



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Miikka Kulmala ja Tommi Erkkilä

# WESTENERGYN JÄTE-ENERGIALAITOKSEN LAUHDEVEDEN HYÖTYKÄYTTÖ

Tekniikka  
2023

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Miikka Kulmala, Tommi Erkkilä
Opinnäytetyön nimi	Westenergyn jäte-energialaitoksen lauhdeveden hyötykäyttö
Vuosi	2023
Kieli	Suomi
Sivumäärä	80 + 3 liitettä
Ohjaaja	Petri Saari

---

Westenergy Oy Ab:n jäte-energialaitoksella on tarkoitus aloittaa synteettisen metaanin tuotanto vuonna 2025. Hanke on osa EnergySampo-ekosysteemiyhteistyön seuraavaa vaihetta matkalla kohti ilmastopositiivisempaa jäte-energiaa sekä uusia edistysaskeleita.

EnergySampo CCU -hankkeen tarkoituksena on rakennuttaa Westenergyn jäte-energialaitoksen yhteyteen synteettisen metaanin tuotantolaitos. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Westenergyn laitoksen lauhdeveden hyödyntämismahdollisuutta, sillä tällä hetkellä lauhdevedet johdetaan viemäriin. Opinnäytetyössä tutkittiin suunnitteilla olevan laitoksen erilaisia vaatimuksia, kuten veden säilytyksen tarvetta, kapasiteettia sekä laatua ja sitä miten edellä mainitut kohtaavat lauhdetta hyödynnettäessä.

Opinnäytetyön toisessa osuudessa tutkittiin ja kartoitettiin synteettisen metaanin valmistukseen käytössä olevia tekniikoita, sekä tulevaisuuden tekniikoita. Teoria perustuu asiaa koskeviin artikkeleihin, kirjoihin sekä nettilähteisiin. Teorian pohjalta muodostettiin tulkinta käytettävästä laitteistosta ja niiden ominaisuuksista sekä vaatimuksista.

Kootun teorian sekä laitteiston perustietojen pohjalta laskettiin ja pyrittiin havainnollistamaan lopputulokseen vaikuttavia erilaisia tekijöitä ja tilanteita.

Lopuksi käytiin läpi saadut tulokset, työhön vaikuttaneet rajoittavat tekijät sekä opinnäytetyötä tehdessä heränneet jatkokysymykset. Saatujen tulosten pohjalta projektille löydettiin mahdollinen ratkaisu, erilaisia viitearvoja ja se todettiin taloudellisesti kannattavaksi toteuttaa.

---

Avainsanat                      jäte-energialaitos, lauhdevesi, elektrolyysi, synteettinen metaani

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Energiatekniikka

## Abstract

Author	Miikka Kulmala, Tommi Erkkilä
Title	Utilization of Westenergy's Condensate Water in the Electrolysis
Year	2023
Language	Finnish
Pages	80 + 3 Appendices
Name of Supervisor	Petri Saari

---

Westenergy Oy Ab plans to start synthetic methane production at their waste-to-energy plant of Westenergy Oy Ab in 2025. The project is part of the next phase of the EnergySampo ecosystem cooperation on the way to a more climate-positive waste-to-energy scheme.

The purpose of the EnergySampo CCU-project is to build a synthetic methane production plant in connection with Westenergy's waste-to-energy plant. The thesis aims to find out the possibility of utilizing the condensate produced at Westenergy plant, as the condensate is currently discharged into the sewer. The thesis investigated the various requirements of the planned plant, such as the need for water storage, capacity, and quality, and how the above-mentioned meet when using the condensate.

In the second part of the thesis, the technologies used to produce synthetic methane were investigated, as well as future technologies. The theory is based on relevant articles, books, and online sources. Based on the theory, an interpretation of the equipment used, and their characteristics and requirements were formed.

The various factors and situations affecting the result were calculated and illustrated based on the compiled theory and equipment information.

The results, limiting factors and the follow-up questions were reviewed. Based on the obtained results, a possible solution was found for the project with some reference values, and it was found to be financially viable to implement.

---

Keywords Waste-to-energy plant, condensation water, electrolysis and synthetic methane

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	12
2	YHTEISTYÖKUMPPANIT .....	14
	2.1 Westenergy Oy Ab .....	14
	2.2 EnergySampo .....	14
	2.2.1 EnergySampo-CCU hanke.....	15
3	JÄTTEENPOLTTO JA JÄTE-ENERGIALAITOKSEN PÄÄPROSESSIT.....	17
	3.1 Arinapoltto .....	17
	3.2 Savukaasun pesu.....	18
	3.3 Kaukolämpöverkko .....	20
4	SYNTEETTISEN METAANIN TUOTANNON PÄÄPROSESSIT .....	21
	4.1 Hiilidioksidin talteenotto .....	21
	4.1.1 Hiilidioksidin talteenotto tekniikat.....	21
	4.1.2 Membraanisuodatus .....	22
	4.1.3 Adsorptio kiinteillä aineilla.....	23
	4.1.4 Absorptio.....	23
	4.1.5 Karbonaattien käyttö .....	24
	4.2 Vedynvalmistus .....	24
	4.2.1 Elektrolyysi ja siihen käytetyt tekniikat.....	26
5	KIINTEÄOKSIDI ELEKTROLYYSI .....	31
	5.1 Synteettisen metaanin valmistus.....	32
	5.1.1 Kemiallinen metanointi.....	33
	5.1.2 Biologinen metanointi.....	33
	5.1.3 Metaanin valmistukseen käytetyt reaktoryypit.....	35

5.2	Synteettisen metaanin nesteytys .....	36
6	KÄYTETTÄVÄ TEKNIikka .....	38
6.1	Hiilidioksidin talteenotto .....	38
6.1.1	Absorptio.....	38
6.2	Vedyntuotantolaitos .....	38
6.2.1	Tulkinta.....	40
6.3	Metanointilaitos.....	41
6.4	Metaanin nesteytyslaitos.....	42
7	LAITTEISTON KOKONAISPROSESSI.....	43
8	LAITTEISTON MAHDOLLINEN TOIMITTAJA.....	45
8.1	Hiilidioksidin talteenotto .....	45
8.2	Elektrolyyseri.....	45
8.3	Metanointilaitos.....	45
8.4	Metaanin nesteytyslaitos.....	46
9	PROSESSISSA KÄYTETTÄVIEN VESIEN LAATUVAATIMUKSET JA KÄSITTELY....	47
9.1	Veden kulutus sekä hyödyntäminen.....	47
9.1.1	Perustuotannon vedenkulutukset korotetun tehon vaiheessa ..	48
9.1.2	Elektrolyyserin veden käyttö.....	49
9.1.3	Metanoinnin vedenkulutus ja kerääntyvä vesivirta.....	50
9.1.4	Hiilidioksidin talteenotosta kerääntyvä vesivirta.....	50
9.1.5	Pesurilta kerääntyvä vesivirta .....	50
9.1.6	Vedenkulutuksen vesitaseita erilaisissa skenaarioissa korotetun tehon vaiheessa .....	52
9.2	Perustuotannon pilottivaiheen arvot .....	55
9.2.1	Vedenkulutuksen vesitaseita erilaisissa skenaarioissa pilottivaiheessa .....	56
10	SÄILYTYS.....	59
10.1	Savukaasupesurin lauhdeveden vaikutus säiliön mitoitukseen .....	60
10.1.1	Pidempiaikainen kertymä pilottivaiheessa .....	61

10.1.2	Hetkellinen kertymä.....	62
10.2	Säiliöiden mitoitus .....	63
10.2.1	Säiliön mitoitus perustuotannolle.....	63
10.2.2	Säiliö mitoitettuna perustuotannolle sekä pesurin vaatima puskuri.....	64
11	KANNATTAVUUSLASKELMAT.....	65
11.1	Kokonaiskustannukset .....	65
11.1.1	Säiliön kustannukset .....	65
11.1.2	Pumpun kustannukset .....	67
11.1.3	Suunnittelun kustannukset .....	68
11.1.4	Vesilinjan rakentamisen kustannukset .....	68
11.2	Savukaasupesurin veden hyödyntämisestä kertynyt tuotto .....	69
11.3	Kannattavuuden indikaattorit.....	69
11.3.1	Sijoitetun pääoman tuotto prosentti koko sijoitusajalta .....	69
11.3.2	Vuositasolla laskettu tuotto prosentti (ARR) .....	70
11.3.3	Takaisinmaksuaika .....	71
12	TULOKSET .....	72
13	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	74
	LÄHTEET .....	75
	LIITTEET .....	80

## KUVA JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> EnergySampo CCU -hankkeen power-to-gas arvoketju.....	16
<b>Kuva 2.</b> Arinakattilan läpileikkaus.....	18
<b>Kuva 3.</b> Westenergy Oy:n savukaasupesurin prosessikaavio.....	20
<b>Kuva 4.</b> Alkalikennon toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.....	27
<b>Kuva 5.</b> Protoninvaihtomembraani elektrolyysin toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.....	29
<b>Kuva 6.</b> Anioninvaihtomembraani toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio. .....	30
<b>Kuva 7.</b> Kiinteäoksidikennon toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.....	31
<b>Kuva 8.</b> Biologinen metanointi in-situ.....	35
<b>Kuva 9.</b> Biologinen metanointi Ex-situ.....	35
<b>Kuva 10.</b> Synteettisen metaanin tuotantoon käytettävät reaktorityypit (mukailtu). .....	36
<b>Kuva 11.</b> Havainnollistava prosessikaavio.....	43
<b>Kuva 12.</b> Havainnekuva, Lauhteen kuukausikertymät.....	51
<b>Kuva 13.</b> Tilanne 1, Perustuotanto ( <b>KTV</b> ).....	52
<b>Kuva 14.</b> Tilanne 2, Elektrolyyseri pois päältä ja savupesuri korkeimmalla hetkittäisellä teholla ( <b>KTV</b> ).....	53
<b>Kuva 15.</b> Tilanne 3, Savukaasupesurilta ei tule lauhdetta ja elektrolyyseri käytössä maksimikapasiteetillä ( <b>KTV</b> ).....	54
<b>Kuva 16.</b> Tilanne 1, Perustuotanto ( <b>PILOT</b> ).....	56
<b>Kuva 17.</b> Tilanne 2, Elektrolyyseri pois päältä ja pesuri korkeimmalla hetkittäisellä teholla ( <b>PILOT</b> ).....	57
<b>Kuva 18.</b> Tilanne 3, Pesurilta ei tule lauhdetta ja elektrolyyseri maksimikapasiteetillä käytössä ( <b>PILOT</b> ).....	58
<b>Kuva 19.</b> Havainnekuva, lauhteen pidempiaikaiseen kerääntymiseen tarvittavista olosuhteista.....	61

<b>Kuva 20.</b> Havainnekuva lauhteen hetkellisestä tuotosta. ....	62
<b>Kuva 21.</b> Havainnekuva, lauhteen hetkellisen piikin aiheuttamasta veden kerääntymisestä.....	63
<b>Kuva 22.</b> Havainnekuva, vuorokausikulutuksen laskemisen tueksi.....	64
<b>Taulukko 1.</b> Elektrolyysitekniikoiden vertailu (mukailtu). ....	39
<b>Taulukko 2.</b> Perustuotannon arvot, KTV.....	48
<b>Taulukko 3.</b> Synteettisen metaanintuotannon veden kulutus ja käyttö. ....	55
<b>Taulukko 4.</b> Säiliön mitat ja kustannukset. ....	67

## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Lauhdetieto Excel

**LIITE 2.** Säiliötarjous

**LIITE 3.** Wärtsilä, monikylmäainetekniikka

## TERMIT JA LYHENTEET

<b>ADIABAATTINEN</b>	Muutos, jossa kaasun lämpöenergia ei muutu.
<b>ANODI</b>	Positiivinen elektrodi elektrolyysiprosessissa.
<b>ARR</b>	Annualised Rate of Return, Tuottoprosentti vuositasolla.
<b>CCS</b>	Carbon Capture and Storage, Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi.
<b>CCU</b>	Carbon Capture and Utilization, Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö.
<b>DE-IONISOINTI</b>	Ionien poistaminen vedestä.
<b>HIILINEUTRAALI</b>	Hiilidioksidipäästöjä tuotetaan korkeintaan sen verran kuin niitä voidaan sitoa ilmakehästä hiilinieluihin.
<b>INERTTI</b>	Kemiallisesti reaktiokyvytön.
<b>KATODI</b>	Negatiivinen elektrodi elektrolyysiprosessissa.
<b>KONSORTIO</b>	Kahden tai useamman henkilön tai organisaation muodostama yleensä tiettyä tehtävää varten sovittu tilapäinen yhteenliittymä.
<b>KRYOGEENISYYS</b>	Kryogeniikka on materiaalien tuotantoa ja käyttäytymistä erittäin alhaisissa lämpötiloissa.
<b>KTV</b>	Korotetun tehon vaihe.
<b>LAUHDEVESI</b>	Prosessissa kiertävän höyryn tiivistyessä syntynyt vesi.

<b>LSNG</b>	Liquid Synthetic Natural Gas, Nesteytetty synteettinen metaani.
<b>METANOGEENISYYS</b>	Tuottaa metaania energia-aineenvaihdunnan sivutuotteena.
<b>PILOT</b>	Projektin ensimmäinen pienimuotoinen toteutus, jolla todistetaan projekti-idean kannattavuus.
<b>PEITTAUS</b>	Ruostumattoman teräksen pintakäsittely tyypellä tai fluori- vetyhapoilla.
<b>PEM</b>	Proton Exchange Membrane, Protoninvaihtomembraanielektrolyysi.
<b>PROSESSI-ILMA</b>	Happikaasu ilman epäpuhtauksia.
<b>PYROLYYSI</b>	Reaktio, jossa kuumentamalla hajotetaan kiinteää orgaanista ainetta ilman happea.
<b>PTG</b>	Power-To-Gas, sähköenergian muuttaminen kaasuenergiaksi.
<b>REJEKTIVESI</b>	Vesi, joka ei täytä sovellettavia talteen otetun veden standardeja vedenkäsittelyn jälkeen.
<b>ROI</b>	Return On Investment, Sijoitetun pääoman tuotto.
<b>SELEKTIIVISYYS</b>	Kemiallisessa reaktiossa tietyn tuotteen muodostumisen suosimista.
<b>SNG</b>	Synthetic Natural Gas, Synteettinen maakaasu.
<b>VIHREÄ VETY</b>	Vetyä, joka on tuotettu uusiutuvalla energialla.

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Westenergy Oy Ab. Westenergy Oy Ab on osa Vaasan Seudun energiaklusterin EnergySampo-ekosysteemiyhteistyötä, tämän yhteisön tavoitteena on ilmastopositiivisempi jäte-energia sekä uudet sektorikyt-kennät.

EnergySammon uusimman hankkeen nimi on EnergySampo CCU ja siitä vastaa Westenergy Oy Ab, hankkeen tavoitteena on käynnistää synteettisen metaanin tuotanto Westenergyn jäte-energialaitoksen alueella vuonna 2025. EnergySampo CCU-hanke tukee suomen irtaumista fossiilisista polttoaineista, joka on erittäin ajankohtaista sekä edistää Suomen matkaa kohti hiilineutraaliutta. CCU on lyhenne sanoista carbon capture and utilization, sillä tarkoitetaan hiilidioksidin talteenottoa ja hyötykäyttöä. Laitos tulee koostumaan neljästä pääprosessista, jotka ovat hiilidioksidin talteenotto, vedyn tuotanto, metaanin valmistus sekä metaanin nesteytys.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Westenergyn jäte-energialaitoksen lauhdeveden hyödyntämismahdollisuuksia osana vedyn tuotantoa. Osa vedyntuotannon vaatimasta veden tarpeesta olisi katettavissa Westenergyn savukaasupesurin lauhdevettä kierrättämällä. Mahdollista hyötykäyttöä ja veden varastointia varten selvitetään lauhteen määrä, laatu sekä sen yhteensopivuus synteettisen metaanin tuotantolaitoksen kanssa. Synteettisen metaanin tuotantolaitoksen vaatimukset

määräytyvät prosessissa käytettävän tekniikan perusteella. Edellä mainittuja tietoja ja vaatimuksia käytetään esittämään veden hyötykäytön vaikutuksia varastointiin ja sen kannattavuuteen.<sup>1 2</sup>

---

<sup>1</sup> Westenergy Oy Ab. 2022. Nettisivut.

<sup>2</sup> Ramboll Oy. 2022. YVA-ohjelma.

## **2 YHTEISTYÖKUMPPANIT**

Opinnäytetyössä vaikuttavien toimijoiden sekä EnergySampo CCU -hankkeen esittely.

### **2.1 Westenergy Oy Ab**

Westenergy Oy Ab on vuonna 2012 toimintansa aloittanut jäte-energialaitos Mustasaaren Koivulahdessa, jonka omistajia ovat kuusi kunnallista jätehuoltoyhtiötä. Yhtiön perustajayhtiöitä ovat Stormossen Oy Ab, Lakeuden Etappi Oy, Botnjarosk Oy Ab, Millespakka Oy sekä Vestia Oy ja Loimi-Hämeen Jätehuolto Oy. Laitos hyödyntää omistajien keräämää syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä 62 kunnan alueelta, mikä kattaa noin 20 prosenttia Suomen kunnista. Laitokselle toimitetaan vuodessa noin 200 000 tonnia yhdyskuntajätettä, joka tuottaa keskimäärin 450 GWh kaukolämpöä sekä sähköä noin 91 GWh vuodessa. Kaukolämmöntuotanto kattaa 60 prosenttia Vaasan alueen kaukolämmön tarpeesta. Westenergyn jäte-energialaitos eroaa muista samankaltaisista laitoksista siinä, että se on voittoa tavoittelematon yritys, joka toimii omakustannusperiaatteella.<sup>11</sup>

### **2.2 EnergySampo**

EnergySampo on ekosysteemitason uusien energiaratkaisujen yhteistyö- ja kehitysalusta, jonka on perustanut seitsemän kansainvälisillä energia-alan vientimarkkinoilla toimivaa suomalaisyhtiötä. Konsortion tavoitteena on kehittää toimintakokonaisuuksia vihreän siirtymän energiaratkaisuille. Esisuunniteltuna on kaksi

hanketta, H-Flex-E- vedyntuotantolaitos ja EnergySampo CCU-hiilentalteenottojärjestelmä.<sup>3</sup>

### 2.2.1 EnergySampo-CCU hanke

EnergySampo-CCU on hanke, jossa suunnitellaan hiilentalteenottojärjestelmää sekä synteettisen polttoaineen tuotantolaitosta Westenergy Oy jäte-energiailaitoksen yhteyteen.

