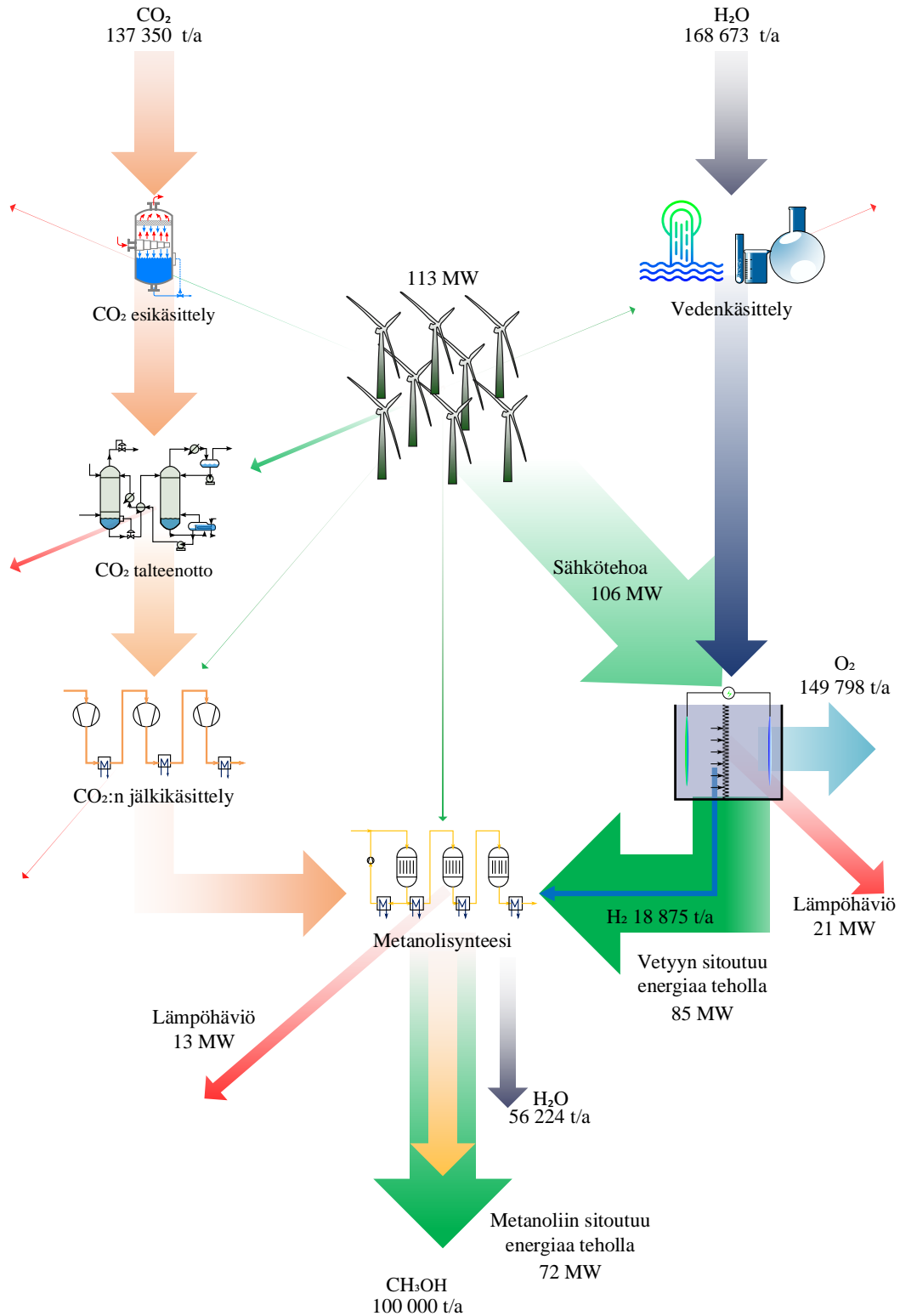
Esimerkiksi metanolisynteesi laimennetusta (kaasuseoksen) hiilidioksidista ja nestemäisestä vedestä voidaan kuvata reaktioyhtälöllä, joka on käänteinen metanolin palamiseen nähden



Prosessin teoreettinen energiankulutus on 6.30 MWh tonnia metanolia kohti, josta vähintään 6.26 MWh on tuotava sähköinä ja enintään 0.04 MWh lämpönä. Nykyisellä elektrolyysi- ja synteositekniikalla kaikki energia tuodaan sähköinä ja teoreettinen energiankulutus ylitetään huomattavasti. Nykytilanteessa kaikista synteessin tärkeimmistä osaprosesseista elektrolyysistä, CO₂:n erottamisesta ja polttoaine/kemikaalisynteeseistä poistetaan hukkalämpöä, mikä tarkoittaa teoreettista suurempaa syötettyä sähkötehoa. Kuva 13 on esitettyä savukaasun hiilidioksidista ja vedestä metanolia tuottavan laitoksen pääpiirteiset energia- ja ainetaseet.

Taulukko 3: Metanolisynteessin teoreettiseen energiankulutukseen tarvittavat lähtötiedot
<https://webbook.nist.gov/>

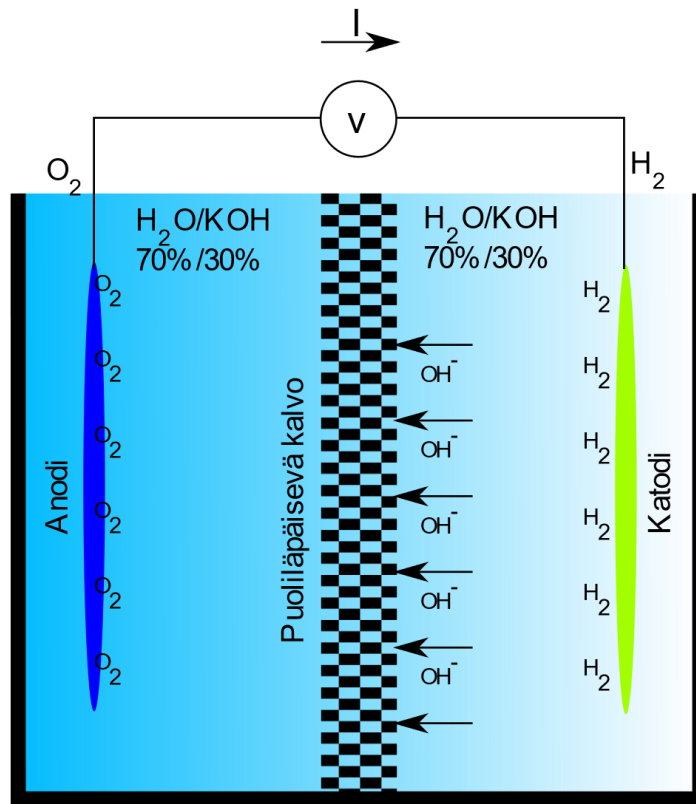
Aine	Kaava	Tila prosessiin menossa/poistulossa	Entalpia [kJ/mol]	Entropia [J/(mol K)]	Moolipaino [g/mol]
			H	S	
Hiilidioksidi	CO ₂	25 °C, 1 bar, Laimennettuna ilmakehässä	-393.51	213.79 + 64.848	44.0095
Vesi	H ₂ O	25 °C, 1 bar, Puhdas neste	-285.830	69.95	18.0153
Metanoli	CH ₃ OH	25 °C, 1 bar, Puhdas neste	-238.4	127.19	32.0419
Happi	O ₂	25 °C, 1 bar, Puhdas kaasu	0	205.15	31.9988



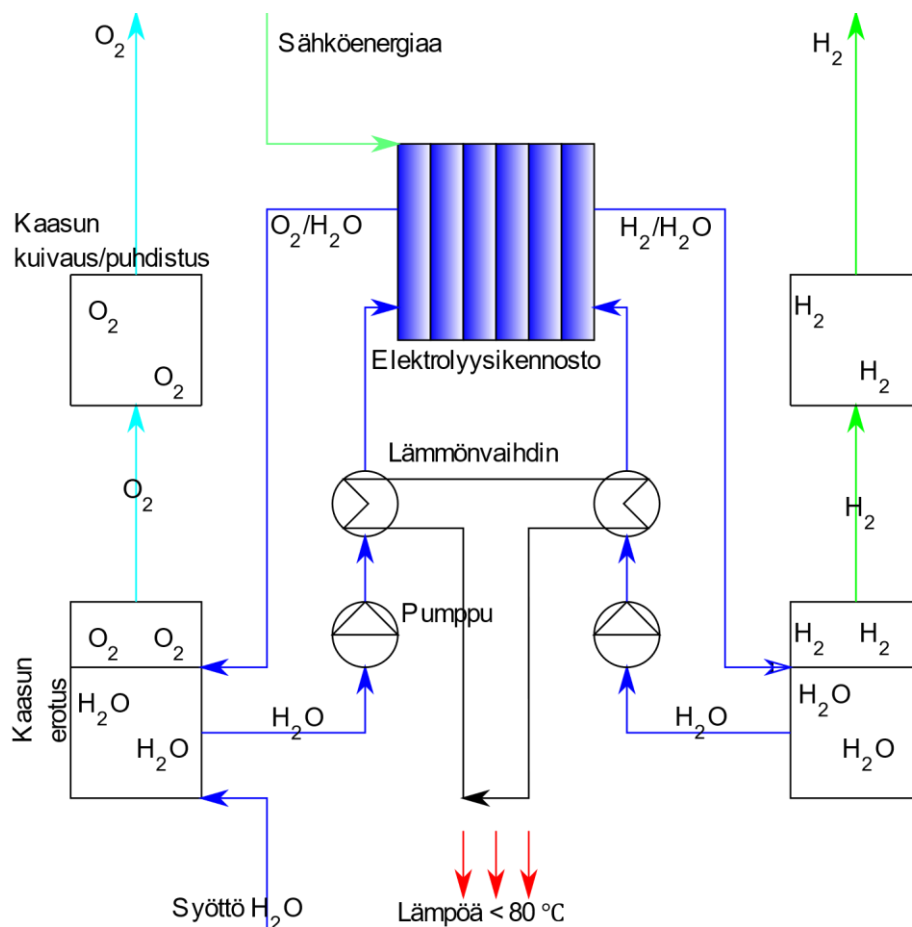
Kuva 13: Energiavirrat metanolin valmistuksessa, kun laitospakapiteetti on 100 000 t/a

4.4 Vedyn valmistus alkalielektrolyysillä

Vetyä valmistetaan hajottamalla nestemäistä vettä sähkövirran avulla vety- ja happikaasuiksi. Alkalielektrolyysissä tämä toteutetaan upottamalla kahteen sähkövarausta kuljettavaan elektrolyyttiliuokseen sähköjohtimet (elektrodit), joilla kaasujen muodostuminen tapahtuu. Elektrolyyttiliuoksia erottaa puoliläpäisevä kalvo, joka päästää läpi ioneja, mutta ei päästä reaktiotuotekaasuja sekoittumaan keskenään. Elektrodien välille kytketään tasajännite. Kahden kalvolla erotetun elektrolyytin ja elektrodien systeemiä kutsutaan kennoksi. Elektrolyyttiliuos koostuu vedestä ja kaliumhydroksidista (KOH). Kytkemällä kennoja sarjaan voidaan kasvattaa prosessin tuotantokapasiteettia. Kuva 14 on esitetty yksi alkalielektrolyysikenno ja Kuva 15 kokonainen alkalielektrolyysiprosessi.



Kuva 14: Yhden alkalielektrolyysikennon sähkökemiallinen toimintaperiaate. Komponenttien asettelu ja muoto elektrolyserissä ei vastaa kuvassa esitettyä.



Kuva 15: Alkalielektrolyysieriprosessi.

4.4.1 Vedyn ominaisuudet

Vedyn termodynaamisia ominaisuuksia on koottu taulukkoon 4. Vedyn kriittinen lämpötila on hyvin alhainen, noin -240 °C . Kriittinen lämpötila on korkein lämpötila, missä nesteyttäminen on mahdollista. Ilmanpaineessa nesteytyminen tapahtuu normaalikiehumispisteessä -253 °C . Vedyn kriittinen lämpötila on maakaasunkin vastaavaa arvoa alhaisempi, mistä johtuen vety H_2 -muodossa on lähes kaikissa olosuhteissa kaasu ja nesteyttäminen on teknisesti haastavaa ja kallista. Vedyllä on hyvin matala molekyylipaino, mistä johtuu myös matala tiheys normaalipaineessa ja lämpötilassa 0.08 kg/m^3 . Taulukoitu muodostumisentalpia on puhtaille aineille tyypillisessä olomuodossaan, kuten kaasumainen H_2 , määritelmän mukaan 0.

Kaasumainen olomuoto ja korkea energiasisältö tekevät vedystä vaikeasti varastoitavan ja käsiteltävän aineen, mikä myös johtaa korkeisiin kustannuksiin.

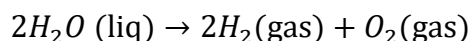
Vedyn ylempi lämpöarvo on huima 142.92 MJ/kg. Ylempi lämpöarvo on se määrä lämpöä, mikä vapautuu, kun yksi kilogramma vetyä reagoi hapen kanssa ja palamisessa syntynyt vesihöyry lauhtuu nesteeksi. Lämpöarvo antaa myös suuntaa antavan arvon sähköenergian määrästä, mikä tarvitaan vedyn tuottamiseen elektrolyysillä. Todellisuudessa sähköenergiaa tarvitaan enemmän kuin tasan lämpöarvon verran, koska osa sähköenergiasta kuluu erilaisiin häviöihin ja poistuu elektrolyysilaitteesta lämpönä. Osa kirjallisuuslähteistä käyttää tarvittavan sähköenergian minimiarvona alhaisempaa 118.5 MJ/kg. Teoreettisen minimiarvon saavuttamiseksi erotus $142.92 \text{ MJ/kg} - 118.5 \text{ MJ/kg} = 24.42 \text{ MJ/kg}$ tuotaisiin elektrolyysilaitteeseen lämpönä. Käytännön elektrolyysilaitteet kuluttavat kaikki yli 142.92 MJ/kg sähköenergiaa ja niistä poistetaan lämpöä sen sijaan, että lämpöä tuotaisiin laitteeseen ympäristöstä ja muunnettaisiin tuotetun vedyn lämpöarvoksi.

Taulukko 4: Vedyn termodynaamisia arvoja

Molekyylipaino [g/mol]	2.016	
Kiehumispiste [°C]	-253	
Kolmoispiste ([bar],[K])	(0.07,14)	
Kriittinen piste ([bar],[K])	(12.9,33)	
Tilavuus (25 °C, 1 bar)	0.0248 m ³ /mol	12.39 m ³ /kg
Tiheys (25 °C, 1 bar)	40.32 mol/m ³	0.0807 kg/m ³
Lämpökapasiteetti	28.8 J/(mol K)	14.4 kJ/(kg K)
Muodostumisentalpia	0 J/(mol K)	0 kJ/kg
Entropia (25 °C, 1 bar)	130.680 J/(mol K)	64.8 kJ/(kg K)
Ylempi lämpöarvo	285.83 J/mol	142.92 MJ/kg

4.4.2 Reaktiokemia

Kahta vesimolekyyliä H₂O kohti syntyy yksi happimolekyyli (O₂) ja kaksi vetykaasumolekyyliä (H₂) seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



Veden hajottaminen on energiaa sitova reaktio, koska vety ja happi kaasumuodoissa 2H₂ ja O₂ sisältävät enemmän energiaa kuin nestevedeksi 2H₂O sitoutuneina. Näin ollen veden hajottaminen vaatii jatkuvaa sähköenergian syöttämistä prosessiin. Energiaero lähtöaineiden ja tuotteiden välillä reaktiossa on 15.88 MJ yhtä kilogrammaa kulunutta vettä kohti tai vastaavasti 142.92 MJ yhtä kilogrammaa muodostunutta vetyä kohti. Esitetyt luvut kuvastavat lähtöaineiden energiasisältöjen eroja normaali-ilmanpaineessa ja lämpötilassa, mikä ei todellisessa prosessissa toteudu. Lisäksi syötettyä sähköä kuluu muuhunkin kuin aineen hajottamiseen kuten esimerkiksi lämpöhäviöihin. Näin ollen 15.88 MJ kilogrammaa vettä kohti kuvastaa minimimäärää sähköenergiaa, mikä tarvitaan hajottamiseen. Taulukkoon 5 on koottu reaktioenergian mukaisia (hyötösuhteen verran todellista pienempiä) energian- ja tehonkulutuksia eri yksiköissä eri aineita kohti. Hapen molekyylipaino on noin 16-kertainen vetyyn verrattuna, minkä takia yhden

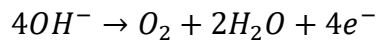
vetykaasukilon tuotantoon kuluu 9 kiloa vettä ja samalla syntyy 8 kiloa happea. Laskelmat on esitetty 25 °C lämpötilassa, mutta yleensä alkalielektrolyysissä lämpötila on 70 °C – 90 °C.