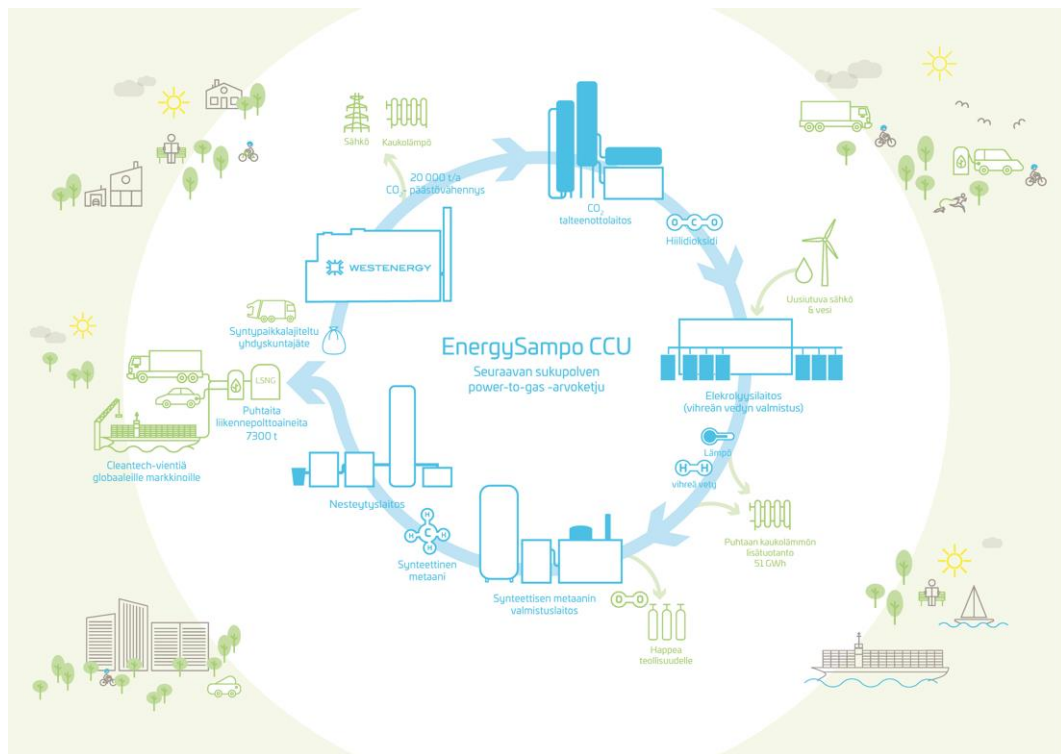
Hanketta johtaa Westenergy Oy ja mukana ovat myös EPV Energia Oy, Oy Danfoss Ab, Ab Stormossen Oy, Vaasan Sähkö Oy, WOIMA Finland Oy sekä Wärtsilä Finland Oy. Hankkeen teknistaloudellisen suunnittelun konsulttina toimii AFRY Finland Oy, lupa-asioista vastaa Ramboll ja konsortiota avustaa teknologiakeskus Merinova. Tavoitteena hankkeella on tuottaa hiilineutraalia jäte-energiaa ottamalla talteen hiilidioksidia Westenergy:n laitoksen savukaasuista ja tuottaa tästä hiilineutraalia synteettistä nesteytettyä metaania raskaan- sekä meriliikenteen käyttöön. Laitoksen päätuotteena on synteettinen metaani, sivu- ja välituotteina vihreä vety, kaukolämpö sekä happi (Kuva 1).<sup>1 4 5</sup>

---

<sup>3</sup> Merinova. 2022. Sari Kola vastaamaan EnergySampo-ekosysteemi-kehityksestä Merinova Oy:llä

<sup>4</sup> Westenergy Oy Ab. 2022. Kuukausipalaveri.

<sup>5</sup> Woima Corporation. 2022.



Kuva 1. EnergySampo CCU -hankkeen power-to-gas arvoketju.<sup>1</sup>

### 3 JÄTTEENPOLTTO JA JÄTE-ENERGIALAITOKSEN PÄÄPROSESSIT

Kappaleessa käsitellään lyhyesti jäte-energiailaitoksen pääprosessit ja niiden toimintaperiaatteet.

Jätteenpolttoto on energiamuoto, jossa jätettä polttamalla tuotetaan lämpöenergiaa sekä sähköä. Suomessa jätteenpolttoto on lisääntynyt huomattavasti viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana, EU:n 2010-luvun alussa säätämien jätteenpolttoto- ja kaatopaikkadirektiivien myötä. Vuonna 2020 suomessa jätteistä hyödynnettiin energiana noin 57,8 prosenttia. Suomessa käytettäviä jätteenpolttotekniikoita ovat kaasutus, arinapolttoto ja kierto-leijutekniikka.<sup>6 7</sup>

#### 3.1 Arinapolttoto

Arinapolttoto on maailmalla ja Suomessa yleisin tapa polttaa jätettä ja tällä tekniikalla jätettä poltetaan myös Westenergyn laitoksella. Arinapolttotoa käyttävien kattiloiden teho on yleensä noin 50–60 MW, ja jätettä tämän kokoluokan laitokset polttavat yleensä noin 120–200 tuhatta tonnia vuodessa. Arinapolttotossa jäte on yleensä syntypaikkalajiteltua sekajätettä.

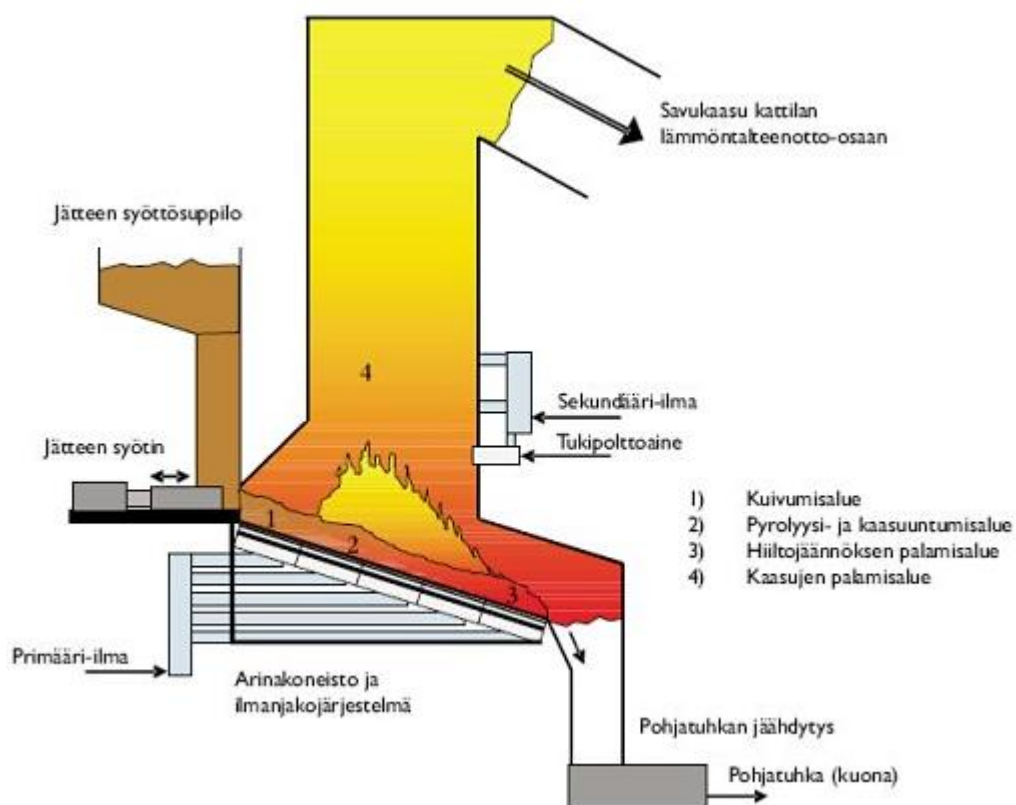
Arinapolttotossa jäte syötetään jätteesyöttökouralla syöttösuppiloon, josta se valuu alas ja syötetään hydrauliiikalla toimivalla syöttimellä arinalle (Kuva 2). Tulipesässä jäte kulkee läpi tavanomaiset kostean polttoaineen palamisen vyöhykkeet eli kuivumis-, pyrolyysi- ja kaasuuntumisvyöhykkeet sekä lopuksi hiiltojäännöksen pala-

---

<sup>6</sup> Tilastokeskus. 2022. Yhdyskuntajätteet Suomessa käsittelytavoittain.

<sup>7</sup> Jätelaitosyhdistys ry. Energianhyödyntäminen ja arinapolttoto.

misalueen. Tämän jälkeen tuhka ja jätteen sisältämät muut palamattomat materiaalit, kuten metalli ja kivet poistuvat arinan alapäästä laitoksen pohjatuhkajärjestelmään.<sup>7</sup>



Kuva 2. Arinakattilan läpileikkaus.<sup>7</sup>

### 3.2 Savukaasun pesu

Savukaasujen pesulla pyritään poistamaan epäpuhtaudet polton jälkeisestä savukaasusta. Pesu tapahtuu pesurin avulla, pesurit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan märkä- ja kuivapesureihin sekä näiden välimuotoon. Pesurin tarkoituksena on puhdistaa savukaasusta suurin osa saastuttavista aineista ja hiukkasista. Lisäksi nykyään varsinkin teollisuuden sovellutuksissa yhtenä tärkeänä osana on kerätä kaasun mukana kulkeva jäännöslämpö ja syöttää se kaukolämpöverkkoon. Tämä

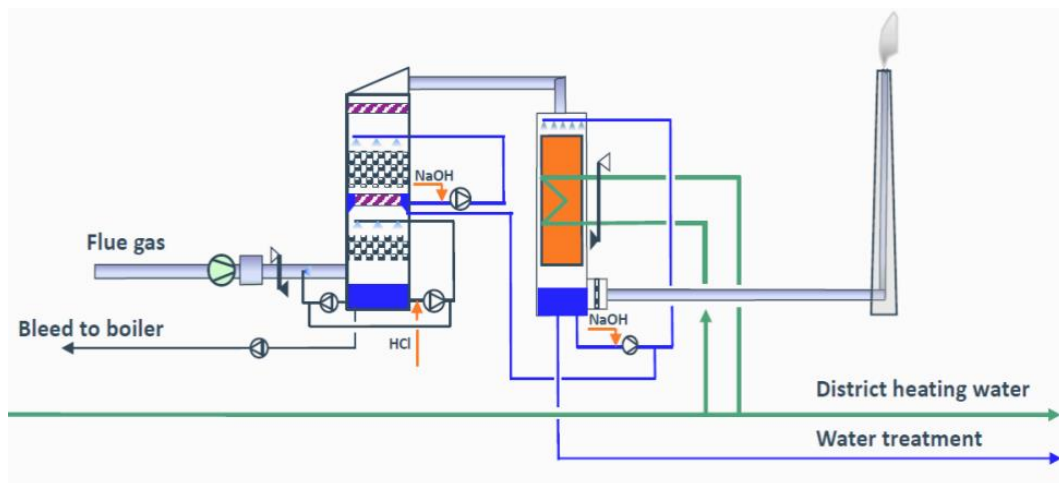
nostaa laitoksen kokonaishyötysuhdetta ja sitä pidetään helppona tapana nostaa laitoksen energiakapasiteettia.<sup>8</sup>

Westenergyn laitoksella on ollut vuodesta 2019 asti käytössä Babcock & Wilcox Vølund AB:n toimittama -kaksitasopesuri (Kuva 3). Pesuri on märkäpesuri ja sen toiminta perustuu veteen liotettujen kemikaalien ominaisuuksiin sitoa epäpuhtauksia. Pääasiassa pesurilla pyritään neutralisoimaan savukaasu saastuttavista kaasuista, mutta märkäpesurilla on myös ominaisuus sitoa hiukkassaasteita. Kaasun kulkiessa pesurin läpi savukaasuun suihkutetaan nestettä, jonka ominaisuudet vaihtelevat riippuen siitä, mitä pesurilla halutaan puhdistaa. Kemikaaleja sisältävien vesipisaroiden on tarkoitus saada kontakti kaasun sekä hiukkasten kanssa, jolloin se pystyy sitomaan halutut kemikaalit, hiukkaset ja savukaasun sisältämän lämpöenergian. Tämän jälkeen lämmin epäpuhtauksia sisältävä saturoitunut kaasu, ohjataan kaukolämmönvaihtimille ja siitä otetaan talteen jäännöslämpö. Lämmön talteenoton jälkeen lauhtunut vesi puhdistetaan käyttäen erilaisia vedenpuhdistus mekanismeja, kuten suodattimia ja käänteisosmoosia. Puhdistuksen jälkeen osa vedestä palautetaan takaisin pesurin kiertoön ja ylimääräinen vesi ajetaan kunnan viemäriin. Ylimääräisen veden määrä riippuu muun muassa poltetun jätteen kosteudesta.<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> Soile Javarus. 2016. Savukaasupesurin lämpövirrat ja hukkalämmön talteenotto.

<sup>9</sup> Westenergy Oy Ab. 2020. Savukaasupesuri siivitti Westenergyn kaukolämpöennätykseen.



**Kuva 3.** Westenergy Oy:n savukaasupesurin prosessikaavio.<sup>1</sup>

### 3.3 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkosto on erillinen järjestelmä, joka on luotu hukkalämmön sekä suurempien lämmöntuotantovoimaloiden tuottaman lämmön siirtämiseksi julkisten rakennusten sekä yksityisten käyttäjien toimi- ja asuintilojen lämmittämiseksi. Verkostossa kulkee lämmin vesi, joka sitten siirtyy huoneilmaan ja muihin lämmitettäviin kohteisiin.

## 4 SYNTEETTISEN METAANIN TUOTANNON PÄÄPROSESSIT

Synteettinen metaanin tuotanto koostuu neljästä pääprosessista. Kappaleessa käydään läpi synteettisen metaanin tuotannossa käytettäviä tekniikoita.

### 4.1 Hiilidioksidin talteenotto

Energiantuotannon hiilidioksidipäästöt ovat yksi merkittävin osa ilmastonlämpenemiseen ja muutokseen vaikuttavista sektoreista. Ilmastonmuutoksen hillitsemisessä tärkeimpiä tekniikoita ovat hiilidioksidin varastointi (CCS) ja hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen (CCU). Näillä tekniikoilla on potentiaalia kasvaa valtavaksi markkinaksi tulevaisuudessa. Hiilidioksidin varastoinnissa hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan esimerkiksi maaperään tai merenpohjaan. Varastoitua hiilidioksidia voidaan käyttää esimerkiksi biopolttoaineiden kuten synteettisen metaanin valmistuksessa. Hiilidioksidia on otettu talteen teollisuuden prosesseista jo 80 vuotta mutta edelleen suurin osa teollisuuden tuottamasta hiilidioksidista päästetään suoraan ilmakehään, koska kannustimia sen varastointiin tai hyödyntämiseen ei ole.

#### 4.1.1 Hiilidioksidin talteenotto tekniikat

Hiilidioksidin talteenottomenetelmät voidaan jakaa neljään eri luokkaan. Talteenotto teollisuuden prosessivirroista, talteenotto ennen polttoa, talteenotto polton jälkeen sekä happipoltto. Talteenottotavan valintaan vaikuttaa yleensä millainen laitos on kyseessä. Ennen polttoa tapahtuva talteenotto soveltuu paremmin kaasuvoimalaitoksiin, ja polton jälkeinen talteenotto sopii paremmin esimerkiksi polttolaitoksiin.

**Ennen polttoa** suoritettavassa talteenotossa kiinteä polttoaine muunnetaan kaasumaiseen muotoon, josta hiilidioksidi otetaan talteen kaasusta ja jäljellä oleva kaasu käytetään kattilan polttoaineena.

**Talteenotossa teollisuuden prosessivirroista** tekniikat ovat lähes samanlaisia kuin ne ovat talteenotossa ennen polttoa.

**Happipoltossa** polttoon ei käytetä ilmaa vaan puhdasta happea, tämän takia savukaasu on pääasiassa hiilidioksidia ja vettä. Happipolttu soveltuu parhaiten kaasuvoimalaitoksiin.