Taulukko 5: Veden elektrolyysin teoreettisia energian- ja tehonkulutuksia

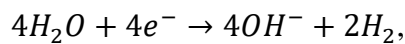
	reaktion energiankulutus kiloa kohti [MJ]/[kWh]	reaktion energiankulutus moolia kohti [kJ]/[Wh]	tehonkulutus 1 kg/s tuotannolla [MW]	ainevirrat 1 kg/s tuotannolla (H ₂ O/H ₂ /O ₂) [kg/s] / [mol/s] / [m ³ /s]
H ₂ O	15.88/4.41	285.83/79.40	15.88	(-1/+0.11/+0.89) (-55.5/+55.5/+27.78) (-0.001/+1.34/+0.67)
H ₂	142.92/39.7	285.83/79.40	142.92	(-9.00/+1/+8.00) (-500/+500/+250) (-0.009/+12.03/+6.01)
O ₂	18.29/5.08	571.66/158.80	18.29	(-1.13/+0.13/+1) (-62.5/+62.5/+62.5) (-0.001/+1.50/+0.75)

4.4.3 Sähkökemia

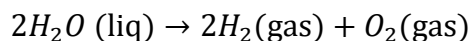
Elektrolyysilaitteen anodilla ja katodilla tapahtuu omat osareaktionsa. Anodireaktio on



ja katodireaktio on



jolloin kokonaisreaktio on



Kuten kappaleessa 4.4.1. ”vedyn ominaisuudet” todettiin, kirjallisuuslähteistä löytyy kaksi eri teoreettista minimisähköenergiakulutusta reaktiolle, 142.9 MJ/kg ja 118.5

MJ/kg, ja näitä vastaavat teoreettiset minimijännitteet kennolle ovat noin 1.48 V ja 1.23 V. Todellinen jännite kennoa kohti on käytännössä aina enemmän kuin 1.48 V, koska tämän alittava jännite edellyttäisi lämpöenergian tuomista, mikä on vain termodynamiikan teoreettisella tasolla mahdollista. Todellisuudessa tarvittava jännite kennoa kohti on 1.9 V – 2.4 V.

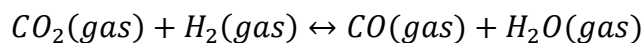
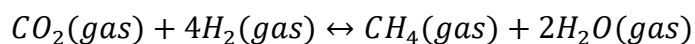
Käytännön elektrolyysilaitte koostuu useiden elektrolyysikennojen lisäksi säiliöistä kierrätysputkistoinen, joissa vety- ja happikaasut erotetaan elektrolyytistä. Prosessin energiatehokkuuden kannalta oikean lämpötilan ylläpitämiseksi käytetään myös hukkalämpöä poistavia lämmönvaihtimia ennen elektrolyytin palautusta kennoille. Lisäksi tarvitaan syöttöveden ja tuotevetykaasun puhdistuslaitteistot.

4.4.4 Paine

Alkalielektrolyysi toimii yleensä ilmanpaineessa. Korkeammalla paineella saavutettaisiin parempia prosessihyötysuhteita ja saataisiin valmiiksi paineistettua vetyä.

4.5 Metaanin valmistus

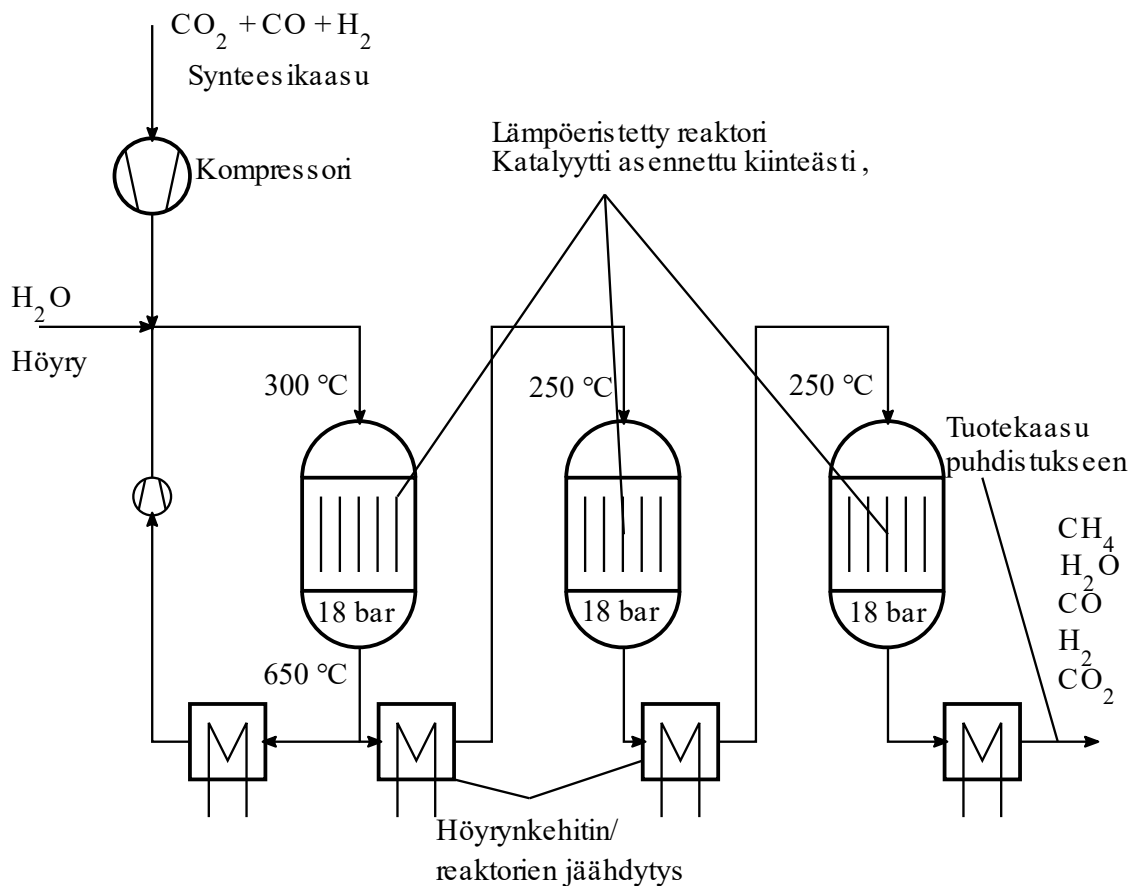
Vety-, hiilidioksidi- hiilimonoksidikaasut yhdessä pyrkivät spontaanisti reagoimaan vesihöyryksi ja metaaniksi. Ilmiön voi esittää Sabatier-reaktion ja käänteisen vesikaasureaktion (reverse water-gas shift reaction) reaktioyhtälöiden avulla



Kun lähtöainekaasut syötetään reaktoriin, syntyy ainakin kaasujen CO_2 , CO , CH_4 , H_2O ja H_2 seos, joka pyrkii saavuttamaan termodynaamisen tasapainotilan. Tasapainotila riippuu reaktorin paineesta ja lämpötilasta. Noin 300 °C ilmanpaineisessa reaktorissa tasapainotilassa on enää hyvin vähän ei-toivottuja kaasuja CO_2 , CO ja H_2 jäljellä. Nikkelikatalyytin avulla tasapainotila pystytään lähes saavuttamaan, jolloin lähes kaikki prosessiin syötetty CO_2 tai CO saadaan muutettua metaaniksi. Sabatier-reaktio ja

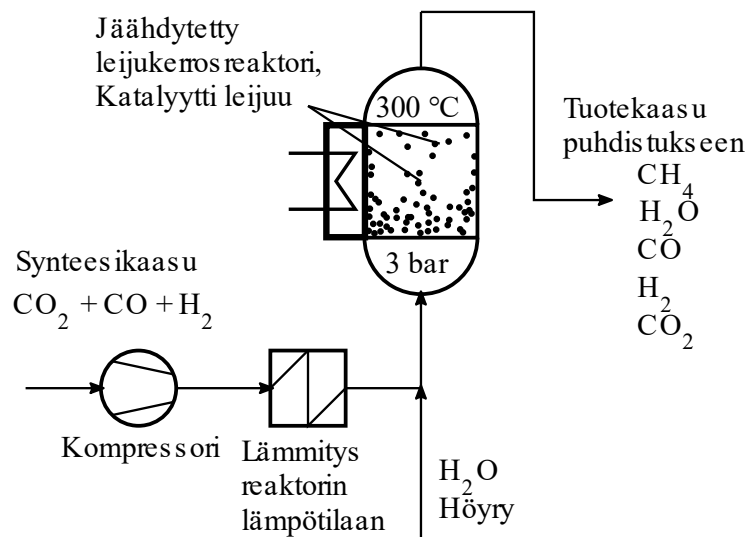
käänteinen vesikaasureaktio tuottavat lämpöä, koska korkean lämpöarvon vety hapettuu (pala) pelkistäen hiilidioksidi- ja hiilimonoksidikaasuja.

Metaanin tuotannossa reaktorien määrä, katalyytit, lämpötila- ja painetasot sekä lähtöaineiden määrät on pyritty suunnittelemaan optimaalisesti. Kuva 16 on esitetty prosessivaihtoehto, jossa kolme lämpöeristettyä (adiabaattista) metanointireaktoria on kytketty sarjaan. Lämpöeristysten takia yhdestä reaktorista poistuvan kaasuseoksen lämpötila on huomattavasti korkeampi kuin syötetyn. Reaktorien välisiä virtauksia jäähdytetään, millä saavutetaan parempi lähtökaasun reagointi metaaniksi seuraavassa reaktorissa ja lämmön talteenotto korkeassa lämpötilassa.



Kuva 16: Metaanin tuotanto

Kuva 17 on esitetty vakiolämpötilainen (isoterminen) leijukerosreaktori, jossa katalyyttiä leijutetaan puhaltimien avulla. Vakiolämpötilan saavuttamiseksi reaktoria jäähdytetään jatkuvasti. Isotermissessä reaktorissa reaktiolämpö saadaan talteen matalammassa lämpötilassa kuin adiabaattisessa reaktorissa, mutta prosessi on kokonaisuutena yksinkertaisempi.



Kuva 17: Isoterminen metaanin tuotanto

Metanointiprosessin tuotantoarvoja voi karkeasti arvioida reaktioyhtälön kertoimien ja moolipainojen avulla. Esimerkiksi olettaen hiilidioksidin täydellisen reagoinnin metaaniksi saadaan

$$\frac{M_{\text{CH}_4}}{M_{\text{CO}_2}} = \frac{16 \text{ kg}_{\text{CH}_4}}{44 \text{ kg}_{\text{CO}_2}} = \frac{360 \text{ kg}_{\text{CH}_4}}{1000 \text{ kg}_{\text{CO}_2}}$$

Olettaen syötekaasuksi puhtaan hiilidioksidin, niin reaktiolämpöä vapautuu

$$165 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} / 0.044 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 3.75 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{CO}_2}}$$

Puhtaalla hiilimonoksidilla

$$206 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} / 0.028 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 7.36 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{CO}}}$$

Tuotekaasussa oleva vesihöyry sisältää lisäksi tiivistymislämpöä

$$\frac{2M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{CO}_2}} \Delta h_{\text{fg,H}_2\text{O}} = \frac{2 \cdot 18 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{44 \text{ kg}_{\text{CO}_2}} 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}} = 1.846 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{CO}_2}},$$

jonka talteenotto voi olla taloudellisesti perusteltua. Prosessiteknisistä syistä koko reaktiolämpöä ei pystytä ottamaan talteen höyryn kehitykseen tai muuhun hyödylliseen tarkoitukseen. Metanointireaktorin reaktiolämpöä on enemmän saatavilla ja se on korkeammassa lämpötilassa (> 300 °C, adiabaattisessa reaktorissa jopa > 600 °C) kuin tiivistymislämpö, jonka lämpötila riippuu paineesta (1 bar – 30 bar, 100 °C – 234 °C).

Korkeampilämpötilainen energia on korkeampilaatuinen tuote. Korkeampi lämpötila vähentää lämmönvaihtimien kustannuksia otettaessa lämpöä talteen höyryn kehitykseen tai kaukolämmöksi. Lisäksi korkeampilämpötilaisesta lämmöstä pystytään muuttamaan suurempi osuus sähköksi kuin matalalämpötilaisesta. Esimerkiksi 600 °C lämmöstä voidaan ideaalisessa lämpövoimaprozessissa muuntaa sähkötehoksi

$$1 - \frac{25 \text{ °C} + 273.15 \text{ K}}{600 \text{ °C} + 273.15 \text{ K}} = 66 \%$$

kun taas 300 °C lämmöstä vain

$$1 - \frac{25 \text{ °C} + 273.15 \text{ K}}{300 \text{ °C} + 273.15 \text{ K}} = 48 \%$$

voidaan muuntaa sähköksi. Ideaalisia (Carnot) hyötysuhteita on pienennettävä ainakin kertoimella 0.7, että saataisiin todellisen kaupallisen lämpövoimaprozessin (höyryvoimalaitos, kaasuturbiini, ORC organic rankine cycle) hyötysuhde.

4.6 Metanolin valmistus

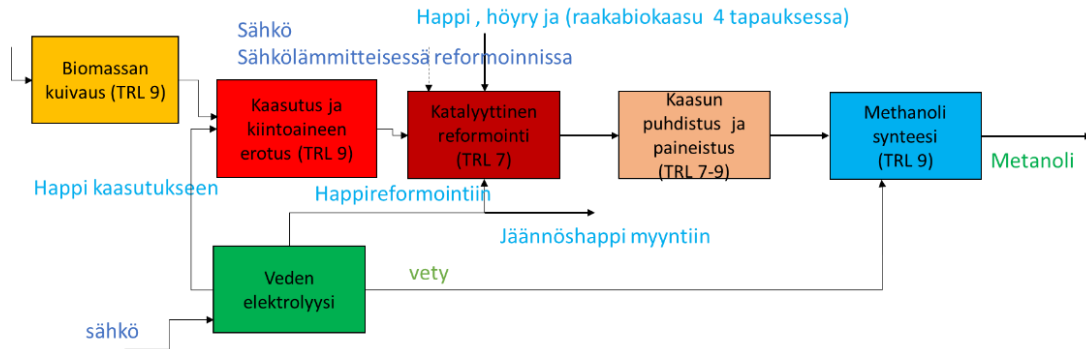
Metanolia on perinteisesti tuotettu reformoimalla maakaasua synteesikaasuksi, joka tämän jälkeen voidaan metanolisynteesillä konvertoida metanoliksi. Myös Carbon Recycling International Islannissa rakentaa laitosta, jossa käytetään vuosittain n. 160 000 tonnia CO₂:a metanolin tuotantoon [85]. Lisäksi ruotsalainen kemianteollisuuden yritys Perstorp on ilmoittanut käynnistävänsä investointiprojektin yhdessä Fortumin kanssa, jossa he korvaavat kaiken 200 000 tonnia vuodessa käyttämänsä fossiilisen metanolin

uusiutuvalla metanolilla [86]. Tanskalainen yritys Haldor-Topsoe on kehittänyt metanolin valmistusteknologiaa [87].

Metanolin nykyisen valmistusteknologian kehitysvaiheet juontavat todennäköisesti juurensa yleiskäyttöisen kaasutuskaasun keksimiseen. Kaasutuskaasun alkuperäinen arvo oli siinä, että esimerkiksi kivihiili pystyttiin muuntamaan kaasumaiseen olomuotoon ja siten soveltumaan paremmin uusiin käyttötarkoituksiin kuten ruuanlaittoon ja valaistukseen. Seuraava askel kohti metanolin ja muiden hiilivetyjen tuotantoa oli kaasutuskaasun reagoiminen katalyyteillä. Nykyinen fossiilisen metanolin valmistus perustuu myös tähän reittiin fossiilipolttoaineesta kaasutuksen kautta metanoliksi.

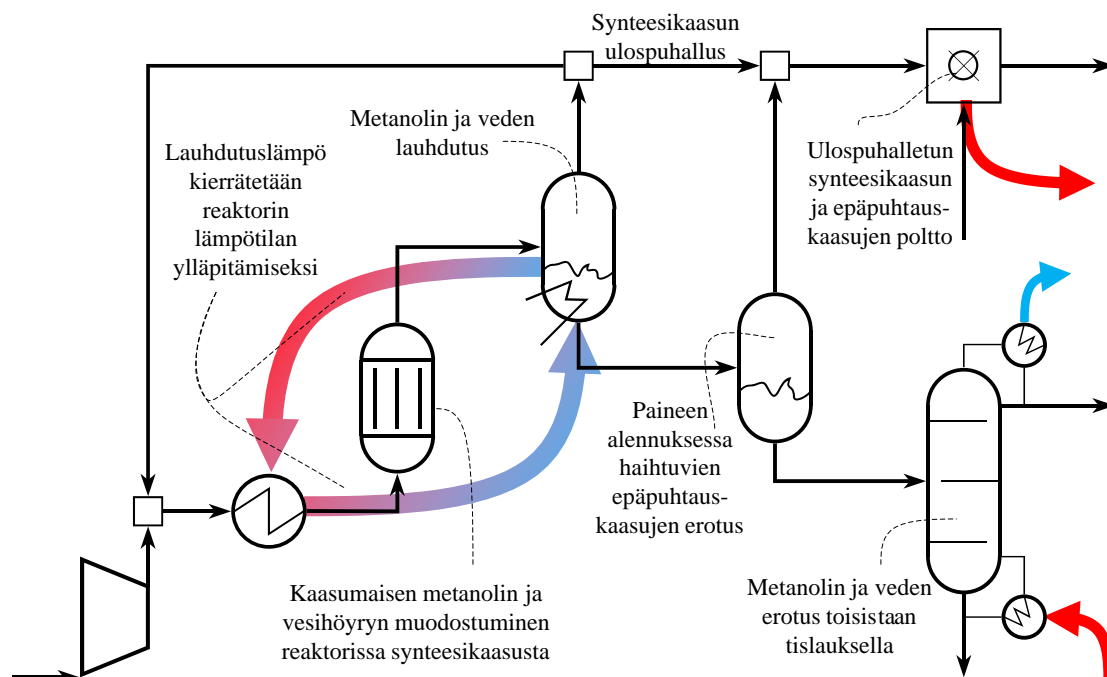
Metanolin valmistuksen voikin jakaa karkeasti kahteen vaiheeseen: synteetikaasun hankintaan ja itse metanolisynteisiin. Synteetikaasulla tarkoitetaan tässä raportissa häkää ja hiilidioksidia sekä vetyä sisältävää kaasua, joka saadaan joko jatkojalostamalla kaasutuskaasusta tai vaihtoehtoisella tavalla (ilmasta tai pistelähteestä erotettuja, veden elektrolyysillä) hankittuja puhtaita kaasuja sekoittamalla. Kaasutuskaasusta jatkojalostaminen edustaa vakiintunutta ja testattua teknologiaa, kun taas vaihtoehtoisesti tuotetun synteetikaasun tuotanto ei ole saavuttanut kiistatonta kaupallista valmiutta.

Tässä työssä tarkasteltiin sekä sähköön ja CO₂:een pohjautuvaa metanolin tuotantoa että alla olevan Kuva 18 mukaista biomassan kaasutukseen pohjautuvaa metanolin valmistusprosessia, missä prosessia on tehostettu tuomalla lisävetyä metanolin tuotantoon. Tällöin lisävetyä ei tarvitse perinteisen biomassan kaasutusprosessin tavoin valmistaa häkäkaasusta vesikaasun siirtoreaktion kautta. Tällöin voidaan tuottaa metanolia huomattavasti suuremmalla saannolla käytettyä biomassan määrää kohti. Kaasutusprosessin toiminta on kuvattu aikaisemmin luvussa 4.2.2.



Kuva 18: Lohkokaavio biomassan kaasutukseen pohjautuvasta metanolin valmistusprosessista, missä prosessia on tehostettu tuottamalla lisävetyä elektrolyysin avulla. Tässä TRL ('Technology readiness level') kuvaa prosessiteknologian kypsyyttä. TRL-arvo 9 vastaa kaupallista käytössä olevaa teknologiaa täydessä tuotantomittakaavassa ja TRL 7 demonstraatiolaitosta.

Metanolin valmistuksen toinen vaihe, eli metanolisynteesi, on synteesikaasun tuominen kontaktiin katalyytin kanssa, jolloin synteesikaasusta muodostuu metanolia. Johtuen termodynamiikan rajoitteista, vain murto-osa kaasuvirtauksesta reagoi metanolikaasuksi, kun se johdetaan katalyyttiä sisältävän reaktorin läpi. Reaktorin jälkeen kaasumainen metanoli ja muodostunut vesihöyry lauhdutetaan (jäähdytetään, jolloin raskaat aineet tiivistyvät) kaasuseoksesta erilleen. Erotettu nestemäinen veden, metanolin ja liuenneiden epäpuhtauskaasujen seos jatkojalostetaan puhtausvaatimukset täyttäväksi metanoliksi paineen alennukseen perustuvassa kaasun poistossa sekä nesteiden erottamiseen tarkoitetussa tislauksessa. Tässä yhteydessä on syytä mainita, että metanolisynteesi on kaikkine osaprosesseineen kemianlaitoksille tyypillisesti herkkä kaikille toiminta-arvojen vaihteluille, eikä sovellu nyky muodossaan sähköntuotannon tasaajaksi.



Kuva 19: Metanolin valmistus

Kestävästi tuotettuun metanoliin tarvittava hiili on otettava metsä- tai maatalouden biomassasta, biokaasusta tai jätteestä, jolloin kyseessä on biometanoli. Jos hiilen lähteenä käytetään teollisuuden prosessista talteen otettua hiilidioksidia, niin kyseessä on e-metanoli. Kestävää metanolia tuotetaan maailmanlaajuisesti alle 1 % koko metanolin tuotannosta. Suurin osa tuotetusta kestävästä metanolista on biometanolia. Biometanolin tuotantokustannukset ovat noin 1.5–7 kertaiset ja e-metanolin 3 – 16 kertaiset verrattuna fossiilisen metanolin tuotantoon.

4.6.1 Valmistusteknologia

Biometanolin valmistuksessa kestävä raaka-aine, kuten metsäbiomassa kaasutetaan ja tuotekaasu reagoi vedyn kanssa metanoliksi. Kaasutuskaasun muuntaminen metanoliksi on jo käytössä olevaa teknologiaa – samaa, mitä käytetään metanolin tuotantoon fossiiliraaka-aineesta. Kaasun muuntamisessa metanoliksi tärkeimmät tekniset

kysymykset liittyvät katalyyttiin, reaktorien paineisiin ja lämpötiloihin sekä prosessivirtojen epäpuhtauksiin ja metanolin erottamiseen.

4.7 Bensiinin valmistus

Bensiinin valmistukseen hiilidioksidista parasta teknologiaa tällä hetkellä edustaa ensin metanolin valmistus, jonka jälkeen metanolista tuotetaan bensiiniä ExxonMobil Chemicalin lisensoimalla ”Methanol to Gasoline”, eli MTG-prosessilla. MTG:ssä metanolista tuotetaan ensin alkeeneja, joita yhdistämällä tuotetaan bensiinille tyypillisiä noin 11 hiiliatomin pituisia polymeereja.

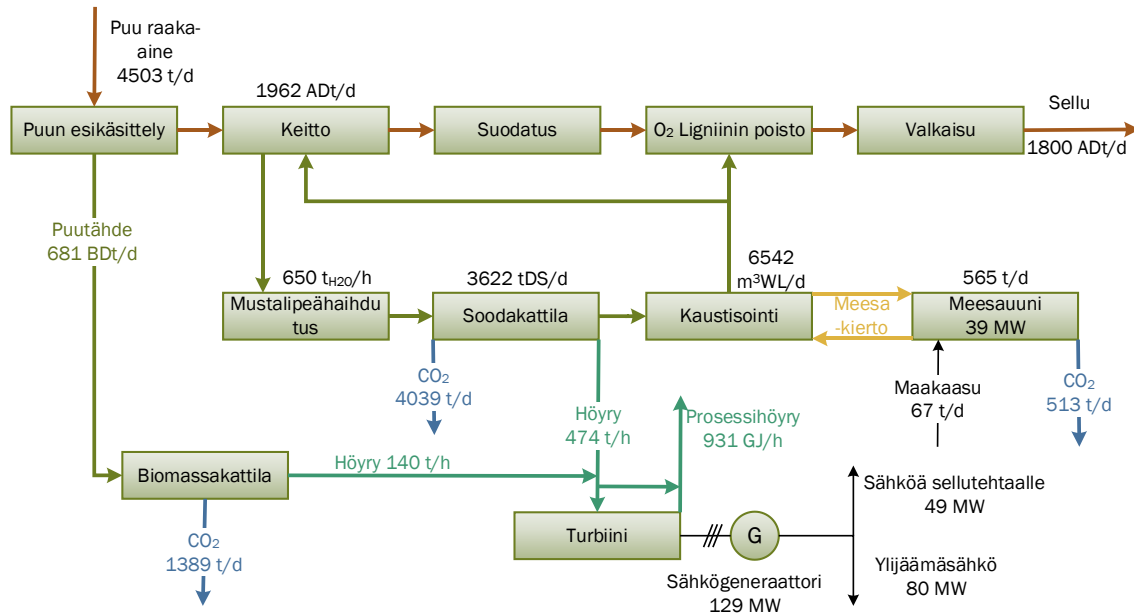
4.8 Dieselin valmistus

Hiilidioksidista valmistetaan dieselpolttoainetta muuttamalla hiilidioksidi ensin soveltuvaksi synteesikaasuksi, jonka jälkeen siitä voidaan tehdä synteesireaktorissa Fischer-Tropsch-tuotetta. Fischer-Tropsch-reaktorin tuoteneste muistuttaa dieselpolttoainetta koostumukseltaan, mutta sitä täytyy jatkojalostaa perinteisen öljynjalostuksen tapaan, että sitä voidaan käyttää moottoripolttoaineena. Fischer-Tropsch-tuotteessa ei juuri esiinny rikki- tai muita epäpuhtauksia fossiiliseen raakaöljyyn verrattuna. Fischer-Tropsch-dieselpolttoaine eroaa esimerkiksi Neste Oy:n toimittamasta biodieselistä siten, että Nesteen biodieselin tuotantoprosessi perustuu rasvahappojen esteröintiin, mikä on täysin eri prosessi verrattuna kaasutuksen ja synteesireaktorin muodostamaan prosessiin. Fischer-Tropsch-dieselpolttoaineesta käytetään myös nimitystä E-Diesel.

5 Raaka-aineiden toimittajat

5.1 Hiilidioksidi

Hiilidioksidin toimittaja voi olla mikä tahansa tarpeeksi suuri hiilidioksidin pistelähde tai vaihtoehtoisesti ilmakehän hiilidioksidia erottava laitos. Mahdollisia suuria pistelähteitä ovat sellutehtaat, kuten Stora Enson Uimaharjun tehdas. Kuva 20 Uimaharjun tehtaassa biomassakattilan ja meesauunin yhteenlasketut vuosittaiset hiilidioksidipäästöt, noin 2 500 000 tonnia ylittävät kaikkien tarkasteltavien laitosvaihtoehtojen hiilidioksiditarpeen. Raideyhteys pistelähteeseen tuo kustannussäästöjä kuljetukseen. Seuraavaksi lähin raideyhteys on Uimaharjun lisäksi Joutsenon ja Imatran sellutehtaille. Suuren mittakaavan kaupallista hiilidioksidin talteenottoa ei sellutehtailta toistaiseksi ole ja lopulliseen teknistaloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa myös käyttötarkoituksen määrittelemät hiilidioksidin puhtausvaatimukset. Puhtaampi hiilidioksidi vaatii kalliimman talteenoton, mutta tuo säästöjä synteesiprosessissa. Ilmasta erotettu hiilidioksidi on moninkertaisesti kalliimpaa, minkä takia ilmakehästä erottaminen voi tulla edullisemmaksi vain poliittisten kannustimien avulla.



Kuva 20: Uimaharjun sellutehtaan suuntaa antava materiaalitus

Raidekuljetukseen verrattuna putkikuljetus voi osoittautua pitkällä aikavälillä edullisemmaksi ratkaisuksi [88]. Putkikuljetuksen etuna on investoinnin jälkeen edullinen kuljetus, koska hiilidioksidia ei tarvitse puhdistaa ja nesteyttää putkikuljetusta varten. Putkikuljetuksessa maankäyttö- ja ympäristöluvut voivat aiheuttaa haasteita [88].

5.2 Biomassa

Biomassaa tarvitaan kaasutusprosessiin ja parhaiten saatavilla oleva biomassan laji Kiteen teollisuusalueelle on metsäbiomassa. Kaasutusprosessin edellyttämään biomassan laatuun liittyy epävarmuutta, koska happikaasutus ei ole vielä vakiintunutta teknologiaa. Jos hakkuutähte, kuori, sahanpuru ja muut puunjalostusteollisuuden sivuvirrat soveltuvat, niin tämä tuo kustannussäästöjä. Olisi myös kustannustehokasta, jos synteesilaitoksen ei tarvitsisi kilpailla raaka-aineesta selluteollisuuden kanssa vaan se pystyisi käyttämään sivuvirtoja.

5.3 Vesi

Alkalielektrolyysin satojen kuutioiden luokkaa oleva vuotuinen vedenkäyttö pystytään kattamaan vesijohtoverkosta otettavalla vedellä.

6 Lopputuotteiden ostajat

Ilmastotavoitteiden määrätietoisien poliittisten eteenpäin viemisen valossa uusiutuvien polttoaineiden kysyntä on taattua. Yksi E-kemikaalin jalostusvaihtoehto on tuottaa Fischer-Tropsch-nestettä ja myydä sitä jalostettavaksi. Lopullinen liikennepolttoaineiden jalostus on Suomessa keskitettyä, jolloin Fischer-Tropsch-nesteen ostajat ovat hyvin rajoitettu joukko. Uusiutuvien polttoaineiden kysyntä on voimakasta myös ulkomailla ja varsinkin täysin uusiutuvalla E-Fischer-Tropsch-nesteelle voi löytyä ostajia kansainvälisesti. Vielä tämän hetken markkinatilanteessa E-polttoaineet eivät ole ilman poliittisia kannustimia kilpailukykyisiä, mutta tilanne voi muuttua lähitulevaisuudessa.

Bakelite Oy käyttää ympäristölupansa mukaisella maksimikapasiteetilla 50 000 tonnia metanolia vuodessa [89], joten Bakelite Oy pystyisi ostamaan kaiken tai suurimman osan metanolituotannosta tuotantomäärästä riippuen. Metanolia pystytään teknisesti sekoittamaan bensiiniin, mikä kasvattaisi uusiutuvien polttoaineiden osuutta liikenteessä. Liikenne on yksi metanolin ostajaehdokas. Metanoli näyttäytyy helpompana tuotteena myydä Kiteen teollisuusalueen tapauksessa kuin E-Fischer-Tropsch-neste.

Elektrolyysin tuottamaa ylijäämähapetta voi myydä puhtausvaatimusten puitteissa sairaaloihin, hitsauskäyttöön, teollisuuden metallurgisiin prosesseihin tai hapettimeksi edistyneisiin voimalaitosten polttoprosesseihin.

7 Sähköhankintavaihtoehdot

E-tuotteiden valmistaminen on äärimmäisen sähköenergiaintensiivistä, minkä takia sähköhankinta on tärkeässä roolissa E-tuotetehtaan kannattavuuden kannalta. Myös sähkön siirtomaksut ja verotus muodostavat suuren osan sähkön hinnasta. E-tuotetehdas kuuluu sähköveron edullisempaan kategoriaan eikä sähköhankintatapa vaikuta veron suuruuteen. Siirtomaksuun sen sijaan vaikuttaa se, onko tehdas yhdistettynä paikalliseen jakeluverkkoon vai valtakunnalliseen sähköverkkoon. Valtakunnalliseen verkkoon kuulumisen on E-tuotetehtaan ainoa vaihtoehto, koska säästö siirtokustannuksissa on merkittävä verrattuna paikalliseen jakeluverkkoon kuulumiseen.

Jos E-tuotetehdas on yhdistettynä suoralla sähkölinjalla sähköntuotantoon ilman yhteyttä valtakunnalliseen sähköverkkoon, aiheuttaa sähkölinjan ja erityisesti tehotasapainon ja toimitusvarmuuden ylläpitäminen huomattavia kuluja. E-tuotetehdas on yksinkertaisinta ja edullisinta liittää valtakunnalliseen sähköverkkoon, vaikka tehdas olisikin yhdistetty omaan tuotantoon suoralla linjalla. Suorasta sähköyhteydestä tuulipuistolta E-tuotetehtaaseen ei kuitenkaan välttämättä saada kovin suurta taloudellista säästöä verrattuna tilanteeseen, jossa sekä tuulipuisto, että E-tuotetehdas ovat yhdistettyinä valtakunnalliseen sähköverkkoon.

Kokonaisuutena edullisin sähköhankintavaihtoehto on todennäköisesti yhdistelmä pörssisähköstä, pitkäaikaisesta hankintasopimuksesta ja kunnan alueelle sijoitetusta tuulipuistosta. Pörssistä ostettu sähköenergia on ajoittain jopa ilmaista ja tällainen sähkö on taloudellista pyrkiä hyödyntämään. Pitkäaikaisella hankintasopimuksella voi varmistaa sähköhankintahinnalle ylärajan. Pitkäaikainen hankintasopimus toimii kuin vakuutuksena vaikka voi tulla myös kalliimmaksi, jos pörssisähköhinta kääntyy alaspäin. E-tuotetehtaan omistama tuulivoimala voi olla sijoituksena kannattava, sillä tuulivoiman rakennuskustannukset ovat tulleet lähivuosina entistä edullisemmiksi ja tuulipuistolla on kunnan taloutta parantavia vaikutuksia. Kuitenkaan erityistä synergiaetua tuulipuiston suorasta sähkökytkennästä E-tuotetehtaaseen ei voi arvioida saavutettavan.

7.1 Pörssisähkö

Sähköpörssistä hankitun sähkön hintaan heijastuvat vuodenajan vaihtelut, erityiset sääilmiöt, muutokset polttoaineiden hinnoissa ja lainsäädännössä, verotus sekä muut poliittiset tekijät. Pörssisähkö voi olla myös huomattavan edullista, koska sähkön tuotanto sijaitsee maantieteellisesti laajalla alueella ja sähkö pystytään tuottamaan siellä missä se on edullisinta. Pörssisähkön ostaminen on aina avoin vaihtoehto, kun tehdas on liitetty sähköverkkoon ja teknisillä ratkaisuilla, kuten energiavarastoilla, pystytään käyttämään eduksi alhaisen pörssisähköhinnan aikoja.

7.2 PPA tuulivoimalle

Pitkäaikaisella sähkön hankintasopimuksella pystytään turvaamaan halutun sähkömäärän saanti ennalta sovittuun hintaan pitkälle aikavälille. Uudet tuulipuistot voivat tarjota edullista sähköenergiaa, koska tuulisähkön tuotantokustannukset ovat tulleet edullisemmiksi lähiaikoina. Myös tuulisähkön tuottajalle pitkäaikainen sähkön toimitussopimus voi olla edellytys voimalaitosprojektin toteutumiselle.

7.3 Oma tuulivoima

Maakunnan kehityksen kannalta tuulivoimapuistolla Kiteellä olisi myönteisiä vaikutuksia alueen taloudelle. Tuulivoimapuisto työllistää ja tuo kiinteistöveroja kunnalle.

Omistajan näkökulmasta tuulipuistohankkeen toteuttaminen ei tuo synergiaetua E-tuotetehtaan kanssa, sillä yhteys valtakunnalliseen sähköverkkoon on joka tapauksessa toteutettava. Säästö omasta sähköyhteydestä tulisi säästönä siirtokustannuksissa ja siitä, että sähköntuottajan voittomarginaalia ei tarvitse maksaa. Fingrid Oy:n siirtokustannukset muodostavat vain noin 2 % sähkön loppuhinnasta, jolloin huomattavaa säästöä ei pystytä saavuttamaan siirtokustannuksissa. Omassa tuulivoimavaihtoehdossa säästettäisiin lähinnä voittomarginaali verrattuna esimerkiksi toisen omistamaan tuulipuistoon.