**Polton jälkeisessä talteenotossa** hiilidioksidin talteenotto tapahtuu polton jälkeen savukaasuista. Tekniikassa käytetyimmät ja tutkituimmat talteenottotavat ovat adsorptio kiinteillä sorbenteilla, membraanisuodatus sekä kemiallinen absorptio.<sup>10</sup>

#### **4.1.2 Membraanisuodatus**

Membraanisuodatuksessa komponentit erotetaan kalvolla, jota kutsutaan membraaniksi. Suodatuksessa kaasuvirtauksesta erotetaan tarvittavat komponentit fyysikaalisesti ja kemiallisesti. Toimiakseen suodatin tarvitsee ajavan ulkoisen voiman kalvon yli, yleensä ulkoisena voimana toimii joko pitoisuus- tai paine-ero. Membraanisuodatuksessa on tarkoituksena ottaa talteen hiilidioksidia savukaasuista. Savukaasu kulkee membraanisuodattimen läpi, joka koostuu kahdesta putkesta, jotka ovat erotettu toisistaan suodatinkalvolla. Ulkoisen voiman vaikutuksesta hiilidioksidi suodattuu kalvon läpi, ja tällöin toiseen putkeen syntyy hiilidioksidipitoinen virtaus, jota sanotaan permeaatiksi. Toiseen putkeen jäljelle jäänyt puhdistettu kaasun on retentaatti. Suodatin materiaalin tärkeimpinä ominaisuuksina pidetään selektiivisyyttä, läpäisevyyttä ja vakaata rakennetta. Materiaalin valintaan vaikuttavat myös puhdistettavan kaasun koostumus, talteenoton parametrit sekä

---

<sup>10</sup> IPCC. 2007.

toiminta olosuhteet. Käytettävien kalvojen materiaaleja ovat kaasu-nestemembraanit, aktiiviset ja passiiviset membraanit sekä membraanimatriisit.<sup>10</sup>

#### **4.1.3 Adsorptio kiinteillä aineilla**

Adsorptiossa kaasu tai neste kiinnittyy sorbenttiin kahdella tavalla, joko fysikaalisesti tai kemiallisesti. Kemiallisessa adsorptiossa hiilidioksidin ja sorbentin välille syntyy kemiallinen ja palautumaton sidos. Fysikaalisessa adsorptiossa kiinnittyminen tapahtuu heikkojen vuorovaikutusten avustuksella.

Sorbentit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, korkean ja matalan lämpötilan sorbentteihin. Korkean lämpötilan sorbentit luovat kemiallisia sidoksia, kun taas matalan lämpötilan sorbentit kiinnittyvät aineeseen fysikaalisesti. Fysikaalinen adsorptio on näistä kahdesta yleisemmin käytetty tapa puhdistaa savukaasuja, sillä savukaasujen lämpötilat ovat yleensä tässä vaiheessa jo varsin matalia. Yleisimpiä adsorptiossa käytettäviä materiaaleja ovat aktiivihielet, zeoliitit, Metall-orgaaniset runkorakenteet, alkalimetallikarbonaatit ja amiinit. Adsorptio materiaalia valittaessa tärkein tarkasteltava ominaisuus on sorbentin absorptiokapasiteetti, eli kuinka monta moolia hiilidioksidia yhteen kilogrammaan sorbenttia voidaan sitoa.<sup>10</sup>

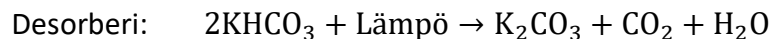
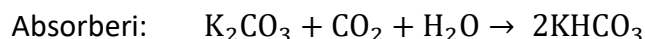
#### **4.1.4 Absorptio**

Hiilidioksidin kemiallinen absorptio perustuu sen ja liuottimen eksotermiseen reaktioon, jossa muodostuu erilaisia yhdisteitä, joista hiilidioksidi voidaan sitten erottaa talteen. Absorptiossa lämpötila ja paine ovat yleensä matalia. Kemiallinen absorptio on hiilidioksidin talteenotto menetelmistä käytetyin ja varsinkin sen amminipesu sovellutuksista on jo paljon käyttökokemuksia teollisuudesta.<sup>10</sup>

#### 4.1.5 Karbonaattien käyttö

Absorptiossa karbonaatteja käytettäessä hiilidioksidin keräämiseen, hiilidioksidi reagoi karbonaatin kanssa, tästä syntyy bikarbonaattia. Tällöin bikarbonaattia lämmittämällä vapautuu hiilidioksidia, jolloin bikarbonaatti reagoi ja palaa takaisin karbonaatiksi sitomaan uudestaan lisää hiilidioksidia. Karbonaattien etuna enemmän käytettyyn amiinipesuun on pienempi regenerointienergian tarve, pienempi liukoisuus happeen, korkeampi hiilidioksidin absorptionkapasiteetti sekä reakti nopeus. Toisaalta karbonaattien ongelmana amiineihin verrattuna on matala hiilidioksidin absorpti nopeus ja etenkin CHP-laitoksissa ongelmaksi muodostuva isompi selektiivisyys rikkidioksidiin.<sup>10</sup>

#### Prosessissa tapahtuvat kemialliset reaktiot.



#### 4.2 Vedynvalmistus

Vetyä esiintyy luonnossa pieninä määrinä, saatavilla oleva vety on käytännössä aina yhdisteenä. Tämän takia vety täytyy erottaa jostakin luonnossa esiintyvistä kemiallisesta yhdisteistä. Vetyä esiintyy lähes kaikissa orgaanisissa yhdisteissä, kuten proteiineissa, rasvoissa ja hiilihydraateissa. Näiden lisäksi vetyä on sitoutuneena myös hiilivetyihin ja ammoniumsuoloihin. Eniten vetyä esiintyy kuitenkin

sitoutuneena veteen.<sup>11</sup> Vetyä valmistetaan pääasiassa teollisuuden käyttöön kuten ammoniakkin ja metanolin valmistukseen sekä erilaisiin jatkojalostuksiin, kuten kemian-, elektroniikan-, metalli-, lasi- ja ruokateollisuuteen.<sup>12</sup>

Suomessa tuotetaan Business Finlandin julkaiseman vedyn tiekartan mukaan vuodessa arviolta 140 000–150 000 tonnia vetyä eli noin 4,7–5 Terawattituntia, josta 99 prosenttia on muodostettu fossiilisten polttoaineiden käsittelyllä ja jäljelle jäänyt yksi prosentti muodostuisi vesielektrolyysin avulla.<sup>13</sup>

Vetyä voidaan valmistaa usealla eri tekniikalla. Business Finlandin julkaisemista prosenttiosuuksista voidaan päätellä, että käytännön sovellutukset painottuvat tällä hetkellä vielä fossiilisten aineiden reformointiin tai veden elektrolyysiin. Muita vedyn erottamistapoja hiilivedyille ovat kuivatislaus, osittaishapettaminen tai autoterminen reformointi ja uusiutuville bio-fotohajoaminen, pimeäfermentaatio, valofermentaatio, kaasutus, kuivatislaus, poltto sekä nesteytys. Osa edellä mainituista on kuitenkin saatettu laskea osaksi reformointia Business Finlandin julkaisussa. Näiden lisäksi uusiutuvan energian hyödyntämiseen vedyn muodostamisessa voidaan laskea veden puolitusta, johon kuuluu myös edellä mainittu veden elektrolyysi. Veden puolitusta tapahtuu myös luonnossa auringon valon aiheuttamalla fotohajoamisella sekä lämpöhajoamisella.<sup>14</sup>

---

<sup>11</sup> Pauli Jumppanen. 2009. Vety energiantuotannossa.

<sup>12</sup> Power-to-Gas: Technology and Business Models. 2014.

<sup>13</sup> Business Finland. 2020. National hydrogen roadmap.

<sup>14</sup> Hydrogen Production Technologies. 2020.

#### 4.2.1 Elektrolyysi ja siihen käytetyt tekniikat

Elektrolyysi on suosittu vedyn tuotantotapa varsinkin power-to-gas-sovelluksissa, joissa usein energiana käytetään uusiutuvaa lähdettä tai ylijäämä energiaa. Elektrolyysi on sähkökemiallinen prosessi, joka toimii erinomaisena siltana tuotetun energian muuntamiseksi kemialliseksi energiaksi. Tämä mahdollistaa pitkäaikaisemman energian säilytyksen. Elektrolyysiä käytettäessä vedyn tuottamiseen on vedyn puhtausaste useimmissa sovellutuksissa erittäin korkea.<sup>12</sup>

Elektrolyysissä käytetään sähköä, jotta vesi saadaan hajotettua hapeksi ja vedyksi. Vedyntuotantotapana elektrolyysi herättää kiinnostusta, sillä se käyttää hiilivetyjen sijaan vettä ja sähköä.<sup>12</sup>

Elektrolyysi jaetaan usein kolmeen eri tekniseen tasoon. Toiminta lähtee **kennoista**, jossa sähkökemiallinen prosessi tapahtuu. Kenno koostuu kahdesta elektrodista, jotka ovat joko upotettuna nesteeseen tai kiinni kiinteässä elektrolyytissä. **Pino** taas koostuu useista kennoista. Pinosta puhuttaessa otetaan huomioon eristävä materiaali. Edellä mainittujen lisäksi tarvittavat apulaitteistot, kuten jäähdytys ja veden deionisointiin käytettävä laitteisto muodostavat itse **elektrolyysisysteemin**.<sup>13 15</sup>

Elektrolyysi on teoreettisesti yksinkertainen, mutta käytetyissä tekniikoissa on paljon erilaisia sovellutuksia fysikaaliskemiallisella sekä sähkökemiallisella tasolla. Laitteistossa suurimmat erot elektrolyysimenetelmissä tulevat elektrolyyttien eroista. Elektrolyysin avulla tapahtuvaan veden hajottamiseen on tällä hetkellä neljää erilaista päätyyppiä. Kaupallisessa vaiheessa olevat alkalinen elektrolyysi- ja

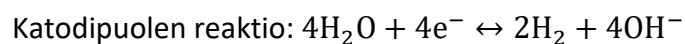
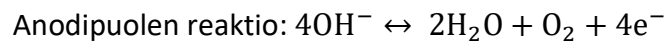
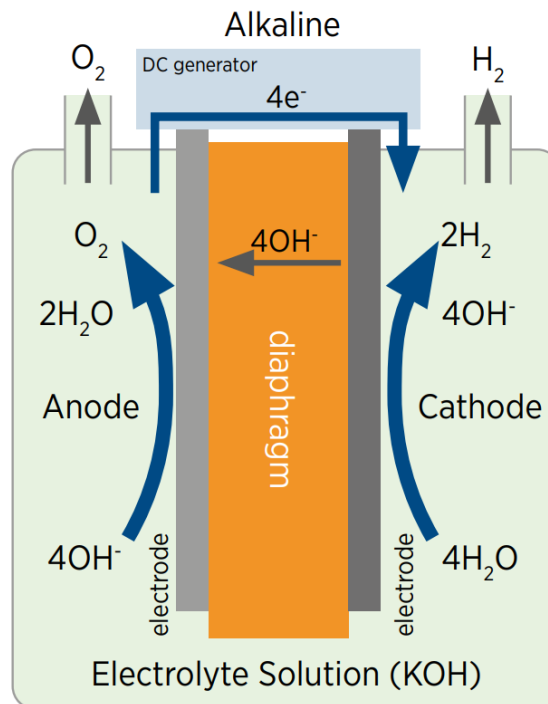
---

<sup>15</sup> IRENA. 2020. Green hydrogen cost reduction.

polymeerielektrolyysikalvotekniikka sekä potentiaaliset mutta vielä kehitysvaiheessa olevat kiinteäoksidi eli höyryelektrolyysi- ja anioninvaihtomembraanitekniikka.<sup>15</sup>

### Veden alkalinen elektrolyysi

Veden alkalinen elektrolyysi on kehittynein vesielektrolyysitekniikkaa. Alkalielektrolyysi on todennäköinen vaihtoehto isompiin elektrolyysin sovellutuksiin.<sup>12</sup>



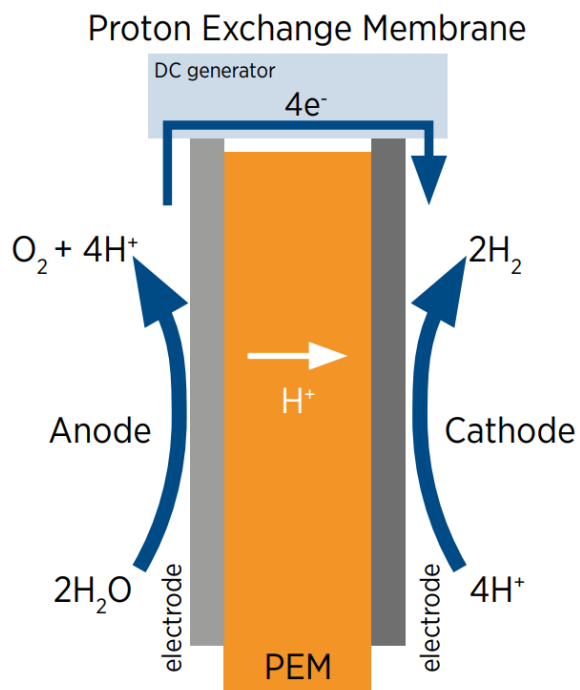
**Kuva 4.** Alkalikennon toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.<sup>15</sup>

Alkalisessa elektrolyysissä kaksi elektrodisauvaa on upotettuna nesteeseen, joka toimii elektrolyytinä liuoksessa. Nestettä erotetaan kalvolla, joka estää vedyn ja hapen muodostumisen vedeksi. Perinteisimmissä sovellutuksissa nesteinä käytetään yleensä kaliumhydroksidin (KOH) vesiliuosta tai natriumhydroksidin (NaOH) liuosta, usein suositaan kaliumhydroksidia, sillä se omaa korkeamman sähkönjohdavuuden. Elektrodeissa useimmin käytetty metalli on nikkeliä.<sup>12</sup>

Prosessi toimii ulkoisen sähkövirran avulla. Sähkö syötetään prosessiin tasasähköinä, syötetty tasasähkö saa aikaan reaktion elektrolyytissä olevassa vedessä ja vesi pelkistyy katodisauvalla hydroksidiksi ja vapauttaa vetyä. Käytännössä samaan aikaan hydroksidi hapettuu anodisauvalla ja muodostuu happea. Tämä pitää prosessin tasapainossa, jolloin prosessi on jatkuvaa. Prosessin aikana muodostuu kaasukuplia (vetyä ja happea), jotka sitten otetaan talteen prosessista. Prosessissa muodostunut vety korvataan lisäämällä vettä prosessiin. Prosessissa itsessään ei kulu elektrolyyttiä, mutta sitä kuitenkin pitää uusia tietyin aikaväleillä erilaisten prosessihäviöiden takia.<sup>12</sup>

### **Protoninvaihtomembraanielektrolyysi**

PEM-elektrolyysi ei ole vielä yhtä kehittynyttä kuin alkalinen elektrolyysi, vaikkakin melko pitkälle kehittynyttä tekniikkaa elektrolyysisovellutuksena. PEM-tekniikassa on kuitenkin enemmän suunnitteluvaihtoehtoja kuin alkalitekniikassa. Prosessi voidaan suunnitella toimimaan erilaisissa paineissa, jolloin koko prosessin kokoonpano muuttuu. PEM-elektrolyysi on suosittu ratkaisu hieman pienemmän kokoluokan sovellutuksissa, joissa esiintyy tuotannon vaihtelua.<sup>12 15</sup>



Anodipuolen reaktio:  $2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

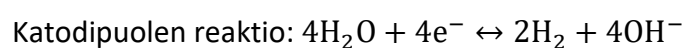
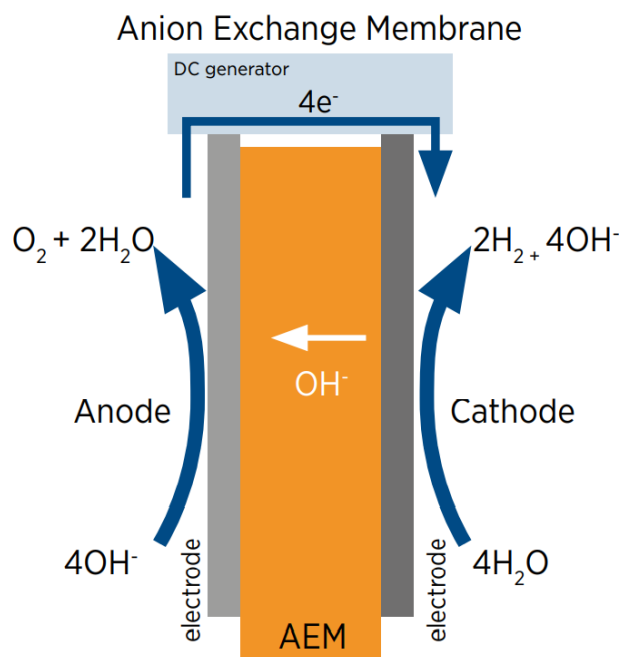
Katodipuolen reaktio:  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2$

**Kuva 5.** Protoninvaihtomembraani elektrolyysin toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.<sup>15</sup>

PEM-elektrolyysissä kuten alkalielektrolyysissä on kaksi elektrodisauvaa, mutta PEM-elektrolyysissä sauvat ovat kiinni protoneja johtavassa kiinteässä elektrokalyyttipinnoitteessa. Pinnoite sijaitsee molemmilla puolilla kennoa ennen välittäjäpolymeerikalvoa. Kalvo on upotettuna happamaan vesiliuokseen ja sen sisällä veden hajoamisen seurauksena syntyneet vetyprotonit pääsevät membraanikalvon läpi katodi puolelle, jolloin muodostuu vetykaasua. PEM-elektrolyysissä elektrolyytinhappamuus on korkea, joten reaktiossa on käytettävä jalometallia reaktion katalyyttinä sekä elektrodisauvoissa.<sup>12</sup>

### Anioninvaihtomembraanielektrolyysi

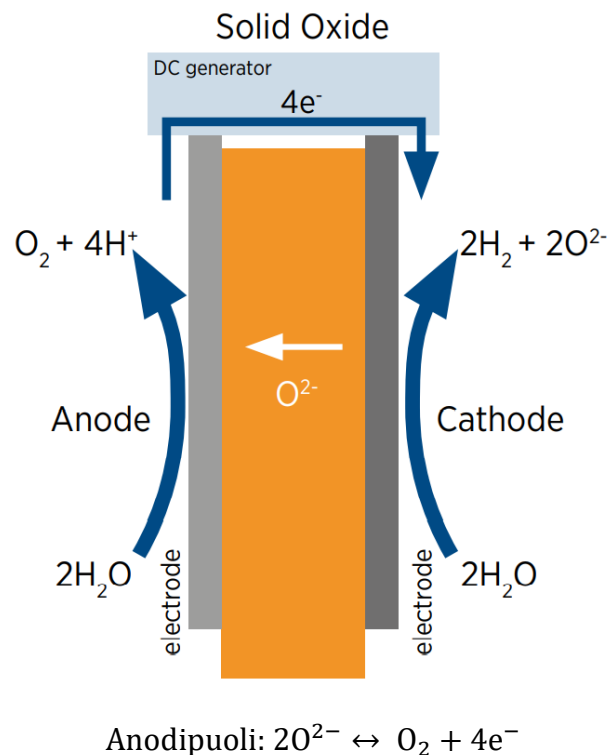
AEM-elektrolyseri on yksi tulevaisuuden ratkaisuista tuottaa vetyä mutta vain harvat yritykset ovat kaupallistaneet tämän. Se on uusinta tekniikka elektrolyysipuolella, ja tarjoaa yhdistelmän molempien vakiintuneiden elektrolyysitekniikoiden PEM -ja AEL-eduista. AEM-tekniikalla pyritään vähentämään korroosiota aiheuttavien materiaalien käyttöä välikalvossa, jotka sittemmin vähentävät kustannuksia muissa elektrolyysin rakenteissa. AEM on tekniikaltaan hyvin samanlainen kuin PEM, mutta pyrkii siis hyödyntämään alkalitekniikassa käytettyjä materiaaleja. AEM-tekniikalla on kuitenkin vielä ongelmia, jotka tulevat esiin suurissa painenvaihteluissa kennon kemiallisella ja mekaanisella puolella, jotka johtavat epävakaiseen käyttöikään.<sup>15</sup>



**Kuva 6.** Anioninvaihtomembraani toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.<sup>15</sup>

## 5 KIINTEÄOKSIDI ELEKTROLYYSI

SOEC-elektrolyysi eli kiinteäoksidi elektrolyysi on käsitellyistä prosesseista nuorin ja vielä kehitysvaiheessa. SOEC-tekniikkaa kohtaan on kuitenkin osoitettu paljon kiinnostusta sen vähäisen sähkönkulutuksen sekä hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien takia. Nämä laskevat elektrolyysistä syntyviä kustannuksia.<sup>12</sup>



**Kuva 7.** Kiinteäoksidikennon toiminta ja siihen liittyvä kemiallinen reaktio.<sup>15</sup>

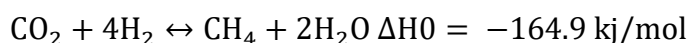
SOEC-elektrolyyseri on rakenteeltaan lähes samanlainen kuin PEM-elektrolyyseri, mutta SOEC-elektrolyysissä membraanina toimii keraaminen kiinteäoksidikerros. Lämmitessään se kuljettaa vesihöyrystä katodipuolella hajonneet happi-ionit katodipuolelta anonipuolelle.<sup>12</sup>

Kiinteäoksiditekniikkaa käytettäessä reaktion vaatima jännite on huomattavasti matalampi kuin muita tekniikoita käytettäessä. Tämä on seurausta siitä, että kiinteäoksidi järjestelmät toimivat huomattavasti korkeammissa lämpötiloissa, joka johtaa alhaisempaan vedenpuolitukseen vaatimaan energiaan. Tällöin myös katalyytteinä voidaan käyttää halvempia materiaaleja.<sup>12 15</sup>

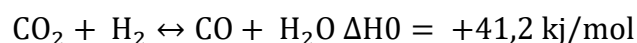
### 5.1 Synteettisen metaanin valmistus

Synteettisen metaanin valmistus on kokonaisuudessaan eksoterminen reaktio. Reaktiossa hiilidioksidi pelkistyy katalyytin, ulkoisen lämpötilan ja paineen noston avulla, jonka jälkeen reagoinnin seurauksena syntyy metaania sekä vettä. Metaanin ja veden lisäksi reaktiotuotteina voi syntyä myös tyydyttyneitä hiilivetyjä. Reaktio voidaan jakaa hiilidioksidin pelkistysreaktioon sekä sen jälkeiseen hiilimonoksidin metanointiin. Hiilidioksidin pelkistys on endoterminen reaktio ja reaktion käynnistymiseksi olosuhteiden on oltava optimaaliset.<sup>12 16</sup>

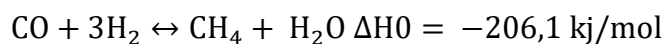
Kokonaisreaktio (Sabatier reaktio):



Hiilidioksidin pelkistys (käänteinen veden kaasutusreaktio):



Hiilimonoksidin metanointi:




---

<sup>16</sup> Methanation of CO<sub>2</sub> - Storage of renewable energy in a gas distribution system. 2020.

Synteettistä metaania voidaan valmistaa bakteereja hyödyntäen biologisesti, joka tapahtuu matalammassa lämpötilassa ja paineessa tai kemiallisesti käyttäen katalyyttiä korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Kemiallinen prosessi on kuitenkin selvästi pidemmälle kehittynyttä ja sitä käytetään useammin power-to-gas-sovelluksissa. Molemmista sovellutuksissa tapahtuu Sabatier-reaktio.<sup>12</sup>

### 5.1.1 Kemiallinen metanointi

Metanointi kemiallisesti voidaan suorittaa termokemiallisella Sabatier-prosessilla. Katalyyttinen reaktio tapahtuu kemiallisen katalyytin avustuksella reaktorissa korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Katalyyttinä käytetään usein rodiumia, ruteenia tai nikkeliä, sillä nämä ovat kustannuksiltaan alhaisia. Optimaalisena katalyyttinä pidetään nikkeliä, sen melko korkean aktiivisuuden ja selektiivisyyden takia. Nikkeli vaatii erittäin puhtaat reaktiokaasut, jotka elektrolyysissä ovat varsin puhtaita. Reaktoreita on kahden tyyppisiä, adiabaattisia sekä isotermisiä. Isotermisessä reaktorissa lämmönvaihtoa tapahtuu reaktorin ja reaktionesteen välillä, joten isotermisessä sovellutuksessa lämpötilan vaihtelua pitää erikseen hallita. Tekniikka on jo pitkälle kehittynyttä ja reaktorin hyötysuhdetta voidaan vielä entisestään parantaa hyötykäyttämällä prosessissa syntyvää hukkalämpöä.<sup>17 18</sup>

### 5.1.2 Biologinen metanointi

Metaania tuottaessa biologisesti prosessi toimii metanogeenisten mikro-organismien avulla, nämä mikro-organismit tuottavat metaania aineenvaihduntansa seurauksena ja toimivat biokatalyytteinä. Reaktio tapahtuu painekattilan sisällä

---

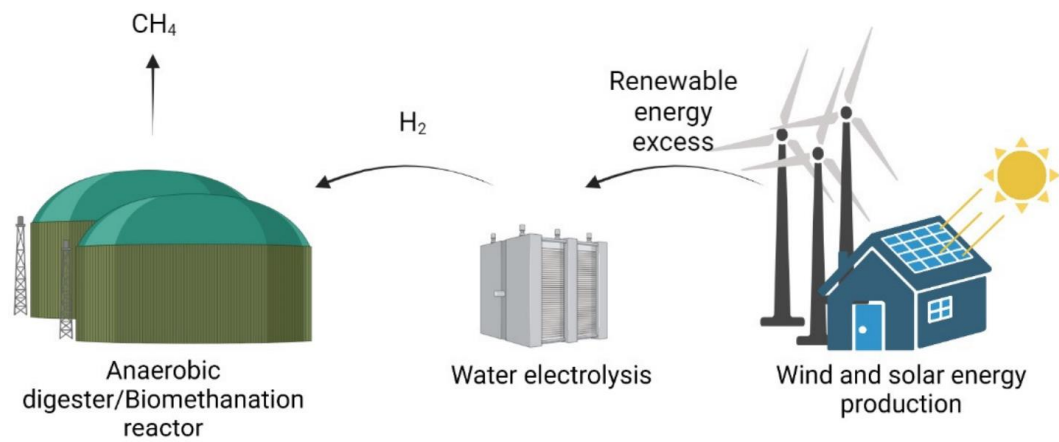
<sup>17</sup> Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. 2016.

<sup>18</sup> Etima. 2021. POWER-TO-X TECHNOLOGIES.

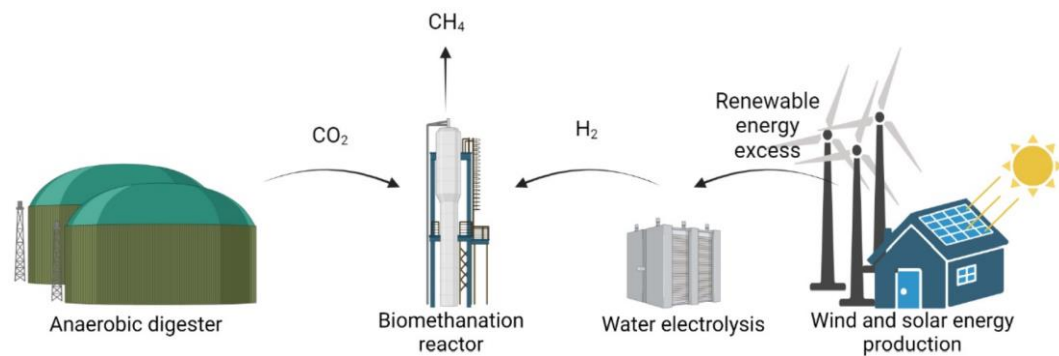
hapettomissa oloissa, selvästi matalammassa lämpötilassa ja paineessa kuin kemiallisessa metanoinnissa. Prosessi voidaan suorittaa In-situ tai Ex-situ-metanointina (Kuva 8 ja 9). In-situ prosessia käytetään muunnettaessa biomassaa metaaniksi ja tässä Sabatier-reaktiota käytetään parantamaan metaanin laatua. Ex-situ-prosessissa käytetään ulkoista hiilidioksidin lähdettä.<sup>18 19</sup>

---

<sup>19</sup> Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency. 2019.



**Kuva 8.** Biologinen metanointi in-situ.<sup>20</sup>



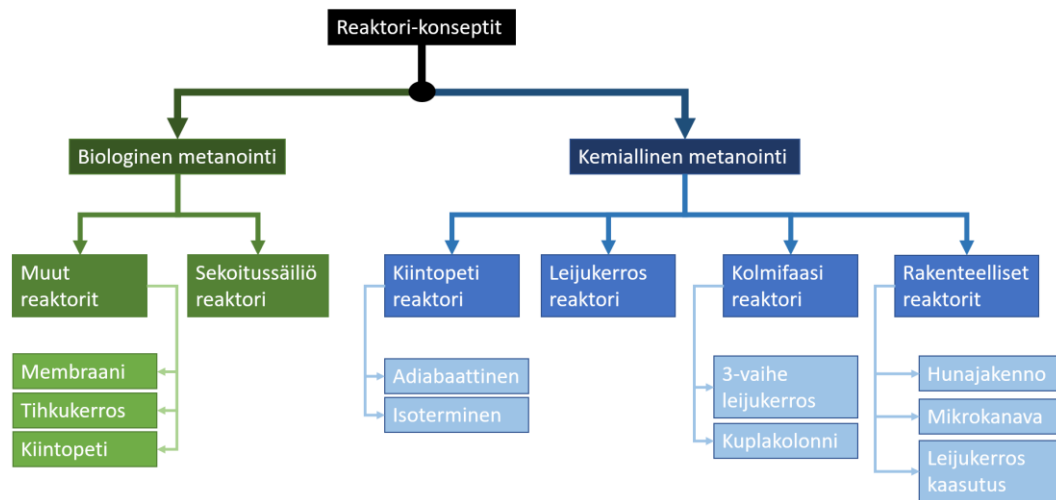
**Kuva 9.** Biologinen metanointi Ex-situ.<sup>20</sup>

### 5.1.3 Metaanin valmistukseen käytetyt reaktoriyydit

Metaanin valmistukseen on muutamia erilaisia sovellutuksia, mutta pääasiassa rakennetut reaktorit ovat kiintopetireaktoreita (Kuva 9).

---

<sup>20</sup> Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO<sub>2</sub>. 2022.



**Kuva 10.** Synteettisen metaanin tuotantoon käytettävät reaktoriyytit (muokailtu).<sup>17</sup>

## 5.2 Synteettisen metaanin nesteytys

Nesteytyslaitoksessa kaasumainen metaani (SNG) nesteytetään synteettiseksi metaaniksi (LNSG). prosessissa kuivattu synteettinen metaani jäädytetään alle -170 asteeseen hiilivety-yhdisteiden ja Joule-Thomsonin ilmiön avulla. Prosessissa käytettävä kylmäaine on yleensä useiden eri yhdisteiden seos, mutta pääasiassa alhaisen kiehumispisteen omaavien hiilivetyjen ja vedyn seos. Joulen-Thomsonin ilmiöllä kuvataan kaasun tai nesteen lämpötilan vaihtumista lämpöeristetyssä putkessa, kun se pakotetaan venttiiliin tai huokoisen tulpan läpi suuremmasta paineesta pienempään.

Prosessissa haihtuminen tapahtuu lämpötilan liukuessa, eli ei siis vain yhdessä lämpötilassa. Lämpötilan liukumisella tarkoitetaan zeotrooppisen kylmäaineseoksen kuplapisteen ja kastepisteen välistä eroa. Kylmäaineen koostumusta on silloin mahdollista säätää niin että sen haihtumiskäyrä vastaa syötettävän kaasun jääh-

dytyskäyrää ympäristön lämpötilasta kryogeeniseen lämpötilaan. Parhain lämpöhyötysuhde saavutetaan, kun jäähdytys tapahtuu mahdollisimman lämpimissä olosuhteissa.

Monikylmäainetekniikat voidaan jakaa kahteen eri pääryhmään yhden-kylmäaineen ja kahden-kylmäaineen tekniikkaan. Näistä yhden-kylmäaineen tekniikka on suositumpi pienemmän mittakaavan LNG-sovellutuksissa ja kahden-kylmäaineen tekniikka isomman mittakaavan sovellutuksissa.<sup>21 22 23</sup>

---

<sup>21</sup> Vaasan yliopisto Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. 2020.

<sup>22</sup> Wärtsilä Oyj. 2013. Fuel Gas Handling System and BOG Reliquefaction for LNG Carrier.

<sup>23</sup> Thermodynamic comparison of three small-scale gas liquefaction systems. 2017.

## 6 KÄYTETTÄVÄ TEKNIikka

Kappaleessa on tulkittu ympäristövaikutusten arviointiohjelman sekä kerätyn tiedon perusteella, todennäköisesti hankkeessa käytettävät tekniikat.

### 6.1 Hiilidioksidin talteenotto

Ympäristövaikutusten arviointiohjelman mukaan hiilidioksidi on tarkoitus ottaa talteen polton jälkeen laitoksen savukaasuista. Polton jälkeisessä talteenotossa hiilidioksidi otetaan talteen laitoksen savukaasuista pesurin avulla, jonka jälkeen se varastoidaan jatkokäsittelyä varten. Tämän menetelmän etuna voidaan pitää, että se voidaan varsin vähin muutoksin integroida olemassa olevan laitoksen prosessiin. Laitoksia ja energian tuotantoprosessia ei tarvitse kokonaan uudistaa, jotta energiantuotannosta saataisiin hiilineutraalimpaa.<sup>22 10</sup>

#### 6.1.1 Absorptio

Hiilidioksidin erottamiseen absorptiolla ei ympäristövaikutusten arviointiohjelman mukaan käytetä amiineja vaan karbonaatteja, jonka etuna amiineihin verrattuna on pieni energiantarve aineen puhdistamiseksi ja palauttamiseksi uuden veroiseksi.<sup>2</sup>

### 6.2 Vedyntuotantolaitos

Ympäristövaikutusten arviointiohjelman tekniikankuvauksesta selviää, että vedyntuotantolaitoksen tekniikkana tulee toimimaan kiinteäoksiditekniikka tai PEM-tekniikka. Tekniikan valintaa tuetaan tulkitsemalla alla olevaa taulukkoa 1.

Taulukko 1. Elektrolyysiteknikoiden vertailu (mukailtu).<sup>15</sup>

	Alkali-elektrolyyseri	PEM elektrolyyseri	AEM elektrolyyseri	Kiinteä oksidi elektrolyyseri	Yksikkö
Teknologian kehitysvaihe	Hyvin kaupallistettu	Melko kaupallistettu	Tutkimusvaiheessa	Kehitys/tutkimusvaiheessa	
Nimellinen virtatiheys	0,2-0,8	1,0-2,0	0,2-2,0	0,3-1,0	[A/cm <sup>2</sup> ]
Jännite ala (raja-arvot)	1,4-3,0	1,4-2,5	1,4-2,0	1,0-1,5	[V]
Toiminta lämpötila	70-90	50-80	40-60	700-850	[°C]
Kennon paine	<30	<30	<35	1	[bar]
Toiminta alue	15-100	5-120	5-100	30-125	[%]
H <sub>2</sub> puhtaus	99,9-99,9998	99,9-99,9999	99,9-99,9999	99,9	[%]
Jännite tehokkuus (alempi lämpöarvo)	50-68	50-68	52-67	75-85	[%]
Sähkönkäyttö (pino)	47-66	47-66	51,5-66	35-50	[kWh/kg H <sub>2</sub> ]
Sähkönkäyttö (systeemi)	50-78	50-83	57-69	40-50	[kWh/kg H <sub>2</sub> ]
Elinikä (pino)	60 000	50 000-80 000	>5000	<20 000	[h]
Yhden pinnon käyttöteho	1000	1000	2,5	5	[kW]
Elektrodi alue	10 000-30 000	1500	<300	200	[cm <sup>2</sup> ]
Kylmäkäynnistys (nimellisteho)	<50	<20	<20	>600	[min]
Pääomakustannukset (pino)	270/kW	400/kW	Ei tiedossa	>2000/kW	[USD]
Vähintään 1 MW					
Pääomakustannukset (Systeemi)	500-1000/kW	700-1400/kW	Ei tiedossa	Ei tiedossa	[USD]
Vähintään 10 MW					
Yhteensopivuus PTG sovellutuksien kanssa	Tyydyttävä	Hyvä	Huono	Neutraali	
Huoltokustannuskerroin					
käytettyä sähköä kohden	20±5	15±5	Ei tiedossa	Ei tiedossa	[€/kW (AC)]

Taulukkoon lisätty ominaisuuksien painotuksia väreillä sekä loppuun yhteensopivuus PTG-sovellutuksien kanssa sekä huoltokustannuskerroin käytettyä sähköä kohden.