7.4 Aurinkosähkö

Yhden kilowatin nimellistehoinen aurinkopaneeli vaatii noin 5 m² asennuspinta-alaa ja yhdellä asennetulla kilowatilla (nimellistehoa) voidaan tuottaa noin 1000 kWh sähköenergiaa vuodessa [90]. Näin ollen aurinkosähkötehoa voidaan asentaa noin 200 kWh/m² muunnettuna vuotuiseksi sähköenergiaksi pinta-alayksikköä kohti. Asennuskulut ovat noin 1000 €/kWp ilmoitettuna euroina asennettua nimellistehoa kohti [91].

Aurinkosähkön kattoasennuksella pystyttäisiin tuottamaan taulukon 6 mukaisesti noin 4862 MWh sähköenergiaa vuodessa, mikä vastaa joko noin 5 MW asennettua nimellistehoa tai 555 kW todellista sähkötehoa, kun tuotanto muunnetaan vakiotehoksi. Asennuskustannukset olisivat tällöin noin 5 M€ ja sähköenergian hinta 72 €/MWh (25 vuoden laina-aika investoinnille 5% korolla).

Taulukko 6: Katolle asennetun aurinkosähkön potentiaali ja kustannukset.

Katto	ala	asennettua nimellis- tehoa	sähköenergiaa vuodessa	Muunnettuna vakiosähkö- tehoksi,	Asennus- kustannus
	[m ²]	[kWp]	[MWh]	[kW]	[M€]
Puhos Board	17 222 [92]	3 444	3 444	393	3.4
Bakelite Oy	3 596 + 3 495 [92]	1 418	1 418	162	1.5
Yhteensä	24 313	4 862	4 862	555	4.9

Kattoasennuksen lisäksi vaihtoehtona on toteuttaa aurinkoenergiaa maahan asennettuna. Maahan asennuksen hinta ei eroa merkittävästi katolle asennuksesta [91]. Jos täysi kattopotentiaali 555 kW todellista tehoa hyödynnettäisiin, niin se vastaisi alle 3% pienimmänkin prosessivaihtoehdon sähköntarpeesta.

8 Tulokset ja vaikutus

Teknitaloudellista kannattavuutta on hahmoteltu usealle vaihtoehdolle.

8.1 Prosessivaihtoehdot

Teknitaloudellinen laskenta tehtiin metanoli-, vety- ja metaaniprosesseille. Jokaiselle prosessivaihtoehdon kannattavuus laskettiin myös eri tuotantokapasiteeteilla.

8.1.1 Metanoli

Metanolivaihtoehdon tuotantokapasiteetit ovat 20 000, 100 000 ja 200 000 tonnia metanolia vuodessa. Prosessit koostuvat elektrolyyseristä ja metanolin synteesiprosessista, joiden tarvitsemat hiilidioksidi, sähkö ja vesi ostetaan ulkopuolelta.

8.1.2 Vety

Vetyvaihtoehdossa prosessiin kuuluu pelkkä elektrolyyseri ja siihen liittyvät apulaitteet. Hiilidioksidia ei vetyvaihtoehdossa tarvitse hankkia. Vetyvaihtoehdossa kokoluokat ovat 3 800 tonnia vetyä ja 38 000 tonnia vetyä vuodessa, jotka vastaavat 20 000 ja 200 000 tonnin metanolilaitosten vedyntarpeita. Vety muodostaa kevyenä alkuaineena lopputuotemolekyylien painoista vain pienen osan ja siksi sitä tarvitaan massassa mitattuna pieniä määriä.

8.1.3 Metaani

Metaania eli synteettistä maakaasua tuottaessa tarvitaan metanolisynteesin tavoin sekä elektrolyyseri, että synteesiprosessi. Metaanin tuotannossa raaka-aineet ovat samat kuin metanolisynteesissä, mutta esimerkiksi käytetty katalyytti, paine ja lämpötila ovat erilaiset.

8.2 Kustannusarvio

Kustannusten arviointi kattaa koko projektin investointikustannukset suunnittelusta käyttöönottoon sekä käyttökustannukset. Maanrakennustöiden ja prosessien vaatimien

tilojen rakennuskustannuksien arvioinnissa on käytetty Suomessa tyypillisesti toteutuvia kustannuksia. Sähköverkkolaitteiden kustannuksina on käytetty Energiaviraston sähkökomponenttien yksikköhintoja. Elektrolyyserin ja synteesiprosessien kustannuksiin liittyy suurin epävarmuus, koska teknologia kehittyy parhaillaan. Elektrolyyserin ja synteesiprosessien kustannuksia on arvioitu kirjallisuuslähteiden perusteella. Elektrolyyserin käyttämä muuntaja ja tasasuuntaaja muodostavat huomattavan osan kustannuksesta. Elektrolyyserin sähkökomponentit sisältyvät elektrolyyserin kustannukseen eivätkä Energiaviraston yksikköhinnoilla arvioituihin sähköverkkokomponenttien kustannuksiin. Suuria kulueriä laitoksissa ovat synteesiprosessit johtuen katalyyttien ja suurikokoisten paineistettujen säiliöiden korkeista kustannuksista. Taulukossa 7 on esitetty yhteenvetona tarkasteltujen vaihtoehtojen investointikustannukset. Kustannusten jako pääluokittain on esitetty liitteessä A.

Taulukko 7: Vety-, metaani- ja metanoli-prosessien investointikustannukset eri laitokseen vaihtoehtoilla.

Tuote	Määrä [t/a]	Investointikustannus [M€]
Vety	3 800	51.1
	38 000	228
Metaani	7 500	79.6
	75 000	354
Metanoli	20 000	88.5
	100 000	219
	200 000	339

8.3 Kannattavuus

Prosessivaihtoehtojen kannattavuutta on tarkasteltu määrittämällä kullekin vaihtoehdolle vuotuinen kassavirta, joka saadaan tuottojen ja menojen erotuksena. Menot koostuvat pääomakuluista, kunnossapidosta sekä sähkön ja raaka-aineiden hankinnasta. Tuottoja

saadaan tuotteiden (vety, metaani tai metanoli sekä happi) ja lämmön myynnistä. Laskennan tuloksena saadut vaihtoehtojen kassavirrat on esitetty taulukossa 8. Laitosvaihtoehtojen kannattavuuslaskelmat lähtöarvoineen on esitetty liitteessä B.

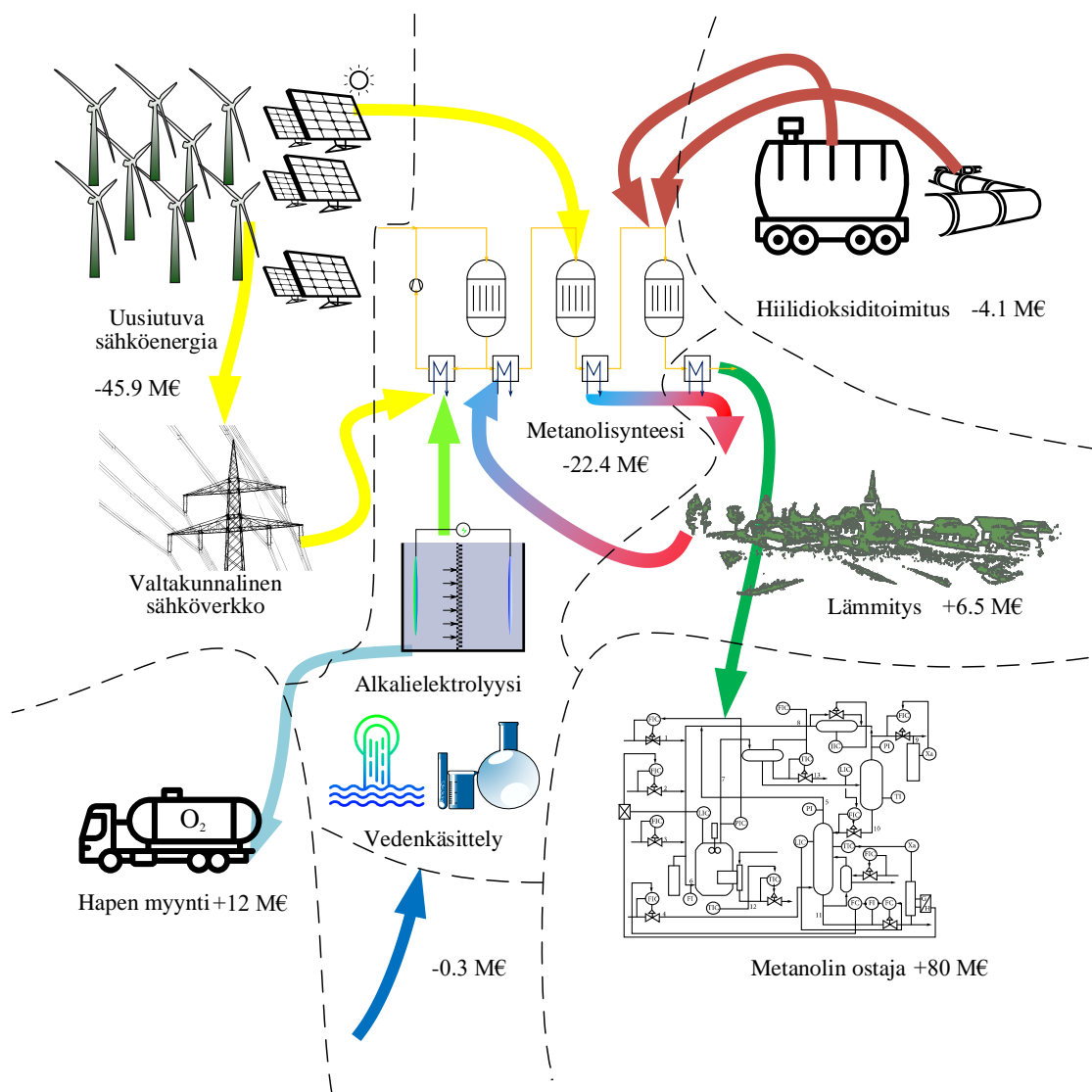
Taulukko 8: Vety-, metaani- ja metanoliprosessien kassavirrat eri laitokseen vaihtoehdoilla.

Tuote	Määrä [t/a]	Kassavirta [M€/a]
Vety	3 800	-8.34
	38 000	-54.6
Metaani	7 500	-9.23
	75 000	-47.6
Metanoli	20 000	0.540
	100 000	25.7
	200 000	61.6

Prosessivaihtoehtojen kassavirtoja vertailtaessa käy ilmi, että metanolivaihtoehto on ylivoimaisesti kannattavampi verrattuna vety- tai metaanivaihtoehtoihin, jotka ovat käytetyillä lähtöarvoilla tappiollisia. Metanolituotanto on kannattavampaa, koska tuotteesta saatava hinta on yksinkertaisesti korkein. Toinen näkökulma asiaan on, että tuloa saadaan painossa laskettavan tuotantomäärän perusteella. Metanolimolekyylillä on kaksi kertaa painavampi kuin metaanimolekyylillä ja 16 kertaa painavampi kuin vetymolekyylillä, mutta kallista sähköä on kuitenkin käytettävä jokaiseen kolmeen molekyylisiin suurin piirtein yhtä paljon.

Kannattavuuteen vaikuttaa keskeisesti käyttöönottoaiheessa vallitseva taloudellinen ja poliittinen ympäristö. Nykyisessä toimintaympäristössä E-metanoli ei pysty kilpailemaan fossiilisen metanolin hinnan kanssa. Keskeisessä roolissa ovatkin fossiilisen metanolin hinta ja E-tuotteille myönnettyt kannustimet tulevaisuudessa. Lisäksi vaikeasti ennustettavalla sähkön hinnalla on suuri vaikutus lopputuotteen tuotantokustannuksiin.

Koska metanolivaihtoehto on karkeassa vertailussa ylivoimaisesti kannattavin, tarkemmat analyysit on tehty vain metanolin tuotannolle.



Kuva 21: Vuotuisten kassavirtojen jakautuminen ekosysteemin eri osien välillä

8.3.1 Sähkön hinnan raja-arvo kannattavuudelle

Jos E-metanoli kilpailisi fossiilisen metanolin kanssa, vain suurin 200 000 tonnin laitosvaihtoehto voisi teoreettisesti olla kannattava. Suurimmallakin laitosvaihtoehdolla sähkön hinnan tulisi olla erittäin alhainen 23 €/MWh, että metanolin

tuotantokustannukset saataisiin katettua, kun metanolitonnin hinnaksi oletetaan fossiilisen metanolin 300 €.

8.3.2 Metanolitonnin hinnan raja-arvo kannattavuudelle

Alla olevaan taulukkoon on koottu hintoja, mitä metanolitonnista olisi saatava tuotantokulujen kattamiseksi eri sähkön hinnoilla kaikilla kolmella laitokseen vaihtoehdolla. Tarkastelussa kaikki kustannukset on kohdennettu metanolille.

Taulukko 9: Metanolitonnin hinnan raja-arvo kannattavuudelle eri sähkön hinnoilla ja laitokseen vaihtoehdoilla.

Sähkön hankintatapa	Sähkön hinta	20 000 t/a metanolia	100 000 t/a metanolia	200 000 t/a metanolia
Pitkäaikainen hankintasopimus	35 €/MWh	900 €/t	670 €/t	619 €/t
Pörssisähkö	0 – 150 €/MWh	497 – 2224 €/t	268 – 1989 €/t	218 – 1938 €/t

8.4 Laitoksen koon vaikutus

Tuotetun metanolitonnin hinta laskee mitä suurempi kapasiteetti laitoksella on johtuen suuruuden ekonomiasta. Monet kulut, kuten lupamaksut eivät kasva tai kasvavat hyvin vähän laitoksen kapasiteetin kasvaessa. Laitoksen koolle ylärajan asettaa kuitenkin sähköntoimituskapasiteetti, jonka yläraja on noin 250 MW käytettävissä olevalla 110 kV siirtolinjalla. Myös rahoituksen toteutuminen suurempaan laitokseen voi olla epävarmempaa.

8.5 Biomassan kaasutukseen perustuva metanoliprosessi

Metanolin tuotantoa vertailtiin lisäksi biomassan kaasutukseen perustuviin prosesseihin samoilla vuosittaisilla metanolin tuotantokapasiteeteilla (ks. kuva 18). Näissä prosesseissa ei tarvita CO₂:n talteenottolaitosta ja vaadittu elektrolyyseri on pienempi,

koska osa vedystä tuotetaan biomassaa kaasuttamalla. Kolmea biomassan kaasutukseen perustuvaa laitosvaihtoehtoa tarkasteltiin:

- 1) Biomassan kaasutukseen perustuva prosessi, missä kaasuttimen tuotekaasu lämmitetään noin 950 °C, minkä jälkeen kaasuun sekoitetaan happea.
- 2) Kaasuttimen tuotekaasun lämmitykseen käytetään sähkölämmitystä.
- 3) Tapaus 2, mutta biomassan lisäksi syötetään 10 p-% biomassan kuiva-aineesta raakabiokaasua prosessiin, jolloin saadaan myös raakabiokaasusta tuotettua metanolia.

Tapauksen 1 kassavirrat on esitetty taulukossa 10 ja kannattavuuslaskelmat liitteessä B.

Taulukko 10: Tapauksen 1 vaihtoehtojen kassavirrat eri laitokseen vaihtoehdoilla. Kaasutuksen tuotekaasun reformointi hapella.

	20 000 t/a metanolia	100 000 t/a metanolia	200 000 t/a metanolia
Kassavirta	5.73 M€/a	35.3 M€/a	74.1 M€/a

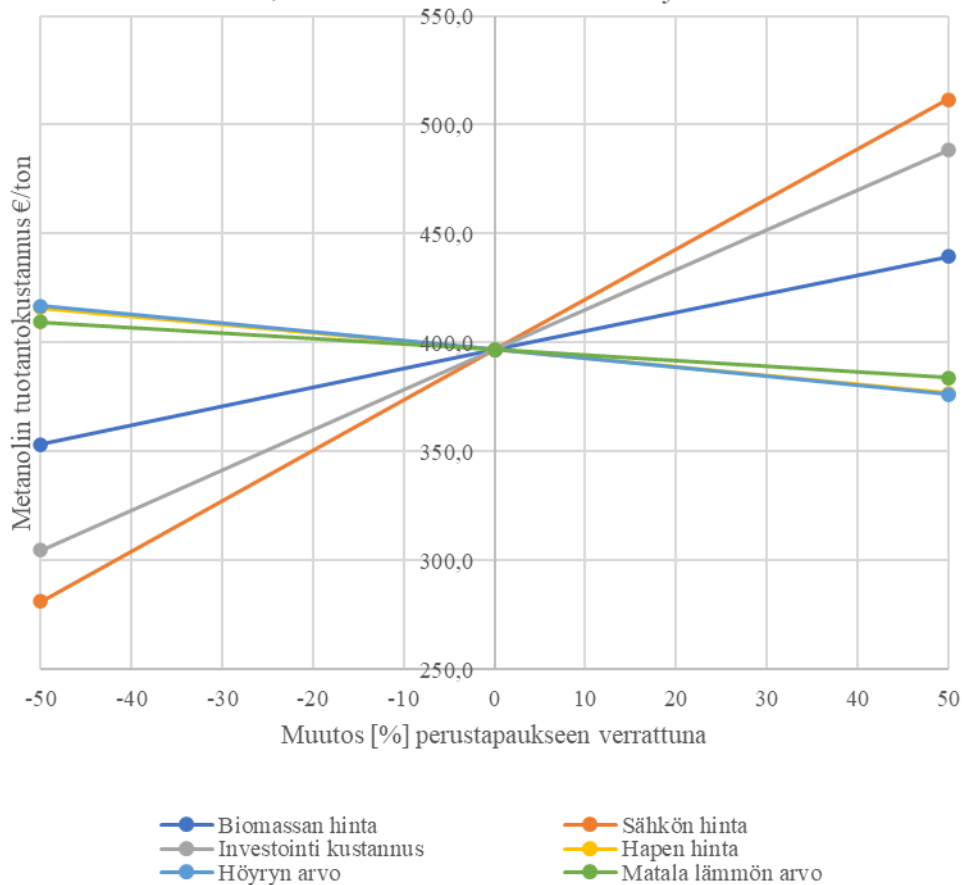
Alla olevassa taulukossa on esitetty taulukon 9 mukaisesti tapaukselle 2 metanolitonnista saatavat hinnat tuotantokulujen kattamiseksi kaikilla kolmella laitokseen vaihtoehdolla. Verrattuna erotetun CO₂:n ja elektrolyyserin avulla tuotettuun metanoliin, biomassan kaasutukseen ja pienempään elektrolyyseriin perustuvan metanolin hinta saa olla noin 40-50 % alhaisempi.