### 6.2.1 Tulkinta

Edellisessä kappaleessa esitetyn taulukon värien pohjalta pystytään tekemään alustava johtopäätös, että AEM -ja SOEC-elektrolyysi eivät ole vielä tarpeeksi pitkälle kehittyneitä. Kehittyessään SOEC-elektrolyysin käyttökustannukset voisivat olla tulevaisuudessa varsin matalat. Myös AEM-elektrolyysillä on positiivisia ominaisuuksia, kuten alhaiset materiaalikustannukset. Pisimmälle kehittyneitä ovat alkalielektrolyysi ja PEM-elektrolyysi, niillä ei ole selvää heikkoa kohtaa. Nämä tekniikat ovat jo kaupallistettuja ja toimiviksi todettuja sekä helposti sovellettavissa.

**Kiinteäoksiditekniikan** ollessa vielä kehitysvaiheessa, on prosessin käynnistymisaika 600 minuuttia liian pitkä toimiakseen yhdessä tuulivoiman vaihtelevan sähköntuotannon kanssa.

**AEM-tekniikkaa** tarkasteltaessa on havaittavissa, että suurimmat ongelmat tulevat kennon käyttöiän sekä koon kanssa. Tekniikka ei siis ole sovellettavissa suuren mittakaavan käyttötarkoituksiin.

**Alkalitekniikan** ongelmat tulevat ilmi vasta tuulivoiman tuottaman epätasaisen sähköntuotannon kanssa sekä huoltokustannuksissa. Vetylaitosta on perusteltua käyttää sähkön hinnan ollessa alhaisimmillaan, joten laitoksen täytyy kyetä reagoimaan nopeaan vaihteluun. Tähän ei kuitenkaan alkalitekniikka kykene kylmäkäynnistyksen arvon ollessa 50 minuuttia. Emäksisen elektrolyytin vuoksi huoltovaatimukset ovat korkeammat, mikä johtaa huoltokustannuksien nousemiseen.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> Fraunhofer ISE. 2021.

**PEM-tekniikkaa** tarkasteltaessa ei ole havaittavissa selkeitä ongelmia. Ainoa esiin nouseva arvo on sen korkea sähkön kulutus.

Edellä käytyjen arvioiden pohjalta sekä ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa mainittujen olosuhteiden takia voidaan sulkea pois kiinteäoksiditeknikka, alkali-tekniikka sekä AEM-tekniikka. PEM-elektrolyseri on todennäköisin vaihtoehto.

### **6.3 Metanointilaitos**

Metanointilaitoksen tekniikka tulee ympäristövaikutusten arviointiohjelman mukaan perustumaan Sabatier-prosessiin. Sabatier-reaktio tarvitsee katalyytin, katalyytti voi kuitenkin olla joko kemiallinen tai biologinen. Biologisilla sekä termokemiallisilla metanointiprosesseilla on molemmilla potentiaalia toimia osana PTG-ketjua. Biologisen metanoinnin puolesta puhuu sen yksinkertaisuus ja kaasun epäpuhtauksien sietokyky. Biologisen metanoinnin heikkoutena on kuitenkin sen hidas reagointi ja korkea teho vaatimus sekä hukkalämmön hyödyntämisen vaikeus. Edellä mainitut tekijät tässä tekniikan kehitysvaiheessa johtavat heikompaan energiatehokkuuteen. Biologinen metanointi on tällä hetkellä vasta pilotti ja demonstraatio vaiheessa.

Termokemiallinen metanointi on houkutteleva vaihtoehto sen korkean reaktionopeuden ja matalampien investointikustannuksien vuoksi. Reaktio tapahtuu korkeassa lämpötilassa, tätä on suhteellisen helppoa hyödyntää osana kaukolämmön tuotantoa. Tämä nostaa koko prosessin tehokkuutta. Huomioitavaa on myös, että

tämä tekniikka on pidemmälle kehittynyttä, joten todennäköisesti Westenergyn laitokselle suunniteltava metanointilaitos käyttää kemiallista katalyyttiä.<sup>25 26</sup>

#### **6.4 Metaanin nesteytyslaitos**

Ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa todetaan, että metaanin nesteyttämiseen tullaan käyttämään monikylmäainetekniikka. Monikylmäainetekniikassa syötettävä kaasu jäähdytetään noin -150 – (-170) asteeseen. Jäähdyttämiseen käytetään hiilivetyjen seoksia sekä Joule-Thomsonin ilmiötä.<sup>2 23</sup>

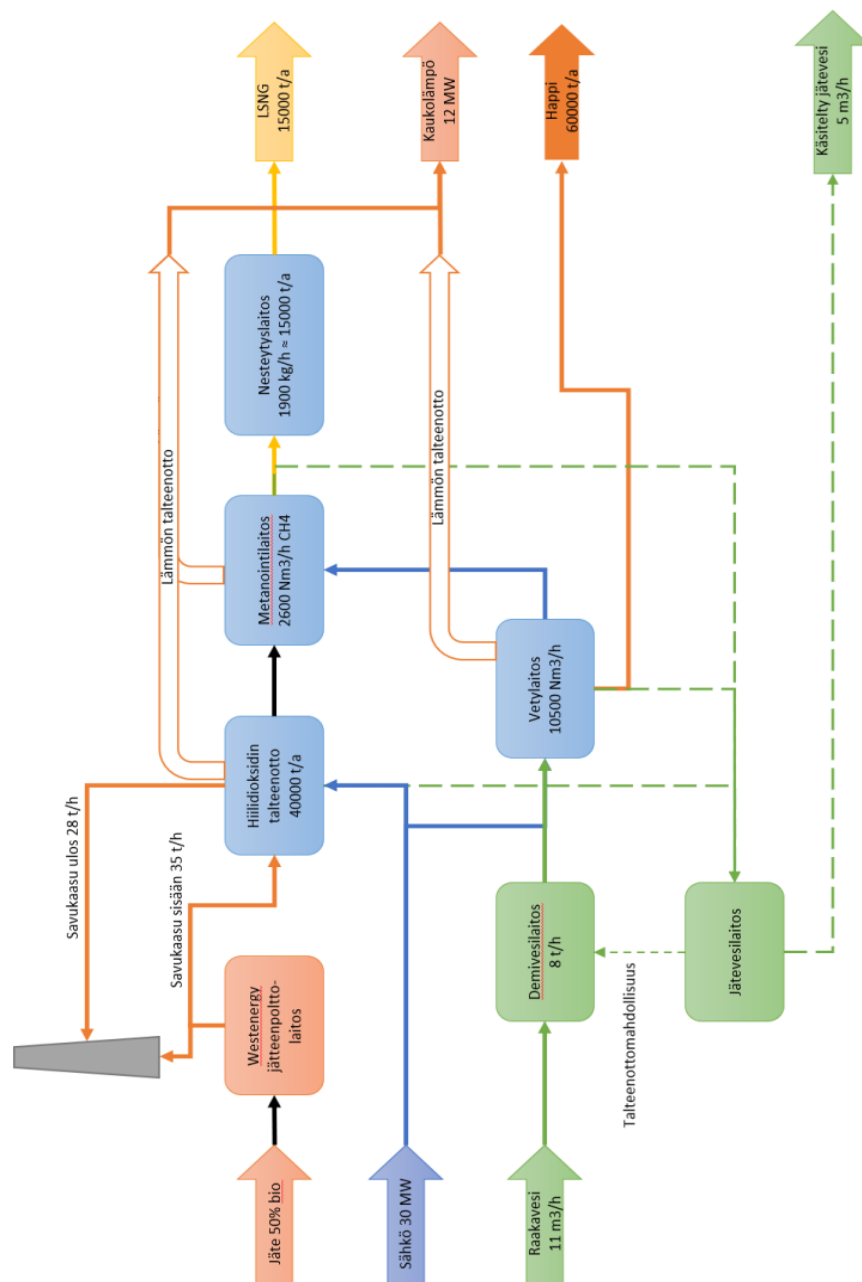
---

<sup>25</sup> State of the Art and Perspectives of CO<sub>2</sub> Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications. 2014.

<sup>26</sup> Prizztech Oy. 2021. Methanation plant – meri-pori.

## 7 LAITTEISTON KOKONAISPROSESSI

Alla olevassa kuvassa 11 kokonaisprosessia havainnollistava prosessikaavio, josta käy ilmi myös ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa esitetyt tuotantomäärät.



Kuva 11. Havainnollistava prosessikaavio.<sup>2</sup>

Opinnäytetyössä tutkittava hanke tullaan toteutuessaan rakentamaan kahdessa vaiheessa, jotta laitteisto voidaan todeta toimivaksi. Ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan niin sanottu pilottivaihe, jossa rakennetaan 50 prosenttia ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa mainitusta kapasiteetista (Kuva 11). Jatkossa käsitellään **pilottivaihetta** (PILOT), sekä **korotetun tehon vaihetta** (KTV).

## **8 LAITTEISTON MAHDOLLINEN TOIMITTAJA**

Kappaleessa käydään läpi todennäköisiä toimittajia sekä niiden toimittama tekniikka lyhyesti.

### **8.1 Hiilidioksidin talteenotto**

Hiilidioksidin talteenotto tapahtuu polton jälkeen kemiallisella absorptiolla savukaasusta. Jätteen sisältämää kosteutta kerätään talteen hiilidioksidin talteenoton yhteydessä. Hiilidioksidin talteenotto laitoksen toimittavat yhdessä suomalainen WOIMA Corporation sekä norjalainen CO2 Capsol.<sup>5</sup>

### **8.2 Elektrolyyseri**

Tällä hetkellä kaupallisia PEM-elektrolyysereitä toimittavat ainakin Proton, McPhy, Nel, Cummins, Siemens sekä MAN. Näistä on kuitenkin vaikeaa tällä hetkellä päätellä, mikä toimittajista tulee Westenergyille kyseisen laitoksen toimittamaan. Näistä Euroopassa toimivia ovat norjalainen Nel sekä saksalaiset Siemens ja MAN. Toimittajaksi valittiin tässä kohtaa Nel.

### **8.3 Metanointilaitos**

Tällä hetkellä varteenotettavia metaanintuotantolaitoksen toimittajia ovat biologista katalyyttiä käyttävät Q Power, Electrochaea, microbEnergy sekä kemiallista katalyyttiä käyttävät Wärtsilä, MAN Energy Solutions, Inova (Hitachi Zosen) tai Haldor Topsoe. Näistä voidaan heti sulkea pois biologista katalyyttiä käyttävät toimittajat, koska todennäköisesti tässä projektissa tullaan käyttämään kemiallista katalyyttiä. Näistä kemiallista katalyyttiä käyttävistä toimittajista todennäköisin vaihtoehto on Haldor Topsoe.

#### 8.4 Metaanin nesteytyslaitos

Hankkeen nesteytyslaitoksen toimittajasta ei ole tietoa. Mahdollinen toimittaja voisi olla Wärtsilä. Wärtsilä on suomalainen yhtiö, jolla on monikylmäainetekniikkaan perustuvia tuotteita. Wärtsilä on paikallinen toimija, joka kuuluu myös projektin konsortioon. Wärtsilä on toimittanut vuonna 2013 sekä 2017 Norjaan biokaasun nesteytyslaitokset, jotka perustuvat sen uuteen monikylmäainetekniikkaan. Wärtsilä valittiin myös vuonna 2021 toimittajaksi maailman suurimmalle bioLNG-tuotantolaitokselle, joten voidaan todeta, että sen käyttämä tekniikka on todettu toimivaksi. Wärtsilän kehittämä uusi monikylmäainetekniikka käyttää syötettävän kaasun ja kylmäaineen viilentämiseen glykolia yleisemmin käytettävän propanin sijaan. Tämän ansiosta sen nesteytyslaitos on huomattavasti yksinkertaisempi ja kustannuksiltaan alhaisempi toteuttaa.<sup>2 4 21 22</sup>

## 9 PROSESSISSA KÄYTETTÄVIEN VESIEN LAATUVAATIMUKSET JA KÄSITTELY

Tässä kappaleessa tutkitaan, miten Mustasaaren vesijohtovesi ja savukaasupesurilta kerääntyvä puhdistettu lauhde soveltuvat PEM-elektrolyysin käyttöön.

PEM-elektrolyysi vaatii ASTM D1993-91 standardin mukaista vettä. Standardin tyyppi 1:ssä on määritelty veden sähkönjohtavuudeksi korkeintaan 18  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH:n kannalta vaatimuksia ei ollut. Nämä arvot riittävät meille, jotta voimme todeta, että kaikki käytössämme oleva vesi täytyy puhdistaa ennen niiden käyttöä elektrolyysissä. Mustasaaren vesijohtoveden sähkönjohtavuus on noin 523  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , joten tämä täytyy myös puhdistaa ennen käyttöä. Westenergyn savukaasupesurilta saamme jatkuvasti tietoa järjestelmämme kautta puhdistetun lauhteen laadusta. Vuoden 2021 lauhteen sähkönjohtavuuden keskiarvo on noin 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , tämä selviää liiteluettelosta löytyvästä lauhtetieto Excelistä.<sup>27 28 29</sup>

### 9.1 Veden kulutus sekä hyödyntäminen

Synteettisen metaanin valmistuksessa vettä kuluttavia prosesseja ovat PEM-elektrolyysillä toimiva vetylaitos, metaanintuotantolaitos sekä veden demineralisointilaitos.

Synteettisen metaanin tuotannosta sekä Westenergyn jäte-energiailaitokselta syntyy jätevesivirtoja, joita tullaan mahdollisesti hyödyntämään vedyntuotannossa.

---

<sup>27</sup> Cummins. 2020. HyLYZER® WATER ELECTROLYZERS.

<sup>28</sup> Mustasaaren kunta. 2022. Veden laaturaportti.

<sup>29</sup> American Society for Testing and Materials. *WATER QUALITY STANDARDS D1193-91*

Mahdollisia hyötykäytettävän veden lähteitä ovat hiilidioksidin talteenotto, meta-  
nointilaitos sekä Westenergyn savukaasupesuri.

Veden demineralisointi pienentää hieman veden kokonaismassaa. Vedenlaatua tarkastelevassa kappaleessa todettiin, että pesurilta tuleva vesi on lähes puhdasta, joten sitä ei todennäköisesti kulu suuria määriä demineralisoinnissa. Muualta tulevat määrät ovat pieniä. Edellä mainittujen arvioiden perusteella veden demineralisoinnista aiheutuvaa vedenkulutusta ei oteta huomioon.

Seuraavissa kappaleissa on laskelmia ja erilaisia skenaarioita korotetun tehon vaiheelle (**KTV**) sekä pilottivaiheelle (**PILOT**). Laskuissa käytetyt lauhdeveden arvot perustuvat liitteenä olevaan lauhdetieto Exceliin.

### 9.1.1 Perustuotannon vedenkulutukset korotetun tehon vaiheessa

Taulukosta 2 selviää korotetun tehon vaiheen laitteiston veden kulutus sekä hyödynnettävän veden määrä perustuotannon aikana.

**Taulukko 2.** Perustuotannon arvot, KTV.

Laitteisto	Kulutus (m <sup>3</sup> /h)	Hyödynnettävä vesivirta (m <sup>3</sup> /h)
Elektrolyyseri	9,4	-
Metanointilaitos	6,6	0,2
Hiilidioksidin talteenotto	-	0,2
Savukaasupesuri	Ei huomioon otettava.	3,0

### 9.1.2 Elektrolyserin veden käyttö

PEM-elektrolyysiä stoikiometrisesti tarkastellen vettä kuluu noin yhdeksän litraa tunnissa mutta suurin osa tarkastelluista valmistajista ei kuitenkaan aivan tähän pääse.

Tarkasteltu mahdollinen toimittaja Nel ei ilmoita vedenkäyttöä koskevia tietoja, joten tarkastellaan veden käyttöä muiden toimittajien ilmoittamien vesimäärien avulla.

PEM-elektrolyseri käyttää demineralisoitua vettä. Cumminssin ja Siemensin ilmoittamat demineralisoidun veden määrät **10 l** (Cummins) ja **11 l** (Siemens) yhtä tuotettua vetykiloa kohden. Näitä voidaan käyttää hyvänä viitteenä veden tarvetta laskiessa. Hydrogenicsin julkaisun mukaan yhtä kiloa vetyä kohden tarvitaan noin **15,5 l** käsittelemätöntä vettä. Vettä menee myös laitoksen viilennykseen, jota ei oteta opinnäytetyössä huomioon.<sup>30</sup>

Toimittajien sekä ympäristövaikutusten arviointiohjelman tietojen pohjalta laskeaan elektrolyserin veden kulutus. Elektrolyserin vedyntuotto tehoksi on määritetty ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa 10 500 Nm<sup>3</sup>/h, joka tarkoittaa 942,9 kilogrammaa vetyä tunnissa.

Veden kulutus perustuotannon aikana on toimittajien mukaan demineralisoidulla vedellä (10–11 l) vetykiloa kohden. Laskuissa on käytetty veden kulutukselle arvoa 10 litraa vetykiloa kohden. Veden kulutuksen arvoksi tulisi edellä mainittujen tietojen perusteella 9 429 litraa tunnissa, joka on noin **9,4 m<sup>3</sup>/h**.

---

<sup>30</sup> WaterSmart solutions Ltd. 2020. Water for the Hydrogen Economy.