Taulukko 11: Tapauksen 2 metanolitonnin hinnan raja-arvo kannattavuudelle eri laitokseen vaihtoehdoilla. Kaasuttimen tuotekaasun reformointi sähkölämmityksellä.

Sähkön hankintatapa	Sähkön hintaa	20 000 t/a metanolia	100 000 t/a metanolia	200 000 t/a metanolia
Pitkäaikainen hankintasopimus	35 €/MWh	460 €/t	397 €/t	381 €/t

Tapaukselle 2 ja tuotantokapasiteetille 100 000 t metanolia vuodessa laskettiin Kuva 22 herkkyysoanalyysissä, miten eri tekijät kuten biomassan ja sähkön hinta vaikuttavat metanolin tuotantokustannukseen. Vaikka biomassan kaasutusvaihtoehto käyttääkin vähemmän sähköä verrattuna talteen otetun hiilidioksidin vaihtoehtoon, sähkön hinta on silti tärkein tekijä hinnanmuodostuksessa herkkyysoanalyysin perusteella.

Herkkysoanalyysi metanolin tuotantokustannus €/tonnin vs. muutos kussakin muuttujassa perustapauksen verrattuna tuotanto 100 000 tonni vuodessa, reformointi sähkölämmityksellä



Kuva 22: Tapauksen 2 herkkyysoanalyysi. Metanolin tuotantokustannus €/t vs. muutos kussakin muuttujassa perustapaukseen verrattuna. Tuotanto 100 000 tonnia vuodessa, reformointi sähkölämmityksellä.

8.6 Tuulisähkön kustannukset Puhoksessa

Pohjois-Karjalan potentiaalisia tuulipuistoalueita on kartoitettu jo vuonna 2011 osana laajempaa, Sisä-Suomen maakuntia kattavaa selvitystä [93]. Tuuliolosuhteita tarkasteltiin Tuuliatlaksen [94] avulla tuolloin rakenteilla olevien tuulivoimaloiden tyypillisellä napakorkeudella 100 m. Selvityksen tuloksena Puhoksen lähialueilta löydettiin kolme aluetta (Sikosärkät, Keloniemi ja Poroniemi), joilla katsottiin olevan edellytyksiä tuulivoimapuistojen sijoittumiseen.

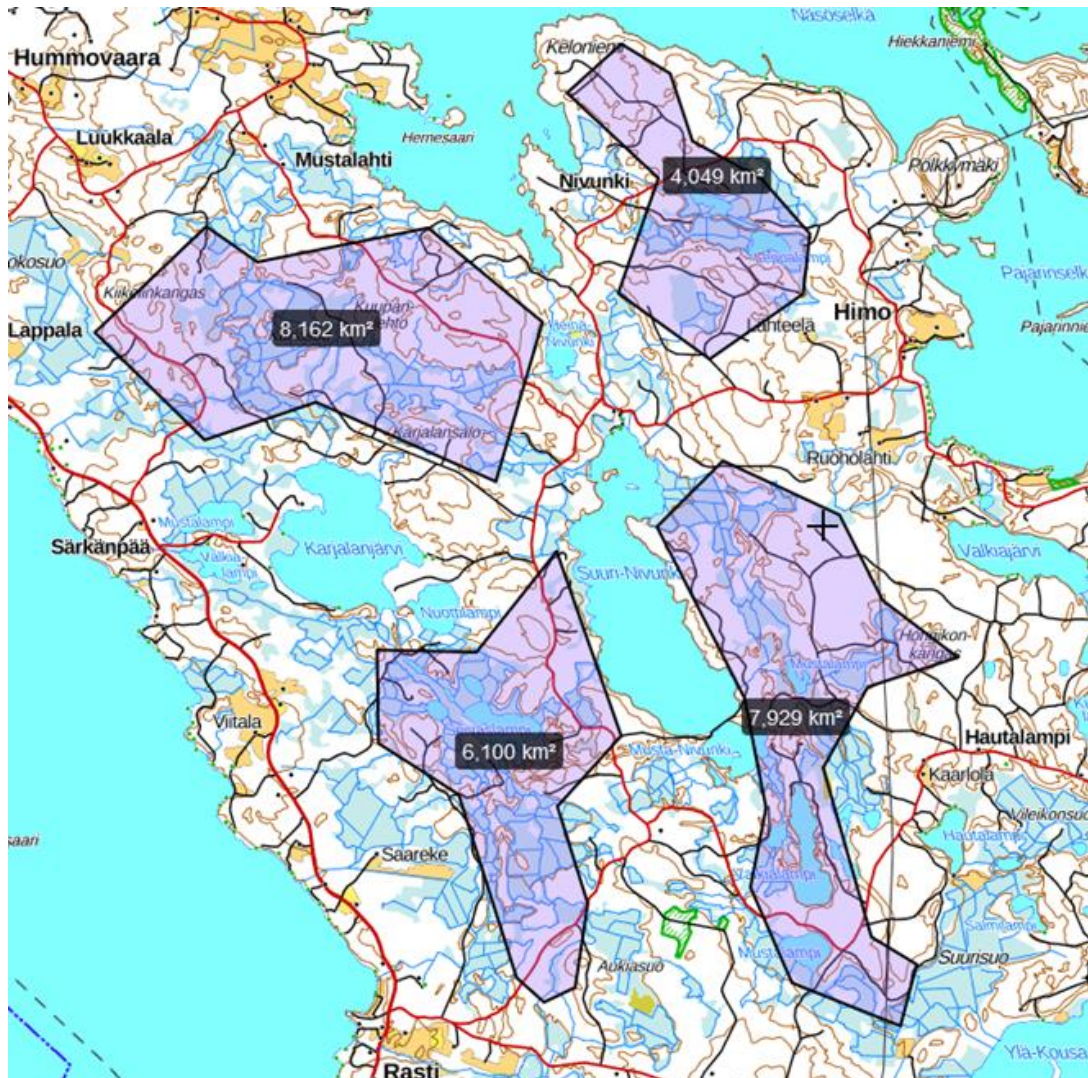
Vuoden 2011 selvityksen jälkeen tuulivoiman kehitys on ollut nopeaa. Voimaloiden yksikkökoot (roottorien halkaisijat) ja napakorkeudet ovat kasvaneet lisäten niiden vuotuista energiantuotantoa ja huipunkäyttöaika, samalla kun asennettua kapasiteettia kohti lasketut ominaisinvestointikustannukset ovat pienentyneet tekniikan kehityksen ja koon kasvun seurauksena. Tekniikan kehitys ja voimalan tuottaman energian kasvu on pienentänyt myös tuulivoiman käyttö- ja kunnossapitokustannuksia. Maatuulivoima onkin tällä hetkellä edullisin uusiutuvan sähkön tuotantomuoto [95].

Tässä selvityksessä uusiutuvan ekosysteemin tuulipuistolle pyritään löytämään alue Puhoksen teollisuusalueen läheltä ottaen huomioon tuuliolojen lisäksi nykyinen infrastruktuuri sekä maankäyttö- ja ympäristönäkökohdat. Valitaan käytettävä tuuliturbiinityyppi sekä arvioidaan alueelle sijoitettavien tuuliturbiinien lukumäärä ja tuotettu energia vuodessa. Turbiinien tarkkaa sijaintia alueella ei määritetä. Arvioidaan tuulipuistolla tuotetun sähkön omakustannushinta [€/MWh] koko sen elinkaaren ajalta. Tällä tavoin saatua hintaa voidaan verrata esimerkiksi sähköpörssistä hankittavaan sähköön. Jos tuulipuiston toteuttaa ulkopuolinen toimija, sen myymä sähkö on omakustannushintaa kalliimpi investoinnille asetetun tuotto-odotuksen vuoksi.

8.6.1 Tuulivoiman tuotantoalue ja turbiinityyppi

Tarkastelun perusteella tuulivoiman mahdolliseksi tuotantoalueeksi valittiin kuvassa 23 esitetty Suuri-Nivungin ympärillä sijaitseva neljän osa-alueen sisältämä kokonaisuus, jossa Pohjois-Karjalan maakuntakaavan 2040 [96] mukaan ei ole rajoittavia maankäyttö-

tai ympäristötekijöitä. Osa-alueet on rajattu siten, että Maanmittauslaitoksen [97] esittämään asutukseen on vähintään 1 km. Kantaverkon 110 kV sähkölinja kulkee alueen kautta ja sillä on kattava tieverkko. Alueen pinta-ala on yhteensä 26 km², josta osa on suota ja lampea. Tuulipuiston mitoitustapana on käytetty 0.75 voimalaa/km², jonka mukaan alueelle voidaan sijoittaa 19 voimalaa. Vuoden 2011 selvityksessä mainittu Keloniemi sijaitsee valitun alueen koillisosassa.



Kuva 23: Tuulivoiman mahdollinen tuotantoalue Puhoksen teollisuusalueen läheisellä Suuri-Nivungin alueella.

Tuuliturbiiniksi valittiin tanskalaisen Vestas Wind Systems A/S:n V162-6.8 [98]. Kyseessä on EnVentus-tuotesarjaan kuuluvan voimalatyypin uusi 6.8 MW tehoinen malli, jonka pienempitehoisia (6.0 MW ja 5.6 MW) versioita on käytössä/rakenteilla Suomessakin. Tuuliturbiinin teknisiä arvoja on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12: Vestas V162-6.8 -tuuliturbiinin ominaisuuksia.

Vestas V162-6.8	
Tuuliluokka	IEC S
Nimellisteho [MW]	6.8
Roottorin halkaisija [m]	162
Napakorkeus [m]	200
Generaattori	Kestomagneetti-tahtigeneraattori
Voimansiirto	2-portainen vaihteisto
Min tuulen nopeus [m/s]	3
Max tuulen nopeus [m/s]	25

8.6.2 Arvioitu vuosituotanto ja energian tuotantokustannus

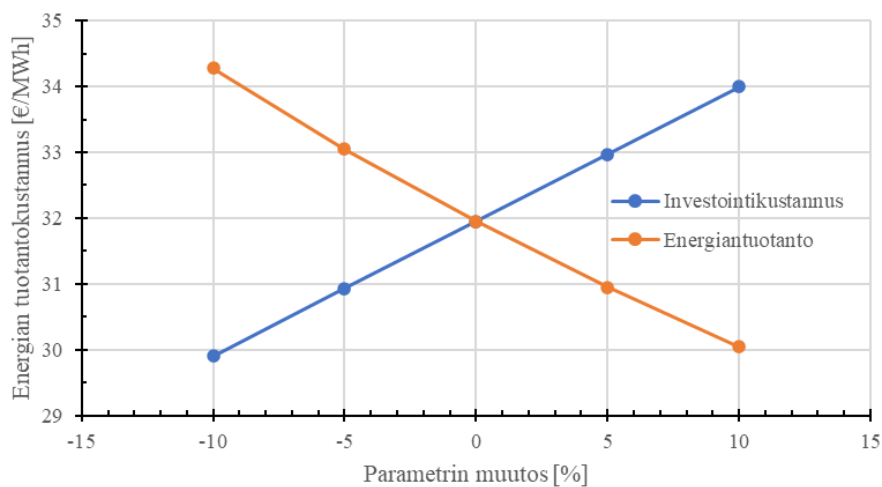
Tuulivoiman tuotantokustannuksia määritettiin yhteistyössä projektiin osallistuvien kanssa. Turbiinityypin investointikustannukseksi arvioitiin 1 100 €/kW ja valitun napakorkeuden mukaiseksi huipunkäyttöajaksi 3 500 h/a. Tuuliatlaksen mukainen tuulen vuotuinen keskinopeus napakorkeudella on 7.5 – 7.8 m/s. Verkkoonliittymän kustannukset koostuvat sähköaseman rakentamisesta ja liittymismaksusta. Koska 110 kV sähkölinja kulkee alueen kautta, erillistä siirtolinjaa ei tarvita. Käyttö- ja kunnossapitokustannus sisältää tuulipuiston operoinnin ja tasehallinnan kustannukset sekä kiinteistöveron, vuokran ja vakuutukset.

Laskennassa tuulipuiston vuotuinen energiantuotanto ja kustannukset oletettiin vakioiksi koko tarkastelujakson aikana, jolloin energian keskimääräinen tuotantokustannus saadaan jakamalla vuotuinen tuotanto kustannuksilla. Taulukossa 13 on esitetty tuotantokustannuksen laskenta lähtöarvoineen. Valitulla pitoajalla ja korkokannalla tuotantokustannus oli noin 32 €/MWh.

Taulukko 13: Tuulivoiman tuotantokustannuksen muodostuminen.

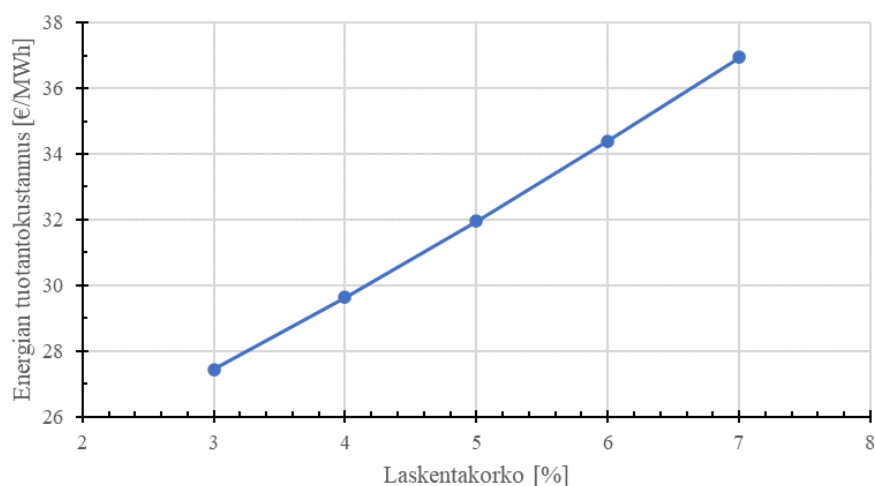
Pitoaika	30	a
Laskentakorko	5.0	%
Yhden turbiinin sähköteho	6.8	MW
Turbiinien lukumäärä	19	
Sähköteho yhteensä	129.2	MW
Huipunkäyttöaika	3 500	h/a
Energiantuotanto	452 200	MWh/a
Investointikustannus pl. verkkoonliityntä	1 100	€/kW
Etäisyys 110 kV kantaverkosta	0	km
Siirtolinja	225	k€/km
Sähköasema	1.5	M€
Liittymismaksu	2.0	M€
Investointikustannus yhteensä	145.6	M€
Vuotuinen pääomakustannus	20.9	€/MWh
Käyttö- ja kunnossapitokustannus	11.0	€/MWh
Energian tuotantokustannus	31.9	€/MWh

Tuulivoiman investointikustannus ja vuotuinen energiantuotanto vaikuttavat merkittävästi tuotetun sähkön omakustannushintaan. Kuvassa 24 on esitetty herkkyystarkasteluna tekijöiden vaikutus, kun lähtökohtana on taulukon 13 arvot. Kummankin vaikutus tuotantokustannukseen on hyvin lineaarinen. Investointikustannuksen kasvaessa 10 % omakustannushinta kasvaa 2 €/MWh, energiantuotannon kasvaessa 10 % hinta pienenee 2 €/MWh.



Kuva 24: Investointikustannuksen ja vuotuisen energiantuotannon vaikutus tuulivoiman tuotantokustannukseen.

Myös laskentakorko vaikuttaa suuresti tuotantokustannukseen. Kuvan 25 mukaisesti koron ollessa 7 % omakustannushinta on 37 €/MWh, vastaavasti ilman koron huomioon ottamista päästään hintaan, joka on alle 22 €/MWh. Tarkastelussa käytetty 5 % voidaan ajatella edustavan keskimääräistä arvoa, kun rahoituksen toteutustapa ei ole tiedossa. Tämä arvo toteutuu esim. silloin, kun investoinnista 20 % toteutetaan omarahoituksella, jolle vaaditaan 9 % korko ja loput 80 % ulkopuolisella lainalla, jonka korko on 4 %.



Kuva 25: Laskentakoron vaikutus tuulivoiman tuotantokustannukseen.