### 9.1.3 Metanoinnin vedenkulutus ja kerääntyvä vesivirta

Metanointilaitoksen vedenkulutuksen tietoja ei ollut saatavilla suoraan laitteisto-toimittajien tarjoamista laitteistotiedoista. Arvoja tiedusteltiin siis laitetoimittajilta.<sup>31</sup>

Metanointilaitos kuluttaa vettä noin 18,6 m<sup>3</sup>/h ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa mainittujen arvojen puitteissa, josta kuitenkin noin 12 m<sup>3</sup>/h korvataan laitteiston sisäisellä kondenssiveden kierrolla. Laitteisto kuluttaa demineralisoitua vettä **6,6 m<sup>3</sup>/h**.

Metanointilaitokselta kerääntyy ulospuhalluksen mukana rejektivettä **0,2 m<sup>3</sup>/h**, joka voidaan mahdollisesti puhdistaa ja ajaa takaisin demineralisoidun veden säiliöön.

### 9.1.4 Hiilidioksidin talteenotosta kerääntyvä vesivirta

Hiilidioksidin talteenoton vesivirroista ei tietoja ollut saatavilla, joten sitä kysyttiin erikseen toimittajalta ja arvoksi ilmoitettiin **0,2 m<sup>3</sup>/h** tunnissa.

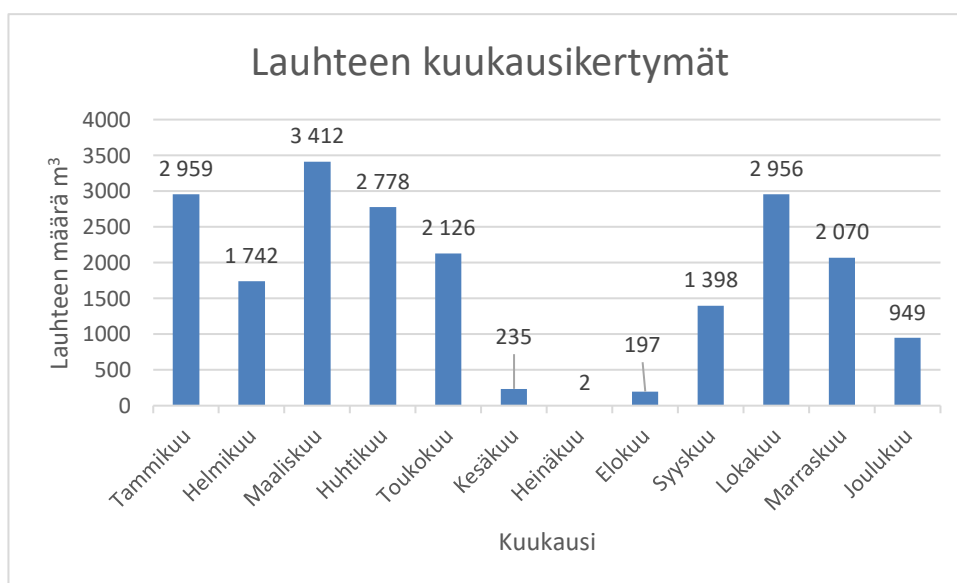
### 9.1.5 Pesurilta kerääntyvä vesivirta

Westenergyn jäte-energiailaitoksen sivutuotteena muodostuu monenlaista jäte- sekä hulevettä. Savukaasupesurilta talteen otettu lauhde on määrältään ainoa hyödynnettäväksi kelpaava vesivirta.

---

<sup>31</sup> Westenergy Oy Ab. 2022. Opinnäytetyöpalaveri.

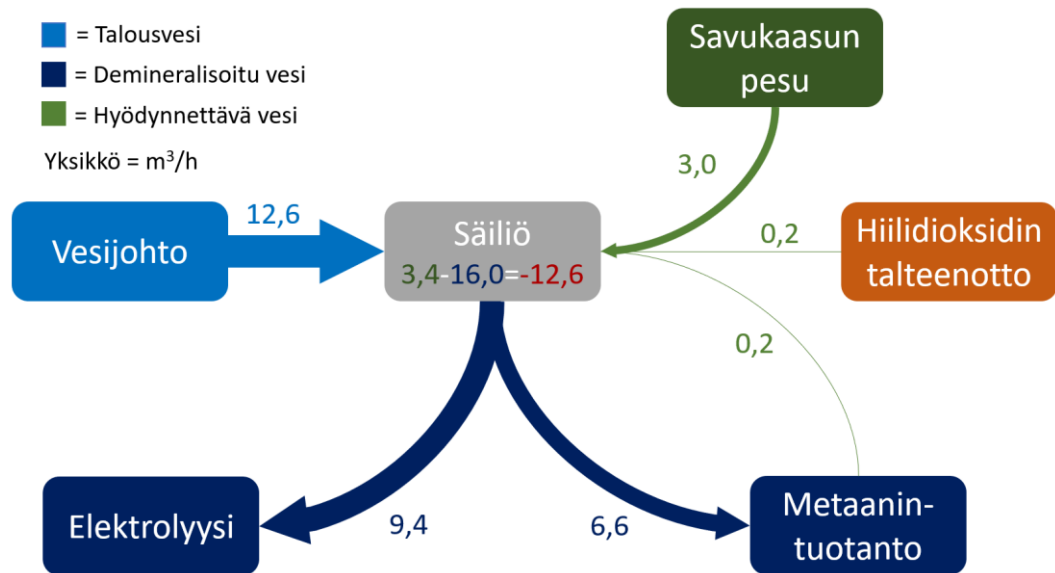
Savukaasupesurilta kerääntyvä lauhde puhdistetaan ensin hiekkasuodattimella ja tämän jälkeen vielä käänteisosmoosin avulla. Puhdistuksen jälkeen lauhde palautetaan savukaasupesurille uudestaan käytettäväksi tai se ajetaan kunnan viemäriin, jos veden tarve pienempi kuin lauhteen muodostuminen. Kesäkuukausina lauhdetta ei muodostu, sillä laitosta ajetaan pienemmällä kuormalla, jolloin pesuri on kokonaan pois käytöstä tai todella pienellä teholla.



**Kuva 12.** Havainnekuva, Lauhteen kuukausikertymät.

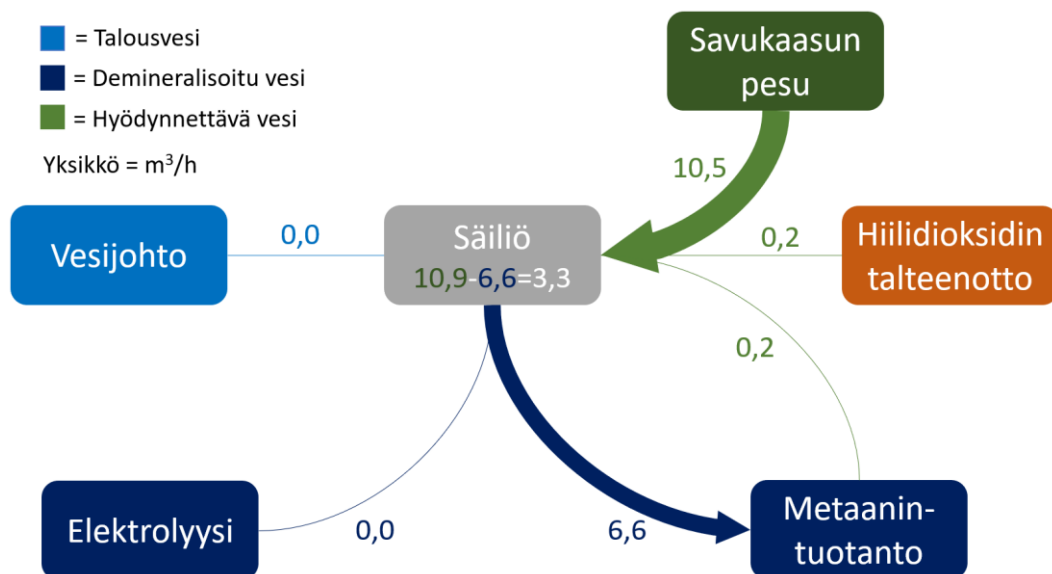
Kuvassa 12 näkyy vuoden 2021 lauhteen muodostuksen kuukausikertymät. Kuvaajaa tulkitessa voidaan todeta, että kesä-, heinä- sekä elokuun arvot ovat niin pieniä, että ne voidaan jättää huomioimatta laskuissa, tällöin keskiarvoksi tulee noin 2 212 m<sup>3</sup>, jolloin tuntikeskiarvo on noin **3,0 m<sup>3</sup>/h**.

### 9.1.6 Vedenkulutuksen vesitaseita erilaisissa skenaarioissa korotetun tehon vaiheessa



**Kuva 13.** Tilanne 1, Perustuotanto (KTV).

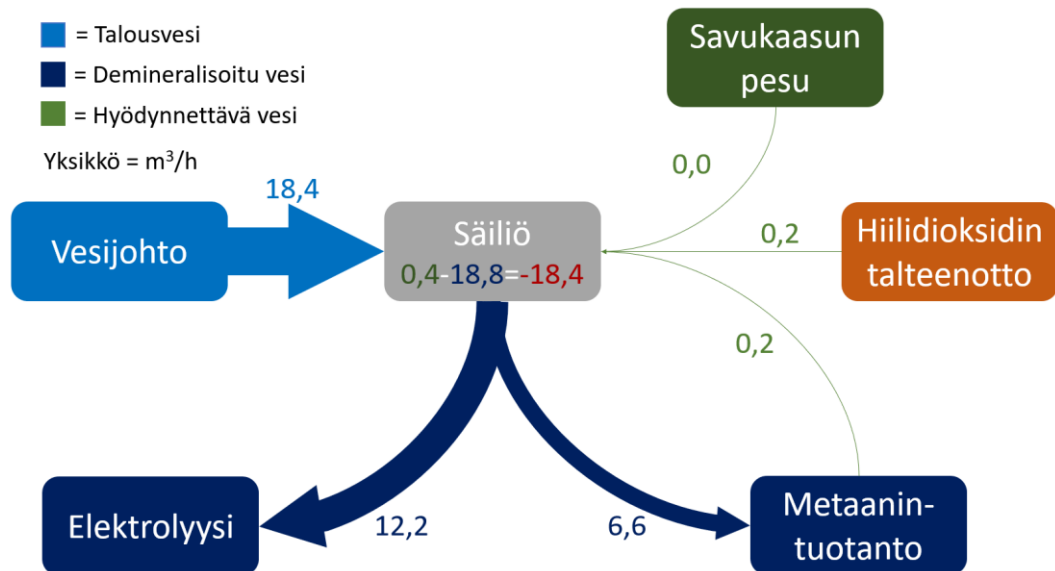
Kuvasta 13 voidaan tulkita, että veden kulutus on suurempaa kuin sen kierrätys. Säilytyksen kanssa ei tule ongelmia, mutta vettä on ostettava.



**Kuva 14.** Tilanne 2, Elektrolyyseri pois päältä ja savupesuri korkeimmalla hetkittäisellä teholla (KTV).

Kuvasta 14 voidaan tulkita, että vettä kertyy hieman alle 4 m<sup>3</sup>/h, joten tämä vaikuttaa varastoinnin kapasiteettiin.

Arvo **10,5 m<sup>3</sup>/h** on tulkittu lauhteen hetkellisestä tuotosta (28.2.2021, lauhdetieto Excel) seitsemän ensimmäisen tunnin ajalta. Savukaasupesurin lauhteen tuotto voi olla korkeimmillaan jopa 163 m<sup>3</sup> päivässä, jolloin tuntikeskiarvo olisi 6,79 m<sup>3</sup>/h.



**Kuva 15.** Tilanne 3, Savukaasupesurilta ei tule lauhdetta ja elektrolyyseri käytössä maksimikapasiteetilla (**KTV**).

Kuvasta 15 voidaan tulkita, että vettä joudutaan ostamaan suuria määriä. Vettä kuluu lähes 450 m<sup>3</sup> vuorokaudessa.

Perustuotannossa elektrolyyserin käyttämään arvoon 9,4 m<sup>3</sup>/h on otettava joissain tilanteissa huomioon ylimitoituksen kapasiteettikerroin 1,3, jossa otetaan huomioon pörssisähkön hinnanvaihtelu. Vetyä voidaan esimerkiksi tuulisina päivinä, sähkön hinnan ollessa alhainen, tuottaa hieman enemmän varastoon. Elektrolyyseri kuluttaa noin **12,2 m<sup>3</sup>/h** vettä, kun kapasiteettikerroin otetaan huomioon.

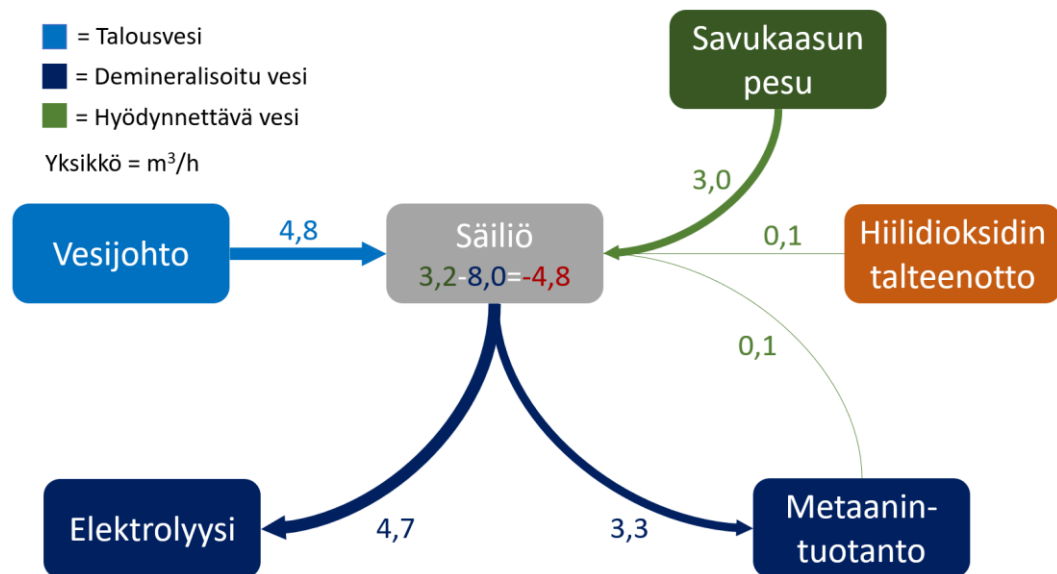
## 9.2 Perustuotannon pilottivaiheen arvot

Pilottivaiheessa rakennetaan 50 prosenttia prosessin kapasiteetistä. Veden kulutuksen ja tuoton arvot puolittuvat kaikkialla muualla paitsi savukaasupesurilla, sillä tämä on synteettisen metaanin tuotantoprosessiin kuulumaton.

**Taulukko 3.** Synteettisen metaanintuotannon veden kulutus ja käyttö.

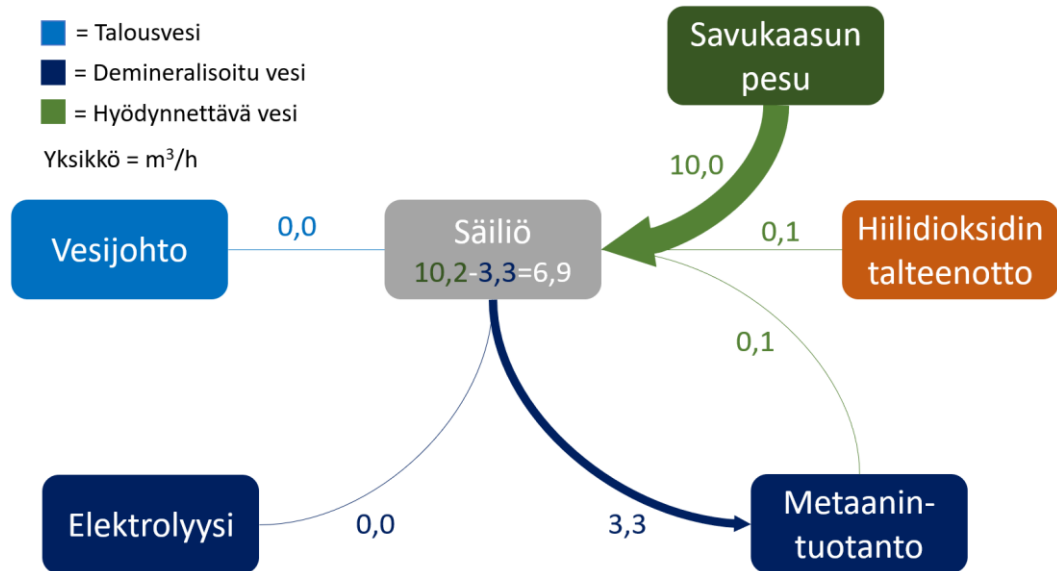
Laitteisto	Kulutus (m <sup>3</sup> /h)	Hyödynnettävä vesivirta (m <sup>3</sup> /h)
Elektrolyyseri	4,7	-
Metanointilaitos	3,3	0,1
Hiilidioksidin talteenotto	-	0,1
Savukaasupesuri (Ei tarvitse puolittaa, sillä ei liity prosessiin)	Ei tarvitse ottaa huomioon.	3,0

### 9.2.1 Vedenkulutuksen vesitaseita erilaisissa skenaarioissa pilottivaiheessa



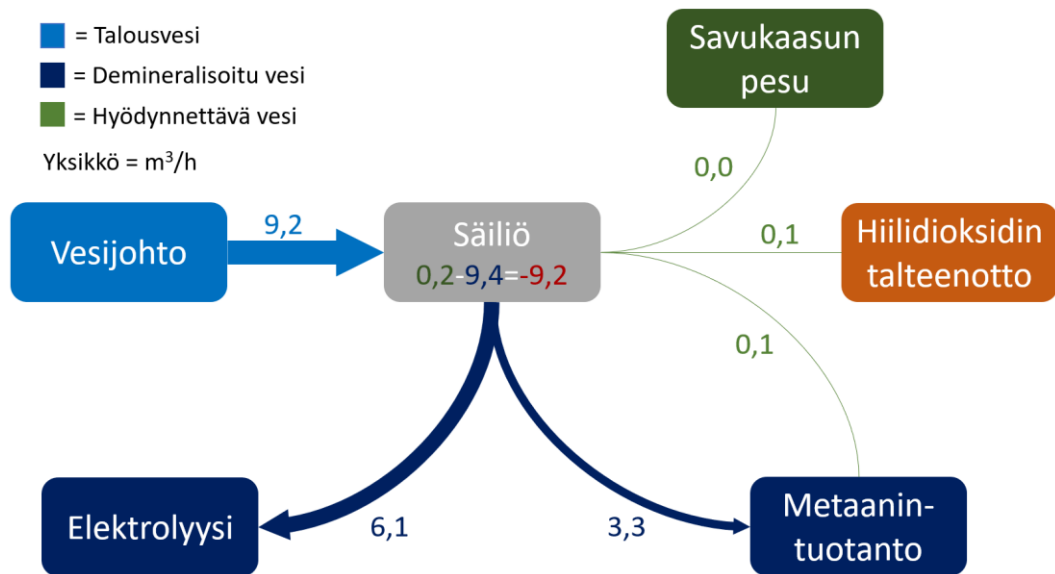
**Kuva 16.** Tilanne 1, Perustuotanto (PILOT).