8.7 Jatkotyö ja -ehdotukset

Suurin pullonkaula ekosysteemin toteutukselle on selvityksen valossa raaka-ainehiilidioksidin saatavuus. Niin hiilidioksidin lähde (savukaasut, kaasutus biomassasta, ilmakehän hiilidioksidi) kuin kuljetustapakin (paikallinen tuotanto, putkikuljetus, nesteytetty hiilidioksidi) sisältävät huomattavat määrät teknologista epävarmuutta ja kartoittamatonta potentiaalia, minkä takia hiilidioksidin hankinta muodostaa sinänsä laajan kokonaisuuden, jota on syytä kartoittaa koko ekosysteemin toteutusta selvitettäessä. Mahdollisesti jopa turpeen kaasutus voi olla kannattava hiilidioksidin tai synteesikaasun lähde. Biomassan kaasutuksen etu olisi, että kaikki lopputuotteiden esim. metanolin tuotantoon tarvittava hiili saataisiin biomassasta, eikä hiilidioksidin talteenottoa silloin tarvittaisi. Tuotettua sähköä olisi mahdollista hyödyntää merkittävästi tehostamaan biomassan kaasutusprosessia, jolloin saadaan moninkertainen lopputuotteen saanto verrattuna perinteiseen biomassan kaasutusprosessiin, sillä lähes kaikki biomassan hiili sitoutuu lopputuotteeseen. Lisäksi voitaisiin hyödyntää kaasutusprosessissa syntyvää lämpöä esim. kaukolämmön tai höyryn tuotannossa. Biomassan kaasutus vaatisi kuitenkin useampivaiheisen prosessin verrattuna hiilidioksidia ja sähköä käyttävään tuotantoprosessiin, ja biomassasta saadun kaasun prosessointi metanolisynteesiä varten luultavasti kannattaisi demonstroida toimivaksi pienemmässä mittakaavassa ennen ison mittakaavan teollisuuslaitosinvestointia.

On selvää, että uusiutuvan energian tuotanto kannattaa sellaisenaan ja sähkön voi myydä kansainvälisessä sähköpörssissä. Uusiutuvan tuuli- ja aurinkosähkön tuotannon suunnittelu on yleisesti saatavilla oleva palvelu eikä vaadi välttämättä jatkoselvitystä yliopistotasolla. Ainoa syy, miksi uusiutuvaa sähkökapasiteettia ei välttämättä kannattaisi asentaa Puhokseen on investointiin käytettävissä olevan pääoman rajallisuus, jos se halutaan käyttää synteesiprosessiin.

Erillinen selvitys olisi syytä tehdä siitä, mikä tarkalleen ottaen on kantaverkon maksimisähkönsiirtokapasiteetti Kiteen Puhokseen, sillä käytettävissä oleva siirtokapasiteetti voi muodostaa kriittisen reunaehdon synteesilaitoksen kapasiteetille.

Raportin kirjoitushetkellä sähkön hinta käy läpi kaoottista vaihtelua, mutta pörssihinnan jääminen entistä huomattavasti korkeammalle tasolle vuosiksi eteenpäin näyttää selvältä. Näin ollen ensisijainen ehdotus Kiteen elinvoiman parantamiseksi on tuuli- ja aurinkovoiman lisärakentaminen. Uusiutuvan sähkön lisärakentaminen palvelee myös uusiutuvien tuotteiden valmistusta tulevaisuudessa. Toissijaisena ehdotuksena erityisesti Puhoksen teollisuusalueen elinvoiman parantamiseksi on ulkoisen taloudellisen tuen ja yhteistyökumppanien etsiminen tutkimus/prototyypikokoluokan metanolisynteesin rakentamiseksi entisen Puhos Board Oy:n toimitiloihin. Oletuksena on, että hiilidioksidin talteenotto- ja kuljetusinfrastruktuuri tulee jatkossa kehittymään.

Sähköverkkoon liittyen ehdotus on olla jatkuvasti selvillä Fingrid Oy:n kantaverkon kehittämistavoitteista ja pyrkiä vaikuttamaan Puhokseen liittyviin päätöksiin siten, että sähköenergian siirtokapasiteettia on saatavilla. Lisäksi sähköverkkoon liittyen ehdotus on päivittää Bakelite Oy:n kanssa yhteistyössä suoran kytkinasemaliitynnän kannattavuusselvitys vastaamaan nykyistä hintatasoa. Kaikki paljon sähköä käyttävä teollisuus on liittynyt Suomessa suoraan kantaverkkoon.

8.7.1 Kiteen Lämpö Oy:n rooli

Kiteen Lämpö Oy:n lämmöntuotanto perustuu biomassan kaasutukseen. Periaatteessa lämmöntuotannon kaasutuksen tuotekaasu on myös synteesi-prosessin lähtöaine, ja Kiteen Lämpö Oy:n olemassa olevaa biomassan logistiikkaa ja teknologiapääomaa voitaisiin käyttää osana uusiutuvaa ekosysteemiä. Kysymys on kuitenkin monimutkaisempi, koska Kiteen Lämpö Oy:n kaasutusprosessit on suunniteltu tuottamaan poltettavaa kaasua, jonka puhtauskriteerit ovat erilaiset verrattuna kemikaalisynteesissä tarvittavaan kaasuun. Poltettavaksi tarkoitettu kaasu voi sisältää hiilimonoksidin ja vedyn lisäksi typpeä, rikkiyhdisteitä ja orgaanisia epäpuhtauksia, kun taas synteesi-kaasussa pitäisi olla lähes puhdasta hiilimonoksidia tai hiilidioksidia sekä vetykaasua.

Yksi vaihtoehto voisi olla Kiteen lämmön nykyisten kaasutus- ja lämmöntuotantokattiloiden korvaaminen teknisesti monimutkaisemmilla puhdasta hää/vety-seosta tuottavilla prosesseilla, jotka käyttäisivät samaa raaka-ainetta ja

ottaisivat tarvitsemansa puhtaan hapen elektrolyyseristä. Hapen ja höyryn syöttö ilman sijasta voisi mahdollisesti myös nostaa nykyisen laitteen kapasiteettia, jolloin kaasua voisi jäädä yli lämmöntuotannosta muihin tarkoituksiin esim. kemikaalien tuotantoon. Nykyinen polttoaineeksi kaasuttaminen lämmöntuotannossa ei edellytä puhdasta happea vaan käyttää ilmakehän ilmaa. Kiteen Lämpö saisi tuloja korkean jalostusasteen synteetikaasun myymisestä synteetitehtaalle ja voisi ostaa synteetitehtaalta metanoliprosessin prosessilämpöä. Tämä vähentäisi synteetitehtaan hiilidioksidin hankintatarvetta sekä paikallisesti syntyviä päästöjä, koska metsäbiomassan hiili päätyisi metanoliin eikä lämpökattilan kautta ilmakehään. Biomassasta hapella kaasutetun tuotekaasun puhdistamiseen synteetiprosessia varten on olemassa luotettava tekninen ratkaisu, Lurgi Rectisol™ -prosessi [99]. Rectisol-prosessia myyvä Air Liquide Group toimii myös Suomessa. Lisäksi Rectisol-prosessi käyttää kaasupesurissaan metanolia imeytysaineena, jonka saatavuus Puhoksessa olisi taattu eikä se ole ympäristölle erityisen haitallinen.

8.7.2 Itä- ja Etelä-Suomen vetyklusteri

LUT-yliopistossa meneillään olevan Itä- ja Etelä-Suomen vetyklusteri -hankkeen tuloksena voidaan saada hyödyllistä lisätietoa Puhoksen teollisuusalueen roolista tulevaisuuden vihreässä taloudessa. Hanke kartoittaa muun muassa tulevaisuuden aurinko- ja tuulisähkökapasiteettia ja muuta vihreän energian ja kemikaalien tuotantoa mahdollistavaa tulevaisuuden infrastruktuuria. Kun hanke on saatu päätökseen, voidaan tarkastella tulosten valossa uudelleen tässä raportissa tehtyä uusiutuvan ekosysteemin mallia ja tehdä siihen muutosehdotuksia.

9 Yhteenveto

Karkean teknistaloudellisen tarkastelun perusteella erityisesti synteettisen metanolin tuotanto voi olla kannattavaa Kiteen Puhoksessa edellyttäen, että tuotteesta saadaan riittävän korkea hinta, että raaka-aineista erityisesti sähkön hinta on riittävän edullinen ja että hiilidioksidiraaka-aineen toimitus Puhokseen pystytään toteuttamaan. Aurinkovoiman rakentaminen tuotantotilojen yhteyteen vaikuttaa selvityksen perusteella kannattavalta, vaikka kokonaissähköntarpeesta aurinkovoimalla ei katettaisikaan kuin alle 5 %. Tuulivoiman kustannukset Suuri-Nivungin alueella ovat myös kohtuulliset, mikä tarkoittaisi riittävän edullista sähkön tuotantoa synteesisprosessille.

Selvityksen perusteella se, miten uusiutuva ekosysteemi ja siihen liittyvä sähkön tuotanto on yhdistetty sähköverkkoon voi vaikuttaa oleellisesti laitoksen kannattavuuteen. Selkein yksittäinen kustannustehokkuuteen vaikuttava tekijä sähköverkkokytkenässä on se, että paikallisverkon siirtomaksut pystytään välttämään liittymällä suoraan valtakunnalliseen Fingrid Oy:n jakeluverkkoon, vaikka liittymisen kertakustannukset olisivatkin korkeat. Selvityksen perusteella valtakunnallisen sähköverkon ulkopuolelle jäämisellä voisi saada aikaan vain vähäisen kustannussäästön, mutta samalla aiheutuisi teknologisia rasitteita sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainottamisesta ekosysteemin sisällä.

Suurin teknologinen haaste liittyy hiilidioksidin saatavuuteen. Suuren mittaluokan hiilidioksidin talteenottoa ei ole toteutettu esimerkiksi Suomen sellutehtaissa tai suurissa voimalaitoksissa, missä olisi tarpeeksi hiilidioksidia. Myös hiilidioksidin kuljettaminen suuressa mittakaavassa on tekninen haaste. Synteesisprosessin sijoittaminen Kiteen Puhokseen olisi edullista lähinnä lopputuotteen lyhyen kuljetusmatkan takia. Kuitenkin nestemäisen tuotteen kuljettaminen voi osoittautua helpommaksi kuin kaasumaisen hiilidioksidiraaka-aineen. Suurimman mittaluokan laitoksissa myös sähkön siirtokapasiteetti voi muodostua teknologiseksi esteeksi.

Seuraava askel kohti vihreää siirtymää Kiteen Puhoksessa voisi olla uusiutuvan tuuli- ja aurinkovoiman rakentaminen, sillä ne ovat sellaisenaan kannattavia investointeja ilman

synteesiprosessiakin, koska sähkön hinta ja kysyntä ovat taattuina vihreässä siirtymässä. Uusiutuvan sähköenergian tuotannon lisäksi voisi olla perusteltua aloittaa pelkän vedyn tuotantoa luottaen siihen, että vetytalous ja vedyn kysyntä kasvavat selkeästi lähitulevaisuudessa osana vihreää siirtymää. Voisi olla myös perusteltua toteuttaa julkisen talouden tukemana prototyyppikokoluokan metanolisynteesi, jolla tekninen mahdollisuus raaka-ainemetanolin tuotantoon todistetaan sekä käynnistää selvitystyö hiilidioksidin hankinnasta. Ratkaisemattoman hiilidioksidin saatavuuskysymyksen takia ”Avaimet-käteeseen”-tyyppinen suuren kokoluokan hiilivetyjä tuottavan laitoksen toimitus Puhokseen ei vaikuta toistaiseksi mahdolliselta tämän selvityksen valossa.

Lähdeluettelo

- [1] Yhdysvaltojen energiaministeriö (Department of Energy), Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2021, *Hydrogen Fuel Basics*, (19.1.2021), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics>.
- [2] Hannila T., 2018, Rautaoksidien vetypelkistys. Oulun yliopisto, Kandidaatintyö.
- [3] Yhdysvaltojen energiaministeriö (Department of Energy), Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2021, *Hydrogen Storage*, (19.1.2021), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
- [4] Yhdysvaltojen energiaministeriö (Department of Energy), Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2006, *Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy*, (19.1.2021), https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/fcto_nh3_h2_storage_white_paper_2006.pdf.
- [5] Wärtsilä Oyj, 2021, *Wärtsilä and SHI agree to collaborate on ammonia fuelled engines for future newbuilds*, (19.1.2021), <https://www.wartsila.com/media/news/22-09-2021-wartsila-and-shi-agree-to-collaborate-on-ammonia-fuelled-engines-for-future-newbuilds-2978445>.
- [6] Laaksonen P., Karjunen H., Ruokonen J., Laari A., Zhaurova M., Kinnunen S., Kosonen A., Kärri T., Sinkkonen T., Rissanen T., Tervonen A. and Varis J., 2021, *Feasibility Study for Industrial Pilot of Carbon-Neutral Fuel Production – P2X*. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT – Tutkimusraportti.
- [7] Neo-Carbon Energy project, 2021, *About*, (19.1.2021), <http://www.neocarbonenergy.fi/about/>.
- [8] Neo-Carbon Energy project, 2021, *Journal Articles*, (19.1.2021), <http://www.neocarbonenergy.fi/library/journal-articles/>.
- [9] Child M., Nordling A. and Breyer C, 2017, Scenarios for a sustainable energy system in the Åland Islands in 2030, *Energy Conversion and Management*, 137, ss. 49-60, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.039>.
- [10] Yle, 2021, *Nouseeko Ahvenanmaan merialueille 500 tuulivoimalaa? Miljardien hanke etenee myötätuudessa*, (19.1.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-11896072>.
- [11] Yle, 2022, *Perämeren tuulivoimarakentamista aletaan tutkia tarkemmin Hailuodon ja Pietarsaaren edustalla – 300 voimalaa muuttaisivat Suomen energiatuotantoa*, (19.1.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-12273391>.

- [12] Yle, 2021, *Merituulivoiman läpimurtoa odotetaan Suomessa edelleen, mutta Perämerellä halutaan selvittää jopa aluevesirajan ulkopuolista tuotantoa*, (19.1.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-11983913>.
- [13] Pohjois-Karjalan maakuntaliitto, 2021, *Pohjois-Karjalan muuttovoitto kasvussa*, (22.11.2021), <https://www.pohjois-karjala.fi/tilastot>.
- [14] Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017, *Pohjois-Karjala, alueprofiili*, (22.11.2021), <https://tem.fi/documents/1410877/6463080/Pohjois-Karjala.pdf/3177b387-e039-4621-be26-6197795098c3/Pohjois-Karjala.pdf.pdf>.
- [15] UPM, 2018, *Ainutlaatuinen koivuvaneri suojaa maakaasukuljetuksia*, (27.11.2021), <https://www.upm.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/2018/12/ainutlaatuinen-koivuvaneri-suojaa-maakaasukuljetuksia/>.
- [16] Yle, 2012, *Perloksen saattohoito tehty - elämä vanhoissa tehtaissa jatkuu*, (22.11.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6137459>.
- [17] Kauppalehti, 2019, *Pohjois-Karjalan vientikärki levenee*, (22.11.2021), <https://www.kauppalehti.fi/kumppanisaltoa/studiovieras/pohjois-karjalan-vientikarki-levenee/1d997b7e-f22a-5a9e-9987-8302e3afbde0>.
- [18] Tilastokeskus, *Taajamat väkiluvun ja väestöntiheyden mukaan, 2018*, (27.11.2021), https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin_Passiivi/StatFin_Passiivi_vrm_vaerak/statfinpas_vaerak_pxt_11s8_2018.px/table/tableViewLayout1/.
- [19] Keski-Karjalan Kehitysyhtiö Oy, *Yritys- ja palveluhakemisto*, (27.11.2021), <https://keti.yrityshakemistot.fi/default.asp?op=NaytaYhteenveto>.
- [20] Kauppalehti, *Kesla Oy*, (27.11.2021), <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/kesla+oyj/01687158>.
- [21] Kauppalehti, *Bakelite Oy*, (27.11.2021), <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/bakelite+oy/16281353>.
- [22] Keski-Karjalan Kehitysyhtiö Oy ja Kiteen kaupunki, 2012, *Kiinteistö Oy Puhoksen Lastu*, (27.11.2021), <https://www.kiteenpuhos.fi/documents/562873/0/Kiinteist%C3%B6+Oy+Puhoksen+Lastu+.pdf/0c26760b-f3e0-fb91-0adf-5d932383a6f5>.
- [23] Surfactor Oy, *Applications*, (27.11.2021), <https://www.surfactor.com/applications>.
- [24] Kauppalehti, *Surfactor Finland Oy*, (27.11.2021), <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/surfactor+finland+oy/24726105>.

-
- [25] Pohjois-Karjalan koulutuskuntayhtymä, Riveria, *Riveria, Kiteen koulutusyksikkö*, (27.11.2021), <https://www.riveria.fi/riveria/yhteystiedot/kitee/>.
- [26] Yle, 2013, *Puhos Board etsii jälleen uutta yrittäjää*, (27.11.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6452166>.
- [27] Yle, 2013, *Puhos Board lähdössä palasina maailmalle*, (27.11.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6452166>.
- [28] Kauppalehti, *Puhos Board Oy*, (27.11.2021), <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/09449904>.
- [29] Rakennuslehti, 2011, *Puhos Board Oy*, (27.11.2021), <https://www.rakennuslehti.fi/2011/09/lastulevyvalmistaja-puhos-board-hakeutui-konkurssiin/>.
- [30] Yle, 2019, *Stora Enso keskittää kuusisahatavaran tuotannon Varkauteen – Kiteen saha suljetaan*, (27.11.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6452166>.
- [31] Maaseudun tulevaisuus, 2021, *Sahatavaran hinnat kääntymässä laskuun muuallakin kuin Yhdysvalloissa, Danske Bank arvioi*, (27.11.2021), <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/artikkeli-1.1544664>.
- [32] Keski-Karjalan kehitysyritys Oy KETI, 2021, *Teollisuustie 20, Kohde #51*, (30.11.2021), <https://keti.toimitilapalvelut.fi/fi/toimitilat/teollisuustie-20-kitee>.
- [33] Museovirasto, *Museoviraston karttapalvelu*, (27.11.2021), <https://kartta.museoverkko.fi/>.
- [34] Yle, 2014, *Kiteen liimatehtaalla menee hyvin – Uuden tuotteen valmistus alkamassa*, (29.11.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-7449464>.
- [35] Maljojoki, P ja Turunen H., *Kiteen elinkeinoelämä pähkinänkuoressa*, Aikuiskasvatus, 3/1993. ss. 188 – 196.
- [36] Kilpailu- ja kuluttajavirasto, 2000, *Ratkaisut ja julkaisut*, (29.11.2021), <https://www.kkv.fi/ratkaisut-ja-julkaisut/ratkaisut/arkisto/2000/sellaisenaan-hyvakasytyt-yrityskaupat/985812000/>.
- [37] Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2019, *Hexion Oy:n (entinen Momentive Specialty Chemicals Oy) Puhoksen tehtaan ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Kitee*, (29.11.2021), <https://ylupa.avi.fi/fi-FI/asia/1174093>.
- [38] Koti-Karjala, 2021, *Liimatehtaalla merkkivuosi ja nimenvaihdos*, (29.11.2021), <https://www.kotikarjala.fi/article-6.6.50888.e0d5156a5d>.