Kuvasta 16 voidaan tulkita, että vettä joudutaan ostamaan, joten varastoimisen kanssa ei tule ongelmia.



**Kuva 17.** Tilanne 2, Elektrolyyseri pois päältä ja pesuri korkeimmalla hetkittäisellä teholla (**PILOT**).

Kuvasta 17 voidaan tulkita, että vettä kertyy noin seitsemän kuutiota. Tämä pitää siis huomioida säiliön mitoituksessa.



**Kuva 18.** Tilanne 3, Pesurilta ei tule lauhdetta ja elektrolyyseri maksimikapasiteetillä käytössä (PILOT).

Kuvasta 18 voidaan tulkita, että vettä joudutaan ostamaan noin 220 m<sup>3</sup> vuorokaudessa.

Elektrolyyserin arvossa otetaan huomioon kapasiteettikerroin 1,3.

## 10 SÄILYTYS

Opinnäytetyössä yksi tutkittavista aiheista on elektrolyysissä käytettävän veden ja prosessien eri vaiheista syntyvien vesien varastointi sekä varaston koon tarve, jotta voidaan vastata kulutushuippuihin.

Prosessissa käytettävän vedenlaadun osalta sovellettava standardi on ASTM:n demineralisoidun veden standardi D1193-91. Demineralisoitu vesi on vettä, josta on poistettu kaikki latautuneet ionit, jolloin se on täysin puhdasta ja ioni vapaata. Vesi tullaan varastoimaan demineralisoituna vetenä, jotta prosessi ei olisi täysin riippuvainen veden puhdistuslaitoksen toiminnasta.<sup>31</sup>

Veden säilyvyyteen voidaan vaikuttaa oikeilla materiaalivalinnoilla. Demineralisoitua vettä voidaan varastoida joko lasi, muovi tai metallista tehdyissä säiliöissä. Näistä materiaaleista metalli ja muovi soveltuvat parhaiten suurien määrien varastointiin, kun taas lasi soveltuu paremmin pienille määrille. Muovi on näistä parempi vaihtoehto, koska se on kemiallisesti inertti ja korroosion kestävä. Metallia taas ei ole kemiallisesti inertti ja on altis korroosiolle, jos sitä ei valmisteta ruostumattomasta teräksestä.

Lauhdeveden laatua tutkittiin aiemmassa kappaleessa, jossa todetaan, että lauhdevesi täytyy puhdistaa uudelleen ennen sen hyödyntämistä elektrolyysissä. Saatavilla oleva lauhdevesi ei kuitenkaan riitä kattamaan koko veden tarvetta, vaan vettä joudutaan myös ostamaan lisää vesilaitokselta. Hyötykäytettävää vettä on mahdollisesti myös saatavilla metanointiprosessista sekä hiilidioksidin talteenotosta joitakin kuutioita päivässä. Näiden vesien laadusta ei kuitenkaan vielä ole tarkkaa tietoa ja on mietittävä, onko niitä taloudellisesti järkevää siirrellä paikasta toiseen, jos määrät ovat pieniä.

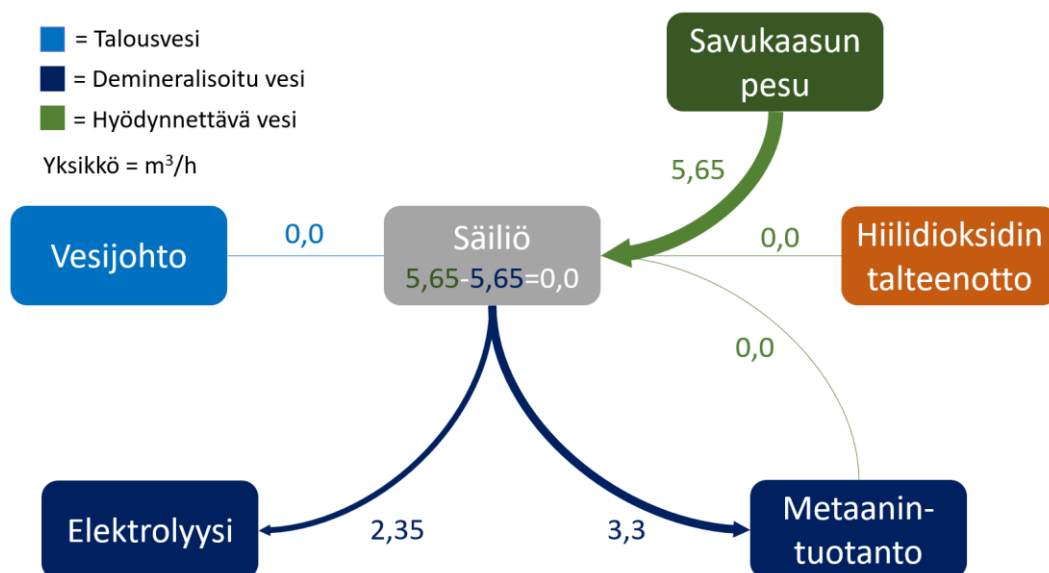
Elektrolyserin veden kulutus sekä lauhdeveden tuotto ei tule olemaan tasaista. Vedyn tuotannossa on kulutushuippuja, jolloin veden tarve on normaalia suurempi. Vuoden aikana on myös hetkiä, jolloin lauhdevettä ei tule lainkaan tai sitä on liikaa. Pohdittavana on, voiko lauhdetta ja metanointiprosessista tulevaa vettä varastoida samassa säiliössä, tai miten ostettavan veden varastointi ja puhdistus toteutetaan.

### **10.1 Savukaasupesurin lauhdeveden vaikutus säiliön mitoitukseen**

Opinnäytetyössä tulkitaan lauhteen vaikutusta varastointiin vain pilottivaiheessa. Vedenkulutus korotetun tehon vaiheen arvoilla (myös kun pesuri on poissa päältä) pysyttelee koko ajan yli  $6,6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Korkein yhden päivän lauhdeveden muodostumisen keskiarvo on  $6,79 \text{ m}^3/\text{h}$ , joten voidaan kulutuksen todeta olevan tuottoa isompaa lähes aina. Hetkellinen tuotto voi olla suurempaa kuin kulutus ja myös tätä täytyy pohtia. Huiput pystytään useimmiten käyttämään korkean tehon vaiheessa heti.

Hiilidioksidin talteenoton ja metaanintuotantolaitoksen jätevesivirtoja ei huomioida säiliön mitoituksessa, sillä nämä ovat pieniä vesivirtoja.

### 10.1.1 Pidempiaikainen kertymä pilottivaiheessa



**Kuva 19.** Havainnekuva, lauhteen pidempiaikaiseen kerääntymiseen tarvittavista olosuhteista.

Kuvasta 19 ilmeneviä olosuhteita mukaillen pitäisi pesurin keskiarvon pysyä yli 5,65 m<sup>3</sup>/h, jotta säiliöön kertyisi vettä. Vuorokauden aikana vettä täytyisi kertyä yli 135,6 m<sup>3</sup>.

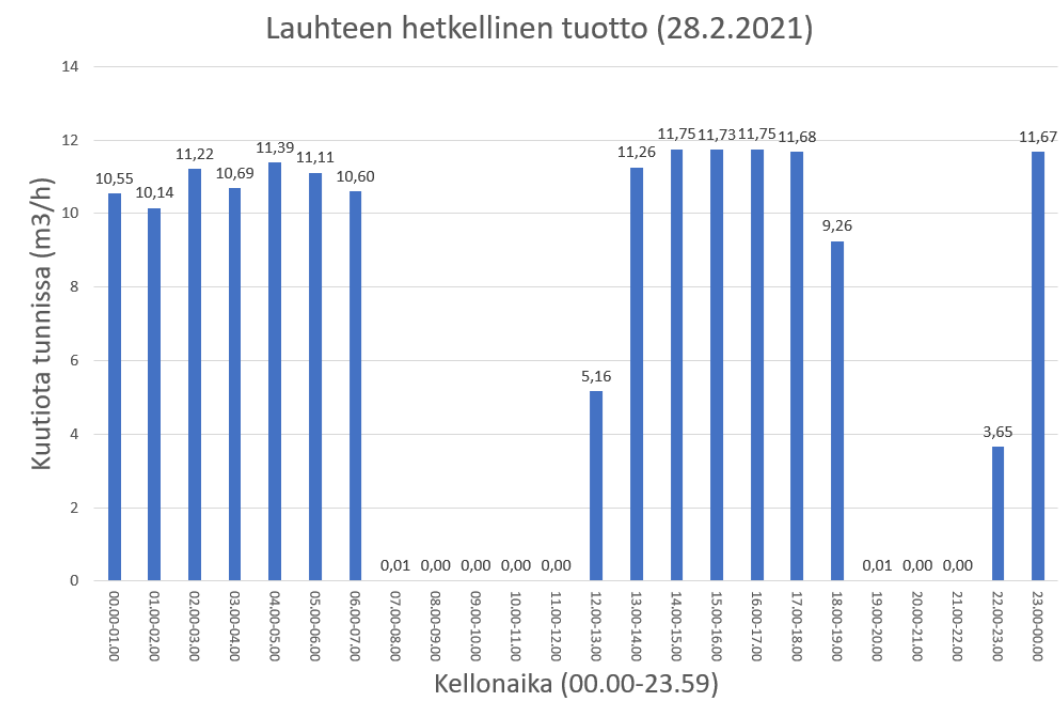
Tarkastellaan lauhtetieto Excelistä, kuinka monena päivänä edellä mainitut olosuhteet ylittyivät ja säiliöön kertyisi vettä. Vuoden 2021 lukuja tarkasteltaessa päivittäinen kuutiomäärä 135,6 ylittyi 17 päivänä ja maksimissaan kolmena perättäisenä päivänä (24.1.2021-26.1.2021).

Arvon ylittävien päivien keskiarvokertymä on 145,6 m<sup>3</sup>, kun tästä otetaan pois päivän aikana elektrolyysilaitoksen (toimissa 50 % teholla) ja metanointilaitoksen yhteenlaskettu kulutus 135,6 m<sup>3</sup> vuorokaudessa, kertyy säiliöön vuorokauden aikana vettä noin 10 m<sup>3</sup>.

Arvioidaan, että pilottivaiheessa täytyisi lauhdevedelle olla vähintään kolmen päivän kertymän verran puskuria eli **30 m<sup>3</sup>**, jolloin vettä ei jouduttaisi ajamaan viemäriin.

### 10.1.2 Hetkellinen kertymä

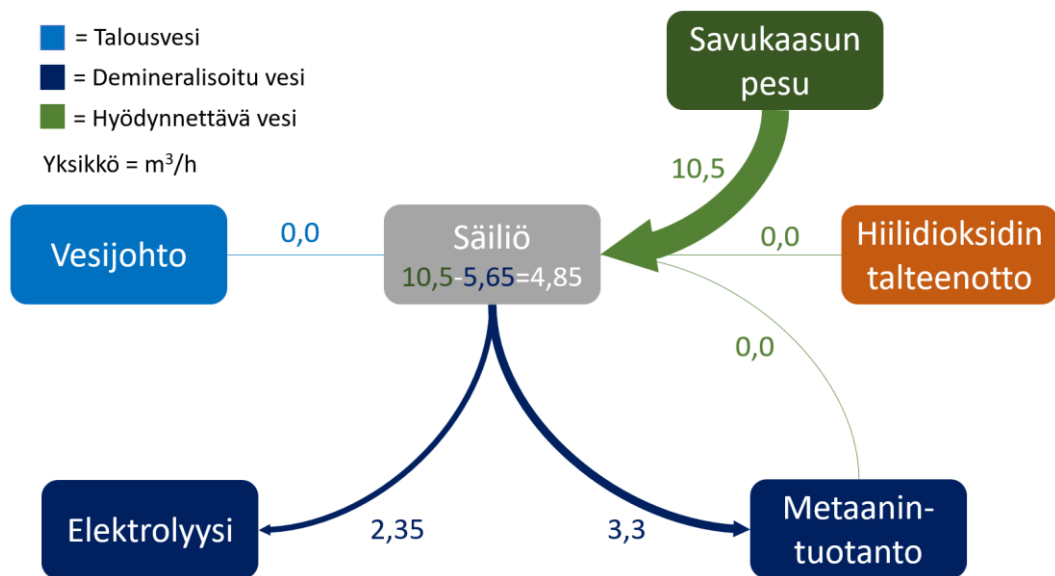
Hetkellistä kertymää tarkastellessa jatketaan samoilla olosuhteilla, mutta tulkitaan vain päivää 28.2.2021, sillä silloin lauhteen muodostuminen oli vuoden korkeinta.



**Kuva 20.** Havainnekuva lauhteen hetkellisestä tuotosta.

Kuvasta 20 voidaan tulkita, että lauhdetta voi hetkellisesti muodostua käytettäväksi noin 10,5 m<sup>3</sup> jopa seitsemän tunnin ajan.

Näiden seitsemän tunnin ajan vesitase näyttää tältä, kun laitteistona toimii pilottilaitteisto ja elektrolyysilaitos on käytössä 50 prosentin teholla.



**Kuva 21.** Havainnekuva, lauhteen hetkellisen piikin aiheuttamasta veden kerääntymisestä.

Kuvan 21 arvojen perusteella seitsemän tunnin aikana lauhdetta kertyisi säiliöön siis noin  $34 \text{ m}^3$ .

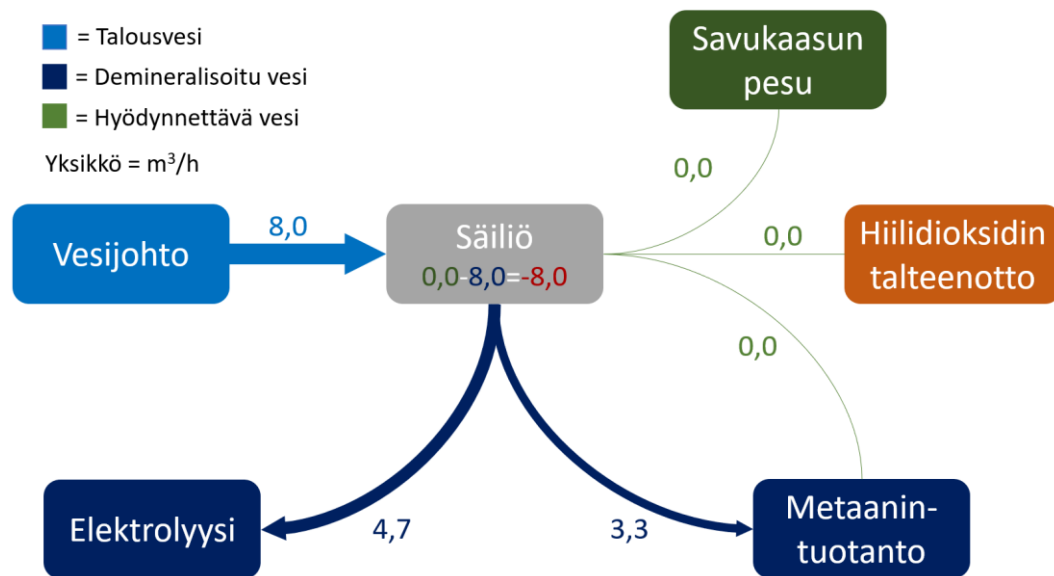
Arvioidaan, että hetkelliselle kulutukselle olisi hyvä varata vähintään  $35 \text{ m}^3$  puskuri kapasiteettia.

## 10.2 Säiliöiden mitoitus

Seuraavissa alakappaleissa lasketaan säiliöiden koot perustuotannolle ilman lauhdeveden huomioimista sekä lauhdevesi huomioiden. Laskuihin on käytetty pilottivaiheen arvoja.

### 10.2.1 Säiliön mitoitus perustuotannolle

Mitoitetaan säiliö pilottivaiheelle alla olevan kuvan 22 perusteella.



**Kuva 22.** Havainnekuva, vuorokausikulutuksen laskemisen tueksi.

Varataan yhden vuorokauden vesireservi säiliöön. Vettä täytyisi säiliössä olla perustuotantoa varten  $8,0 \text{ m}^3 \cdot 24 \text{ h} = 192,0 \text{ m}^3$  eli kun hankitaan säiliö vain perustuotantoa varten **200 m<sup>3</sup>** on riittävä.

### 10.2.2 Säiliö mitoitettuna perustuotannolle sekä pesurin vaatima puskuri

Edellisessä kappaleessa laskettiin, että perustuotantoa varten tarvittaisiin tilavuudeltaan 200 m<sup>3</sup> säiliö. Lisäksi on todettu, että hetkellisiä piikkejä sekä useamman päivän kertymiä varten tarvittaisiin vähintään 35 m<sup>3</sup> lisää puskuria säiliöön. Säiliön tilavuudeksi tulisi tällöin **235 m<sup>3</sup>**.