- [39] Foremark Performance Chemicals, *Customized high performance products*, 2022, (29.11.2021), <https://foremarkperformance.com/products/>.
- [40] NaturalGas.org, 2013, *Processing Natural Gas*, (29.11.2021), <http://naturalgas.org/naturalgas/processing-ng/>.
- [41] News, 2012, *Dynea sells Finnish paper overlays business*, (1.12.2021), <https://news.cision.com/dynea/r/dynea-sells-finnish-paper-overlays-business,c9259783>.
- [42] Kiteen kaupunki, 2021, *Jätehuollon järjestäminen*, (1.12.2021), <https://www.kitee.fi/jatehuolto>.
- [43] Puhtaanapito Pesonen Oy, 2021, *Jäte- ja lokahuolto*, (1.12.2021), <https://puhtaanapitopesonen.com/jate-ja-lokahuolto/>.
- [44] Kiteen kaupungin tekninen lautakunta, 2018, *Kiteen kaupungin jätemaksutaksa 2019*, (1.12.2021), <http://webdynasty.pohjoiskarjala.net/dynasty/Kitee/kokous/201810807-5.PDF>.
- [45] Yle, 2012, *Laskelmat jätteenpolton hinnasta eivät täsmää*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-5067294>.
- [46] Yle, 2013, *Suuri polttolaitoshanke kaatui Kiteellä - jätesoppa kuplii edelleen*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6466618>.
- [47] Riikinvoima Oy, 2021, *Suomen ympäristöystävällisin ekovoimalaitos*, (1.12.2021), <https://riikinvoima.fi/yhtio/>.
- [48] Puhas Oy, 2021, *Yhtiö*, (1.12.2021), <https://www.puhas.fi/yhtio.html>.
- [49] Yle, 2012, *Ekovoimala toteutunee Puhoksessa*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6230041>.
- [50] Yle, 2012, *Kymmenien miljoonien jätevoimala nousee Kiteelle*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6333143>.
- [51] Yle, 2012, *Ekokemin päätös Kiteen voimalaitoksesta lykkääntyy*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-6414099>.
- [52] Ramboll Finland Oy, 2005, *Puhoksen teollisuusalueen energiantuotanto- ja kierrätyspuistohanke*, (1.12.2021), <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B481DDE44-1EE7-4D0F-9B5E-9A38E585979B%7D/41017>.

- [53] Suomen ympäristökeskus (SYKE), *Kuntien ja alueiden kasvihuonekaasupäästöt*, (30.3.2022), <https://paastot.hiilineutraalisuomi.fi/>.
- [54] Kiteen Lämpö Oy, 2022, *Lämpökeskukset*, (30.3.2022), <https://www.kiteenlampo.fi/#lampokeskus>.
- [55] Ympäristöministeriö, 2021, *Pariisin ilmastopimus*, (1.12.2021), <https://ym.fi/pariisin-ilmastopimus>.
- [56] IRENA, 2021, *International Renewable Energy Agency*, (1.12.2021), <https://www.irena.org/>.
- [57] CCC, 2021, *Climate Change Committee*, (1.12.2021), <https://www.theccc.org.uk/>.
- [58] UN, 2021, *United Nations Climate change committee*, (1.12.2021), <https://unfccc.int/>.
- [59] IEA, 2021, *Climate Change*, (1.12.2021), <https://www.iea.org/topics/climate-change>.
- [60] IRENA, 2021, *World Energy Transitions Outlook*, (1.12.2021), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf.
- [61] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2021, *Tuulivoimahankkeet Suomessa 1/2021*, (1.12.2021), https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2.-julkaisuun-tuulivoimahankelista-1_2020.pdf.
- [62] Energiateollisuus, 2021, *Sähkön hankinta energialähteittäin 2007-2020*, (1.12.2021), https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon_hankinta_energiالاhteittain_2007-2020.html#material-view.
- [63] Yle, 2021, *Nyt se viimein tapahtuu: Olkiluoto 3 alkaa tuottaa sähköä – näin ydinvoimasäyitys vaikuttaa kuluttajiin ja Suomeen*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-12207058>.
- [64] Autoalan Tiedotuskeskus, 2021, *Tieliikenteen energiankulutus, TJ/v*, (1.12.2021), https://www.aut.fi/tilastot/liikenteen_energiankulutus/tieliikenteen_energiankulutus.
- [65] Finlex, 2021, *Sähk6markkinalaki 9.8.2013/588*, (1.12.2021), <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>.
- [66] Kukkonen T., 2020, *Teollisuuden sähköverkköjen kehittyminen älykkäiksi sähköenergiajärjestelmiksi*. Tampereen yliopisto, Diplomityö.

- [67] Yle, 2020, *Valtio tuki 5 miljoonalla eurolla urauurtavaa energiayhteisöä Lempäälässä – Nyt hanke on valmis, mutta laki estää asiakkaiden liittämisen*, (1.12.2021), <https://yle.fi/uutiset/3-11440600>.
- [68] Energiavirasto, 2022, *Verkkotoiminnan luvanvaraisuus*, (30.3.2022), <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-luvanvaraisuus>.
- [69] PKS Sähkönsiirto Oy, 2021, *Jakelualueemme Pohjois-Karjalassa ja Itä-Savossa: Yli 22 000 kilometriä sähköverkkoa*, (2.12.2021), <https://www.pks.fi/sahkoverkkopalvelut/toimitusvarmuus/jakelualuekartta/>.
- [70] PKS Sähkönsiirto Oy, 2021, *Liittymismaksut*, (2.12.2021), https://www.pks.fi/wp-content/uploads/2021/06/Liittymismaksut_2021_ver-9.6.2021.pdf.
- [71] PKS Sähkönsiirto Oy, 2021, *Verkkopalveluhinnasto*, (2.12.2021), https://pks.fi/wp-content/uploads/2020/11/Verkkopalveluhinnasto_2021.pdf.
- [72] Fingrid Oy, 2021, *Liitettävyyden*, (2.12.2021), <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/#liitettavyys>.
- [73] Fingrid Oy, 2021, *Kantaverkkoon liittyjän opas*, (2.12.2021), <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkkoon-liittyjan-opas-2021.pdf>.
- [74] PKS Sähkönsiirto Oy, 2021, *Lehmät ja maatalousyrittäjät viihtyvät hyvin Valtimolla – nyt myös sähköverkko on säävarma*, (13.12.2021), <https://www.pks.fi/verkossa/lehmat-ja-maatalousyrittajat-viihtyvat-hyvin-valtimolla/>.
- [75] Mikko Kärnä, 2019, *110 kV Fingridin Kiikanlahden sähköasema on korvannut Puhoksen sähköaseman joka puolestaan on jäänyt Pohjois-Karjalan Sähkölle*, (13.12.2021), <https://calm.iki.fi/tolpat/kuva/11651>.
- [76] Keski-Karjalan kehitysyritys Oy KETI, 2021, *Infra kunnossa*, (13.12.2021), <https://www.kiteenpuhos.fi/infra>.
- [77] Fingrid Oy, 2015, *Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2015-2025*, (13.12.2021), https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon_kehittamissuunnitelma-2015---2025.pdf.
- [78] Keski-Karjalan kehitysyritys Oy KETI, 2012, *Kiinteistö Oy Puhoksen Lastu, Tietoja kiinteistöstä*, (13.12.2021), <https://keti.toimitilapalvelut.fi/API/Premises/keti/51/Attachment/52C874293E6723FB0D1DEDF5F9BAC3E0FE4E853CE13C7C3248AB7FB9A4816768.attachment>.
- [79] Fingrid Oy, *Fingrid karttapalvelu*, (27.11.2021), <https://fingrid.navici.com/platform/?tab=feedback>.

- [80] NOAA – The National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022, *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*, (24.1.2022), <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.
- [81] Verdict Magazine, 2018, *It's not the first time there's been a severe CO2 shortage: 2018 revisited*, (25.1.2022), <https://www.verdict.co.uk/how-is-co2-produced-commercially-shortage/>.
- [82] Poudel M. and Dunn B., 2017, *Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation*, (25.1.2022), <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/print-publications/hla/greenhouse-carbon-dioxide-supplementation-hla-6723.pdf>.
- [83] VTT – Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2018, *Challenges and opportunities of biofuel production in Finland*, (12.4.2022), https://www.comsynproject.eu/app/uploads/2018/06/Kurkela_Challenges-and-opportunities-of-biofuel-production-in-Finland.pdf.
- [84] Enerkem Oy, 2022, *Etusivu*, (12.4.2022) <https://enerkem.com/>.
- [85] Carbon Recycling International, 2022, *Etusivu*, (12.4.2022), <https://www.carbonrecycling.is/>.
- [86] Fortum, 2022, *Fortum's and Perstorp's project for sustainable methanol receives EUR 30 million from the Swedish Energy Agency*, (12.4.2022), <https://www.fortum.com/media/2021/06/fortums-and-perstorps-project-sustainable-methanol-receives-eur-30-million-swedish-energy-agency>.
- [87] Haldor Topsoe, 2022, *High plant availability conversion, carbon and energy efficiency High-efficiency methanol process technologies*, (12.4.2022), <https://www.topsoe.com/processes/methanol>.
- [88] VTT – Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2009, *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)*, (20.2.2022), <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2503.pdf>.
- [89] Pohjois-Karjalan ympäristökeskus, 2007, *Puhoksen formaliinilaitosta, liimatehdasta, lämpökeskusta ja kemikaalien laajamittaista varastointia koskeva ympäristönsuojelulain 28 §:n 1 momentin mukainen lupa*, (29.11.2021), <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BF7189-FFF4-4823-A087-58B1449915CE%7D/81242>.
- [90] Motiva – Valtion kestävän kehityksen yhtiö, 2022, *Aurinkojärjestelmän teho*, (20.2.2022), https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho.

- [91] FinSolar Aurinkoenergiatietoa, 2022, *Aurinkosähkön hinnat ja kannattavuus*, (20.2.2022), https://finsolar.net/kannattavuus/aurinkosahkon-hinnat-ja-kannattavuus/#Aurinkosahkon_hintatasot.
- [92] Sun Energia, 2021, *Kattokohtainen aurinkosähkön tuotanto- ja kannattavuuslaskuri*, (1.12.2021), <https://app.sunenergia.com/>.
- [93] Pohjois-Karjalan maakuntaliitto, 2011, *Sisä-Suomen tuulivoimaselvitys & Pohjois-Karjalan potentiaaliset tuulipuistoalueet*, (29.4.2022), <https://www.pohjois-karjala.fi/documents/33565/166117/Sis%C3%A4-Suomen+tuulivoimaselvitys+ja+Pohjois-Karjala.pdf>.
- [94] Ilmatieteen laitos, 2022, *Tuuliatlas*, (29.4.2022), <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliatlas>.
- [95] International Renewable Energy Agency, 2021, *Renewable Power Generation Costs in 2020*, (29.4.2022), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf.
- [96] Pohjois-Karjalan maakuntaliitto, 2022, *Maakuntakaava 2040*, (29.4.2022), <https://www.pohjois-karjala.fi/maakuntakaava-2040>.
- [97] Maanmittauslaitos, 2022, *Karttapaikka*, (29.4.2022), <https://www.maanmittauslaitos.fi/asioi-verkossa/karttapaikka>.
- [98] Vestas Wind Systems A/S, 2022, *EnVentus™ Platform*, (29.4.2022), <https://www.vestas.com/en/products/enventus-platform/enventus-platform>.
- [99] Air Liquide Engineering & Construction, 2022, *Lurgi Rectisol -prosessi*, (30.3.2022), https://www.engineering-airliquide.com/sites/activity_eandc/files/2017/11/22/air-liquide-e-c-lurgi-rectisol-technology-2017.pdf.

Liite A: Laitosvaihtoehtojen kustannusarviot

Metanoli

KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %		Projekti Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.	PtL laitos ESV 1.12.2022
Asiakas:	Kiteen teollisuusalue		
Selitys:	P2X, 20 000 t/a metanoli		
TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO	
A	Maarakennustyöt	11 850 000	
I	Rakennukset	1 619 000	
H	Putkisto	8 000 000	
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	6 515 968	
P	Laitteet	39 400 956	
R	Käyttöönotto	2 587 462	
S	Yhteiskustannukset	6 000 500	
SM	Maanhankinta	5 000 100	
W	Engineering + työmaavalvonta	3 026 871	
	Yhteensä, ilman varauksia	84 000 857	
Z	Yleisvaraus	4 540 307	
	Avustus	0	
	Kustannusarvio (alv=0 %)	88 541 000	
	Arvonlisävero 23 %	20 364 400	
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	108 905 400	

KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %		Projekti Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.	PtL laitos ESV 1.12.2022
Asiakas: Kiteen teollisuusalue Selitys: P2X, 100 000 t/a metanoli			
TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO	
A	Maarakennustyöt	14 850 000	
I	Rakennukset	1 619 000	
H	Putkisto	10 400 000	
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	14 320 383	
P	Laitteet	131 546 587	
R	Käyttöönotto	6 901 106	
S	Yhteiskustannukset	6 000 500	
SM	Maanhankinta	5 000 100	
W	Engineering + työmaavalvonta	11 254 160	
	Yhteensä, ilman varauksia	201 891 835	
Z	Yleisvaraus	16 881 239	
	Avustus	0	
	Kustannusarvio (alv=0 %)	218 773 000	
	Arvonlisävero 23 %	50 317 800	
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	269 090 800	

TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO
<p style="text-align: center;">KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %</p> <p>Asiakas: Kiteen teollisuusalue Selitys: P2X, 200 000 t/a metanoli,</p>		
		Projekt Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.
		PtL laitos ESV 1.12.2022
A	Maarakennustyöt	17 850 000
I	Rakennukset	1 619 000
H	Putkisto	12 800 000
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	22 763 401
P	Laitteet	215 260 869
R	Käyttöönotto	10 838 351
S	Yhteiskustannukset	6 000 500
SM	Maanhankinta	5 000 100
W	Engineering + työmaavalvonta	18 728 649
	Yhteensä, ilman varauksia	310 860 870
Z	Yleisvaraus	28 092 973
	Avustus	0
	Kustannusarvio (alv=0 %)	338 954 000
	Arvonlisävero 23 %	77 959 400
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	416 913 400

Vety

TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO
<p style="text-align: center;">KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %</p> <p>Asiakas: Kiteen teollisuusalue Selitys: P2X Vety 3 800 t/a</p>		
	Projekti Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.	PtL laitos ESV 1.12.2022
A	Maarakennustyöt	11 850 000
I	Rakennukset	1 619 000
H	Putkisto	8 400 000
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	6 487 711
P	Laitteet	16 705 376
R	Käyttöönotto	1 574 267
S	Yhteiskustannukset	1 000 500
SM	Maanhankinta	1 000 100
W	Engineering + työmaavalvonta	1 000 480
	Yhteensä, ilman varauksia	49 637 434
Z	Yleisvaraus	1 500 720
	Avustus	0
	Kustannusarvio (alv=0 %)	51 138 000
	Arvonlisävero 23 %	11 761 700
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	62 899 700

TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO
<p style="text-align: center;">KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %</p> <p>Asiakas: Kiteen teollisuusalue Selitys: P2X Vety 38 000 t/a</p>		
	<p>Projekt Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.</p>	<p>PtL laitos ESV 1.12.2022</p>
A	Maarakennustyöt	19 150 000
I	Rakennukset	2 919 000
H	Putkisto	14 100 000
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	23 780 833
P	Laitteet	118 853 760
R	Käyttöönotto	7 776 427
S	Yhteiskustannukset	7 300 500
SM	Maanhankinta	6 300 100
W	Engineering + työmaavalvonta	11 304 800
	Yhteensä, ilman varauksia	211 485 420
Z	Yleisvaraus	16 307 200
	Avustus	0
	Kustannusarvio (alv=0 %)	227 793 000
	Arvonlisävero 23 %	49 402 400
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	277 195 400

Synteettinen maakaasu (Metaani)

KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %		Projekti Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.	PtL laitos ESV 1.12.2022
Asiakas:	Kiteen teollisuusalue		
Selitys:	P2X Metaani 7 500 t/a		
TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO	
A	Maarakennustyöt	11 850 000	
I	Rakennukset	1 619 000	
H	Putkisto	8 000 000	
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	6 510 317	
P	Laitteet	39 418 976	
R	Käyttöönotto	2 588 267	
S	Yhteiskustannukset	1 000 500	
SM	Maanhankinta	1 000 100	
W	Engineering + työmaavalvonta	3 028 480	
	Yhteensä, ilman varauksia	75 015 639	
Z	Yleisvaraus	4 542 720	
	Avustus	0	
	Kustannusarvio (alv=0 %)	79 558 000	
	Arvonlisävero 23 %	18 298 300	
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	97 856 300	

TUNNUS	SELITYS	YHTEENSÄ EURO
KUSTANNUSARVIO Kannattavuusvertailua varten Tarkkuus ±50 %		Projekti Proj.pääll. Laatija Pvm. Rev.0 Tark./Hyv.
Asiakas: Kiteen teollisuusalue Selitys: P2X Metaani 75 000 t/a		PtL laitos ESV 1.12.2022
A	Maarakennustyöt	17 850 000
I	Rakennukset	1 619 000
H	Putkisto	12 800 000
K+N	Instrumentointi ja sähköistys	35 206 888
P	Laitteet	217 140 618
R	Käyttöönotto	11 422 268
S	Yhteiskustannukset	6 000 500
SM	Maanhankinta	5 000 100
W	Engineering + työmaavalvonta	18 896 484
	Yhteensä, ilman varauksia	325 935 858
Z	Yleisvaraus	28 344 726
	Avustus	0
	Kustannusarvio (alv=0 %)	354 281 000
	Arvonlisävero 23 %	81 484 600
	Kustannusarvio (alv = 23 %)	435 765 600

Liite B: Laitosvaihtoehtojen kannattavuuslaskelmat

20 000 t/a metanolia

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	20000 t	800 w, €/t	16,00
Lämpö H1	48600 MWh	20 €/MWh	0,97
Lämpö H2	10700 MWh	30 €/MWh	0,32
Happi	30000 t	80 €/tO ₂	2,40
Päästökauppa	0,00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-88,5 M€	5 korko-%	-7,10
Käyttökustannukset	-88,5 M€	2.2 %	-1,95
Sähkö	-230 000 MWh	40 €/MWh	-9,21
Hiilidioksidi	-27 500 t	30 €/t	-0,83
Vesi	-33 700 t	2 €/t	-0,07
yhteensä			0,54
Tuotantokustannus, määrä	958 €/t		
Tuotantokustannus, energia	173 €/MWh		
Vuosittainen voitto	0,5 M€		

100 000 t/a metanolia

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	100000 t	800 w, €/t	80,00
Lämpö H1	243000 MWh	20 €/MWh	4,86
Lämpö H2	53300 MWh	30 €/MWh	1,60
Happi	150000 t	80 €/tO ₂	12,00
Päästökauppa	0,00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-219 M€	5 korko-%	-17,57
Käyttökustannukset	-219 M€	2.2 %	-4,82
Sähkö	-1 147 000 MWh	40 €/MWh	-45,88
Hiilidioksidi	-137 000 t	30 €/t	-4,11
Vesi	-169 000 t	2 €/t	-0,34
yhteensä			25,74
Tuotantokustannus, määrä	727 €/t		
Tuotantokustannus, energia	132 €/MWh		
Vuosittainen voitto	25,7 M€		

200 000 t/a metanolia

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	200000 t	800 w, €/t	160,00
Lämpö H1	486000 MWh	20 €/MWh	9,72
Lämpö H2	107000 MWh	30 €/MWh	3,21
Happi	300000 t	80 €/tO ₂	24,00
Päästökauppa	0,00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-339 M€	5 korko-%	-27,20
Käyttökustannukset	-339 M€	2.2 %	-7,46
Sähkö	-2 293 000 MWh	40 €/MWh	-91,72
Hiilidioksidi	-275 000 t	30 €/t	-8,25
Vesi	-337 000 t	2 €/t	-0,67
yhteensä			61,63
Tuotantokustannus, määrä	677 €/t		
Tuotantokustannus, energia	122 €/MWh		
Vuosittainen voitto	61,6 M€		

20 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, kaasutuksen tuotekaasun reformointi hapella

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	20000 t	800 w, €/t	16,00
Lämpö H1	37200 MWh	20 €/MWh	0,74
Lämpö H2	18900 MWh	30 €/MWh	0,57
Happi	10100 t	80 €/tO ₂	0,81
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0
Investointi	-53,9 M€	5 korko-%	-4,32
Kiinteät Käyttökustannukset	-53,9 M€	2,2 %	-1,2
Biomassa	86 700 MWh	20 €/MWh	-1,7
Biokaasu	0	45 €/MWh	0,0
Sähkö	128 000 MWh	40 €/MWh	-5,11
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	0
Vesi	16 200 t	2 €/t	-0,03
yhteensä			5,73
Tuotantokustannus, määrä	514 €/t		
Tuotantokustannus, energia	93 €/MWh		
Vuosittainen voitto	5,7 M€		

20 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, sähkölämmitteinen reformointi

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	20000 t	800 w, €/t	16
Lämpö H1	25900 MWh	20 €/MWh	0,52
Lämpö H2	26900 MWh	30 €/MWh	0,81
Happi	9700 t	80 €/tO ₂	0,78
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0
Investointi	-48,9 M€	5 korko-%	-3,92
Kiinteät Käyttökustannukset	-53,9 M€	2,2 %	-1,2
Biomassa	86100 MWh	20 €/MWh	-1,7
Biokaasu	0	45 €/MWh	0,0
Sähkö	115 200 MWh	40 €/MWh	-4,61
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	0
Vesi	16100 t	2 €/t	-0,03
yhteensä			6,74
Tuotantokustannus, määrä	463 €/t		
Tuotantokustannus, energia	84 €/MWh		
Vuosittainen voitto	6,7 M€		

20 000 t/a metanolia, biokaasun lisäys ja sähköreformointi

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	20000 t	800 w, €/t	16
Lämpö H1	26800 MWh	20 €/MWh	0,54
Lämpö H2	20500 MWh	30 €/MWh	0,61
Happi	9200 t	80 €/tO ₂	0,74
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0
Investointi	-46,6 M€	5 korko-%	-3,74
Kiinteät Käyttökustannukset	-53,9 M€	2,2 %	-1,0
Biomassa	79300 MWh	20 €/MWh	-1,6
Biokaasu	13400 MWh	45 €/MWh	-0,6
Sähkö	111000 MWh	40 €/MWh	-4,44
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	0
Vesi	14800 t	2 €/t	-0,03
yhTEENSÄ			6,47
Tuotantokustannus, määrä	477 €/t		
Tuotantokustannus, energia	86 €/MWh		
Vuosittainen voitto	6,5 M€		

100 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, kaasutuksen tuotekaasun reformointi hapella

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	100000 t	800 w, €/t	80,00
Lämpö H1	186000 MWh	20 €/MWh	3,72
Lämpö H2	94500 MWh	30 €/MWh	2,83
Happi	50400 t	80 €/tO ₂	4,03
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	204 M€	5 korko-%	-16,40
Kiinteät Käyttökustannukset	204 M€	2,2 %	-4,50
Biomassa	433 000 MWh	20 €/MWh	-8,67
Biokaasu	0 MWh	45 €/MWh	0,00
Sähkö	639 000 MWh	40 €/MWh	-25,57
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	0,00
Vesi	80 800 t	2 €/t	-0,16
yhteensä			35,3
Tuotantokustannus, määrä	447 €/t		
Tuotantokustannus, energia	81 €/MWh		
Vuosittainen voitto	35,3 M€		

100 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, sähkölämmitteinen reformointi

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	100000 t	800 w, €/t	80,00
Lämpö H1	129600 MWh	20 €/MWh	3,89
Lämpö H2	134700 MWh	30 €/MWh	4,04
Happi	48500 t	80 €/tO ₂	3,88
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	180 M€	5 korko-%	-14,41
Kiinteät Käyttökustannukset	204 M€	2,2 %	-3,95
Biomassa	430700 MWh	20 €/MWh	-8,61
Biokaasu	0 MWh	45 €/MWh	0,00
Sähkö	575900 MWh	40 €/MWh	-23,04
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	0,00
Vesi	80300 t	2 €/t	-0,16
yhteensä			41,64
Tuotantokustannus, määrä	384 €/t		
Tuotantokustannus, energia	69 €/MWh		
Vuosittainen voitto	41,6 M€		

100 000 t/a metanolia, biokaasun lisäys ja sähköreformointi

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	100000 t	800 w, €/t	80,00
Lämpö H1	134100 MWh	20 €/MWh	2,68
Lämpö H2	102400 MWh	30 €/MWh	3,07
Happi	46150 t	80 €/tO ₂	3,69
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	171 M€	5 korko-%	-13,69
Kiinteät Käyttökustannukset	171 M€	2,2 %	-4,50
Biomassa	396500 MWh	20 €/MWh	-7,93
Biokaasu	67100 MWh	45 €/MWh	-3,02
Sähkö	555200 MWh	40 €/MWh	-22,21
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	0,00
Vesi	74000 t	2 €/t	-0,15
yhTEENSÄ			38,7
Tuotantokustannus, määrä	413 €/t		
Tuotantokustannus, energia	75 €/MWh		
Vuosittainen voitto	38,7 M€		

200 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, kaasutuksen tuotekaasun reformointi hapella

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	200000 t	800 w, €/t	160,00
Lämpö H1	372000 MWh	20 €/MWh	7,43
Lämpö H2	189000 MWh	30 €/MWh	5,67
Happi	101000 t	80 €/tO ₂	8,07
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	371 M€	5 korko-%	-29,76
Kiinteät Käyttökustannukset	371 M€	2,2 %	-8,16
Biomassa	867 000 MWh	20 €/MWh	-17,34
Biokaasu	0 MWh	45 €/MWh	0,00
Sähkö	1 279 000 MWh	40 €/MWh	-51,15
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	-0,83
Vesi	80 800 t	2 €/t	0,16
yhteensä			74,1
Tuotantokustannus, määrä	430 €/t		
Tuotantokustannus, energia	78 €/MWh		
Vuosittainen voitto	74,1 M€		

200 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, sähkölämmitteinen reformointi

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	200000 t	800 w, €/t	160,00
Lämpö H1	259100 MWh	20 €/MWh	5,18
Lämpö H2	269500 MWh	30 €/MWh	8,08
Happi	97000 t	80 €/tO ₂	7,76
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	321 M€	5 korko-%	-25,78
Kiinteät Käyttökustannukset	371 M€	321 %	-7,07
Biomassa	861400 MWh	20 €/MWh	-17,23
Biokaasu	0 MWh	45 €/MWh	0,00
Sähkö	1151800 MWh	40 €/MWh	-46,07
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	-0,83
Vesi	80300 t	2 €/t	-0,16
yhteensä			83,9
Tuotantokustannus, määrä	381 €/t		
Tuotantokustannus, energia	69 €/MWh		
Vuosittainen voitto	83,9 M€		

200 000 t/a metanolia, vety rikastettu biomassa kaasutusprosessi, biokaasun lisäys ja sähköreformointi

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metanoli	200000 t	800 w, €/t	160,00
Lämpö H1	268300 MWh	20 €/MWh	5,37
Lämpö H2	204700 MWh	30 €/MWh	6,14
Happi	92300 92299	80 €/tO ₂	7,38
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	305 M€	5 korko-%	-24,48
Kiinteät Käyttökustannukset	371 M€	305 %	-6,71
Biomassa	793000 MWh	20 €/MWh	-15,86
Biokaasu	134300 MWh	45 €/MWh	-6,04
Sähkö	1110500 MWh	40 €/MWh	-44,42
Hiilidioksidi	0 t	0 €/t	-0,83
Vesi	74000 t	2 €/t	0,15
yhteensä			80,7
Tuotantokustannus, määrä	397 €/t		
Tuotantokustannus, energia	72 €/MWh		
Vuosittainen voitto	80,7 M€		

3 800 t/a vetyä

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Vety	3800 t	600 w, €/t	2,28
Lämpö H1	48600 MWh	20 €/MWh	0,97
Lämpö H2	0 MWh	30 €/MWh	0,00
Happi	30000 t	80 €/tO ₂	2,40
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-51.1 M€	5 korko-%	-4,10
Käyttökustannukset	-51.1 M€	2.2 %	-1,02
Sähkö	-220 000 MWh	40 €/MWh	-8,80
Hiilidioksidi	0 t	30 €/t	0,00
Vesi	-33 700 t	2 €/t	-0,07
yhhteensä			-8,34
Tuotantokustannus, määrä	3683 €/t		
Tuotantokustannus, energia	111 €/MWh		
Vuosittainen voitto	-8,3 M€		

38 000 t/a vetyä

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Vety	38000 t	600 w, €/t	22,80
Lämpö H1	486000 MWh	20 €/MWh	9,72
Lämpö H2	0 MWh	30 €/MWh	0,00
Happi	300000 t	80 €/tO ₂	24,00
Päästökauppa	0.00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-228 M€	5 korko-%	-18,30
Käyttökustannukset	-228 M€	2.2 %	-4,56
Sähkö	-2 191 000 MWh	40 €/MWh	-87,64
Hiilidioksidi	0 t	30 €/t	0,00
Vesi	-337 000 t	2 €/t	-0,67
yhteensä			-54,65
Tuotantokustannus, määrä	2926 €/t		
Tuotantokustannus, energia	88 €/MWh		
Vuosittainen voitto	-54,6 M€		

7 500 t/a metaania

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metaani	7500 t	600 w, €/t	4,50
Lämpö H1	48600 MWh	20 €/MWh	0,97
Lämpö H2	25900 MWh	30 €/MWh	0,78
Happi	30000 t	80 €/tO ₂	2,40
Päästökauppa	0,00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-79,6 M€	5 korko-%	-6,39
Käyttökustannukset	-79,6 M€	2.2 %	-1,59
Sähkö	-230 000 MWh	40 €/MWh	-9,22
Hiilidioksidi	-20 600 t	30 €/t	-0,62
Vesi	-33 700 t	2 €/t	-0,07
yhteensä			-9,23
Tuotantokustannus, määrä	2384 €/t		
Tuotantokustannus, energia	171 €/MWh		
Vuosittainen voitto	-9,2 M€		

75 000 t/a metaania

	Laskentaperuste	Yksikköhinta	Erä [M€]
Metaani	75000 t	600 w, €/t	45,00
Lämpö H1	486000 MWh	20 €/MWh	9,72
Lämpö H2	259000 MWh	30 €/MWh	7,77
Happi	300000 t	80 €/tO ₂	24,00
Päästökauppa	0,00 t	0 €/tCO ₂	0,00
Investointi	-354 M€	5 korko-%	-28,41
Käyttökustannukset	-354 M€	2.2 %	-7,08
Sähkö	-2 293 000 MWh	40 €/MWh	-91,72
Hiilidioksidi	-206 000 t	30 €/t	-6,18
Vesi	-337 000 t	2 €/t	-0,67
yhteensä			-47,57
Tuotantokustannus, määrä	1787 €/t		
Tuotantokustannus, energia	128 €/MWh		
Vuosittainen voitto	47,6 M€		

Liite C: Vetyelektrolyysin tase

Sisään

vesi	H ₂ O	water	
2,98E+2	2,50E+1		
1,01E+5	1,01E+2	1,01E-1	1,01E+0
5,53E+4	9,97E+2	9,97E-1	
-2,86E+5	-1,59E+7	-1,59E+4	
6,99E+1			
1,80E-2			
1,81E-5	1,00E-3	1,00E+0	
7,53E+1	4,18E+0		
2,24E+0	4,04E-2	1,45E+2	1,46E-1
4,05E-5	1,46E-1	4,05E-2	
-6,40E+5	-6,40E+2	-6,40E-1	
-2,86E+5			
7,00E+1			

Ulos

happi	O ₂	oxygen	
3,53E+2	8,00E+1		
1,01E+5	1,01E+2	1,01E-1	1,01E+0
3,45E+1	1,10E+0	1,10E-3	
1,63E+3	5,08E+4	5,08E+1	
2,10E+2			
3,20E-2			
2,90E-2	9,05E-1	9,05E+2	
2,98E+1	9,30E-1		
1,12E+0	3,58E-2	1,29E+2	1,17E+2
3,24E-2	1,17E+2	3,24E+1	
1,82E+3	1,82E+0	1,82E-3	
0,00E+0			
2,05E+2			

Ulos

vety	H ₂	hydrogen	
3,53E+2	8,00E+1		
1,01E+5	1,01E+2	1,01E-1	1,01E+0
3,45E+1	6,95E-2	6,95E-5	
1,59E+3	7,91E+5	7,91E+2	
1,35E+2			
2,02E-3			
2,90E-2	1,44E+1	1,44E+4	
2,91E+1	1,44E+1		
2,24E+0	4,52E-3	1,63E+1	2,00E+2
6,49E-2	2,34E+2	6,49E+1	
3,57E+3	3,57E+0	3,57E-3	
0,00E+0			
1,31E+2			

Ominaisuus

	yksiköt			
Lämpötila	[K]	[°C]		
Paine	[Pa]	[kPa]	[MPa]	[bar]
Tiheys	[mol/m ³]	[kg/m ³]	[kg/l]	
Ominaisentalpia	[J/mol]	[J/kg]	[kJ/kg]	
Ominaisentropia	[J/(mol K)]			
Moolipaino	[kg/mol]			
Ominaisilavuus	[m ³ /mol]	[m ³ /kg]	[l/kg]	
Ominaislämpökapasiteetti	[J/(mol K)]	[kJ/(kg K)]		

Virtausmäärä

Ainevirta	[mol/s]	[kg/s]	[kg/h]	[m ³ (n)/h]
Tilavuusvirta	[m ³ /s]	[m ³ /h]	[l/s]	
Energiavirta	[W]	[kW]	[MW]	

Referenssitilan arvot

Referenssententalpia	[J/mol]
Referenssentropia	[J/(mol K)]

**Referenssipaine ja -
lämpötila**

T	[°C]	[K]	2,50E+1	2,98E+2
p	[Pa]	[bar]	1,00E+5	1,00E+0

**Prosessin paine ja
lämpötila**

T	[°C]	[K]	8,00E+1	3,53E+2
p	[Pa]	[bar]	1,01E+5	1,01E+0

Hyötysuhde	[%]	70
------------	-----	----

Sähköenergian tarve	9,22E-01	4,61E+00	[MW]	[kWh/m ³ (n)]
Poistuu hukkalämpönä	2,77E-01	2,77E+02	[MW]	[kW]
Vedyn sidosenergiaksi	6,46E-01	6,46E+02	[MW]	[kW]

ISBN 978-952-335-828-7 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2022

...the most crucial elements, which have been identified in the framework of the TCE and the...

The Multi...

...the most crucial elements...

 LUT
University