## 11 KANNATTAVUUSLASKELMAT

Kannattavuutta on tarkasteltu lauhteen varastoinnin tarvitseman kapasiteetin kasvatuksesta tulevien lisäkustannusten kautta, sillä nesteytetyn synteettisen metaanin tuotantolaitoksen rakennuskustannukset eivät vielä ole selvillä. Laskuissa tarkastellaan projektin kannattavuutta viiden vuoden ajalta.

### 11.1 Kokonaiskustannukset

Kokonaiskustannukset koostuvat säiliön, pumpun, vesilinjan rakennuksen ja suunnittelun kustannuksista. Kokonaiskustannusten hinnaksi arvioitiin **95 500 €**.

- 25 000 € (Säiliön lisäpuskuri)
- 50 000 € (Pumppu ja sen elinkaarikustannukset)
- 10 500 € (Suunnittelu)
- 10 000 € (Rakentaminen)

**95 500 € (Kokonaiskustannukset)**

#### 11.1.1 Säiliön kustannukset

Säiliöiden hintoja tiedusteltiin tarjouspyynnöillä muutamilta eri toimittajilta, tarjoukset pyydettiin eristetyille ja eristämättömälle 150, 200 ja 250 m<sup>3</sup> säiliölle. Alla esitettävät tiedot ovat yhdestä näistä tarjouksista ja kustannuslaskelmat on laskettu näiden lukujen perusteella. Tarjous on liitettynä.

Säiliön materiaalina on EN1.4307-1D, ruostumaton teräs. Yhteiden materiaalina EN1.4307 FeZnk –irtolaipoin. Säiliön suunnittelu, valmistus, tarkastus ja dokumentaatio on tehty standardin SFS-EN 14015 mukaisesti. Säiliön pintakäsittelynä on sisäpuolelta peittäus ja ulkopuolelta hitsausseamujen harjaus.

**Taulukko 4.** Säiliön mitat ja kustannukset.

Säiliön tilavuus (m <sup>3</sup> )	150	<b>200</b>	<b>250</b>
Säiliön halkaisija (m)	4,5	5,2	5,7
Säiliön korkeus (m)	10	10	10
Hinta (€)	170 000	190 000	210 000
Hinta eristettynä (€)	200 000	<b>225 000</b>	<b>250 000</b>
Hinnan kasvu (€)	-	+25 000	<b>+25 000</b>

Lauhdetta hyödyntäessä tarvittaisiin 200 m<sup>3</sup> lisäksi 35 m<sup>3</sup> lisäpuskuria säiliön tilavuuteen. Lauhteen hyödyntämisessä olisi kustannustehokkaampaa ja suhteessa edullisempaa investoida 250 m<sup>3</sup> säiliöön, jolloin kustannuksia tulisi **25 000 €** enemmän kuin 200 m<sup>3</sup> säiliölle.

#### 11.1.2 Pumpun kustannukset

Veden siirtämiseksi savukaasupesurilta säiliöön tarvitaan pumpun virtaaman täytyy olla vähintään 12 m<sup>3</sup>/h. Tämän kokoisen pumpun hinta on noin 5 600 €. Yleisenä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että pumpun elinkaaren käyttökustannuksista 85 prosenttia syntyy energiakustannuksista, kymmenen prosenttia huoltokustannuksista ja viisi prosenttia hankintakustannuksista. Tällöin pumpun elinkaarikustannukset edellisiä arvoja tulkiten olisivat 106 400 €.

Pumpun elinkaaren arvioidaan olevan 10 vuotta. Kustannuslaskelmat tehdään viidelle vuodelle, joten tällöin pumpun elinkaarikustannukset ehtivät laskemaan puoleen edellä mainitusta summasta 53 200 €. Pumpun kokonaiskustannukset olisivat tällöin viideltä vuodelta noin 50 000 € pumpun investointikustannus mukaan laskien.<sup>32</sup>

### 11.1.3 Suunnittelun kustannukset

Suunnittelukonsultin keskipalkka on 5 284 €/kk. Arvioidaan suunnittelun kestoksi 2 kuukautta, jolloin suunnittelun kustannuksiksi tulisi noin **10 500 €**.<sup>33</sup>

### 11.1.4 Vesilinjan rakentamisen kustannukset

Vesilinjaan tarvitaan vähintään 60 millimetrin halkaisijalla varustettu vesiputki. Arvioidaan, että putkea tarvitaan pesurilta suunnitellulle paikalle noin 70 metriä. 60,3 mm DN50 ruostumattomasta teräksestä valmistettu putki maksaa 26,80 €/m (alv. 0 %), tällöin putkiston hinnaksi tulisi 1876 €. Eristeiden hinta 70 metrin matkalle on noin 1300 €. Hinnaksi tulisi 3176 € ilman työtä. Arvioidaan koko työn suorituksen hinnaksi noin **10 000 €**.<sup>34</sup>

---

<sup>32</sup> Oy Grundfos pumput Ab. Keskipakopumppu.

<sup>33</sup> Duunitori. Konsultti, palkka.

<sup>34</sup> Cronvall Oy. Ruostumaton teräsputki.

## 11.2 Savukaasupesurin veden hyödyntämisestä kertynyt tuotto

Vuonna 2021 savukaasupesurilta syntyi **20 825 m<sup>3</sup>** lauhdetta, jos tätä ei hyödynnetä täytyisi vesi ostaa Mustasaaren vesilaitokselta. Veden käyttömaksu on **3,50 €/m<sup>3</sup>** (alv. 0 %) se koostuu vesimaksusta 1,30 €/m<sup>3</sup> sekä jätevesimaksusta 2,20 €/m<sup>3</sup>. Hyödynnettäessä kaikki savukaasupesurilta muodostuva lauhde, syntyisi säästöjä vuodessa vesi- ja jätevesimaksuissa noin **72 500 €**.<sup>35</sup>

## 11.3 Kannattavuuden indikaattorit

Projektille havainnollistettiin sen kannattavuutta muutamalla erilaisella kannattavuuden indikaattorilla.

### 11.3.1 Sijoitetun pääoman tuottoprosentti koko sijoitusajalta

Tuottoprosentti viidelle vuodelle laskettuna.

$$\text{ROI} = \frac{\text{voitto}}{\text{pääoma}}, \text{ jossa } \text{ROI} = \text{sijoitetun pääoman tuottoprosentti (1)}$$

pääoma = omapääoma + korolliset velat

voitto = liikevaihto – kulut

$$\frac{72\,500 \text{ €} * 5 \text{ a} - 95\,500 \text{ €}}{95\,500 \text{ €}} = 2,7958 \approx \mathbf{280\%}$$

Yleensä sijoitetun pääoman tuottoprosenttia käytetään indikaattorina lyhyen ajan sijoituksille, joten arvo kertoo vain sen, että viiden vuoden päästä sijoitukselle on syntynyt kasvua lähes 280 prosenttiyksikköä.

---

<sup>35</sup> Vesihuoltolaitoksen-hinnasto. 2016.

### 11.3.2 Vuositasolla laskettu tuotto-% (ARR)

Lasketaan tuotto-% vuositasolla, sillä tämä kuvaa paremmin sijoitetun omaisuuden tuottoa vuosittain.

$$\text{ARR} = [(1 + \text{ROI})^{\frac{1}{n}} - 1]$$

ARR = vuotuinen tuotto-% (2)  
 ROI = sijoitetun pääoman tuotto-%  
 n = investoinnin aika vuosina

$$\text{ARR} = [(1 + 2,79)^{1/5} - 1] \approx \mathbf{30 \%}$$

Tämän laskemiseen käytettiin koko viiden vuoden sijoituksen tuotto-%:ta (2,79 %).

Sijoitetun pääoman tuottoasteiden viitearvojen mukaan yli 15 prosentin tuottoasteen saavuttava investointi on erittäin hyvä. Tätä viitearvoa tulkiten sijoituksen tuotto-% noin **30** voidaan tulkita **erittäin kannattavaksi**.<sup>36</sup>

---

<sup>36</sup> Almatalent. Sijoitetun pääoman tuotto-%.

### 11.3.3 Takaisinmaksuaika

$$n^* = \frac{H}{S}, \text{ jossa}$$

$n^*$  = takaisinmaksuaika vuosina (3)

H = hankintahinta

S = saatu tuotto

$$n^* = \frac{95\,500 \text{ €}}{72\,500 \text{ €}} = 1,317 \text{ a}$$

Projektin takaisinmaksuaika olisi hieman yli vuoden ja neljä kuukautta. Projektille annettu aika on viisi vuotta eli tuottavia vuosia olisi hieman yli kolme vuotta, jolloin kuluja ei teoriassa olisi lainkaan.

## 12 TULOKSET

Kerättyjen tietojen sekä ympäristövaikutusten arviointiohjelman perusteella käytettäväksi tekniikaksi rajattiin poltonjälkeinen hiilidioksidin talteenotto absorptiolla, vedyn valmistus PEM-elektrolyysillä, metaaniin valmistus kemiallisella katalyytillä ja sen nesteytys monikylmäinetekniikalla. Näiden perusteella voitiin tulkitä, että hyödynnettäviä vesivirtoja syntyy savukaasupesurilta, hiilidioksidin talteenotosta sekä metaanin valmistuksesta. Vettä kuluttavia prosesseja ovat vedyn tuotanto, metaanin valmistus sekä veden demineralisointi.

Lauhdevesi ei tule kattamaan koko synteettisen metaanintuotannon vaatimaa veden tarvetta, joten vettä täytyy myös ostaa. Tuotannon tila sekä sen teho vaikuttavat kerääntyvän lauhteen määrään. Savukaasupesurin lauhdevesi sekä Mustasaaren vesilaitoksen vesi täytyy puhdistaa ennen käyttöä vedyn tuotannossa. Lauhde on kuitenkin suhteessa huomattavasti puhtaampaa kuin ostettava vesi.

Säiliön kokoa tutkittiin vain pilottivaiheelle, sillä myöhemmässä vaiheessa veden kulutus on suurempaa kuin lauhteentuotto. Veden keskiarvokertymä ylittyi elektrolyysin ollessa puolella teholla 17 päivänä, ja maksimissaan kolmena perättäisenä päivänä. Tällöin pidempiaikaisesti vettä kertyy maksimissaan 30 m<sup>3</sup>. Hetkellisesti vettä voi kertyä jopa 34 m<sup>3</sup> seitsemän tunnin aikana.

Perustuotantoa varten varattiin yhden vuorokauden vesireservi säiliöön 200 m<sup>3</sup>. Lauhteen hyödyntämiseen, tarvitaan hetkellisiä piikkejä sekä useamman päivän kertymää varten 35 m<sup>3</sup> puskuria säiliön tilavuuteen. Säiliöistä pyydettiin tarjouksia 50 m<sup>3</sup> välein, näistä parhaiten lauhdeveden hyödyntämiseen soveltuisi 250 m<sup>3</sup> säiliö. Todettiin että vesi varastoidaan demineralisoidun veden standardin mukaisesti demineralisoituna vetenä ja sen varastoimiseen parhaiten soveltuvat materiaalit ovat muovi ja metalli.

Projektin kokonaiskustannuksiksi arvioitiin noin 95 500 euroa ja vuodessa veden hyödyntämisestä kertyvää säästöä noin syntyy 72 500 euroa. Vuositasolle laskettu tuotto prosentti projektin toimiaikana käytettäessä viittä vuotta on noin 30 prosenttia ja takaisinmaksuaika projektille on noin vuoden ja neljä kuukautta.

## 13 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia Westenergyn jäte-energiälaitoksen lauhdeveden hyötykäyttöä osana elektrolyysiä, sen taloudellista kannattavuutta ja teknistä toteutusta. Tutkittiin tarkemmin säiliön mitoitusta, hyödynnettävän lauhdeveden laadua ja sen vaikutusta hyödyntämiseen sekä erilaisia tilanteita lauhdeveden hyödyntämisessä.

Tulokseksi saatiin, että lauhdeveden hyödyntäminen ja sen varastointiin tarvittavaan säiliöön investointi olisi kannattavaa. Projekti on toteuttamiskelpoinen, kun prosessissa käytettävä tekniikka on selvillä. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta lauhteen hyötykäytön edut ja sen kannattavuus sekä soveltaa opinnäytetyössä saatuja tuloksia päätöksenteon tukena. Lisäksi projektiin investoimista tukee tämänhetkinen ilmastopolitiikka sekä mahdollisuus imagohyödyn hyödyntämiseen.

Työssä rajoittavia tekijöitä olivat tuotannon epätasaisuus, tekniikan varhainen kehitysaste ja tietojen epätarkkuus, koska kaikkea tietoa ei ollut vielä saatavilla. Prosessin mahdollisia huoltoseisokkeja ja häiriötilanteita ei otettu tässä työssä huomioon, vaikka mahdollisia vaikutuksia lauhdeveden varastointiin onkin.

Lisätutkimusten kohteena voisi myös olla lauhteen ja kunnanveden varastointi ja puhdistus yhdessä vai erikseen sekä lauhdeveden säilytyksen ja puhdistuksen irrottaminen EnergySampo CCU -hankkeesta, jolloin Westenergy voisi myydä puhdistetun lauhteen vetylaitoksen käyttöön ja tarvittaessa käyttää sitä myös omassa prosessissaan.

## LÄHTEET

Almatalent. Sijoitetun pääoman tuotto-%. Viitattu 22.12.2022. <https://www.almatalent.fi/tunnuslukuopas/kannattavuus/sijoitetun-paaoman-tuotto-prosentit-roi/>.

American Society for Testing and Materials. WATER QUALITY STANDARDS D1193-91.

Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO<sub>2</sub>. 2022. Ruggero Bellini, Ilaria Bassani, Arianna Vizzarro, Annalisa Abdel Azim, Nicolò Santi Vasile, Candido Fabrizio Pirri, Francesca Verga and Barbara Menin. Viitattu 15.10.2022. [https://www.researchgate.net/publication/360996408\\_Biological\\_Aspects\\_Advancements\\_and\\_Techno-Economical\\_Evaluation\\_of\\_Biological\\_Methanation\\_for\\_the\\_Recycling\\_and\\_Valorization\\_of\\_CO2](https://www.researchgate.net/publication/360996408_Biological_Aspects_Advancements_and_Techno-Economical_Evaluation_of_Biological_Methanation_for_the_Recycling_and_Valorization_of_CO2).

Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency. 2019. Davis Rusmanis, Richard O’Shea, David M. Wall, and Jerry D. Murphy. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6844437/>.

Business Finland. 2020. National hydrogen roadmap. Viitattu 10.10.2022. [https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf\\_national\\_hydrogen\\_roadmap\\_2020.pdf](https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf).

Cronvall Oy. Ruostumaton teräsputki. Viitattu 22.12.2022. [https://www.cronvall.fi/epages/CronvallShop.sf/fi\\_FI/?ObjectPath=/Shops/CronvallShop/Products/1100058&ViewAction=ViewProduct&SearchParams=%7B%22K%C3%83%C2%A4sittely%22%3A%22Peitattu%22%2C%22Materiaali%22%3A%22RST%22%7D](https://www.cronvall.fi/epages/CronvallShop.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/CronvallShop/Products/1100058&ViewAction=ViewProduct&SearchParams=%7B%22K%C3%83%C2%A4sittely%22%3A%22Peitattu%22%2C%22Materiaali%22%3A%22RST%22%7D).

Cummins. 2020. HyLYZER® WATER ELECTROLYZERS. Viitattu 8.12.2022. <https://www.cummins.com/sites/default/files/2021-08/cummins-hylyzer-1000-specsheet.pdf>.

Duunitori. Konsultti, palkka. Viitattu 22.12.2022. <https://duunitori.fi/palkat/konsultti>.

Etima. 2021. POWER-TO-X TECHNOLOGIES. Viitattu 15.10.2022. [https://www.researchgate.net/publication/355827973\\_POWER-TO-X\\_TECHNOLOGIES](https://www.researchgate.net/publication/355827973_POWER-TO-X_TECHNOLOGIES).

Fraunhofer ISE. 2021. COST FORECAST FOR LOW TEMPERATURE ELECTROLYSIS – TECHNOLOGY DRIVEN BOTTOM-UP PROGNOSIS FOR PEM AND ALKALINE WATER ELECTROLYSIS SYSTEMS. Viitattu 1.11.2022. [Cost forecast for low temperature electrolysis Wind industry in Germany \(windindustry-in-germany.com\)](https://www.windindustry-in-germany.com/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis).

Hydrogen Production Technologies. 2020. Suttichai Assabumrungrat, Suwimol Wongsakulphasatch, Pattaraporn Lohsoontorn Kim and Alírio E. Rodrigues. Viitattu 15.10.2022. <https://www.mdpi.com/books/pdfdownload/book/3335>.

IPCC. 2007. Bert Metz, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, Leo Meyer. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Viitattu 14.11.2022.

IRENA. 2020. GREEN HYDROGEN COST REDUCTION. Viitattu 14.10.2022 <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.

Jätelaitosyhdistys ry. Energianhyödyntäminen ja arinapoltto. Viitattu 26.9.2022. <http://vanha.jly.fi/energia1.php?treeviewid=tree3&nodeid=1>.

Merinova. 2022. Sari Kola vastaamaan EnergySampo-ekosysteemi-kehityksestä Merinova oy:llä. Viitattu 24.9.2022 <https://www.merinova.fi/uutiset/vaasan-seutu/sari-kola-vastaamaan-energysampo-ekosysteemi-kehityksesta-merinova-oylla/>.

Methanation of CO<sub>2</sub> - storage of renewable energy in a gas distribution system. 2020. Tanja Schaaf, Jochen Grünig, Markus Roman Schuster, Tobias Rothenfluh and Andreas Orth. Viitattu 15.10.2022. <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-014-0029-1>.

Mustasaaren kunta. 2022. Veden laaturaportti. Viitattu 8.12.2022. <https://mustasaari.fi/asuminen-ja-yhteiskunta/vesihuoltolaitos/veden-laatu>.

Oy Grundfos pumpput Ab. Keskipakopumppu. Viitattu 22.12.2022. <https://product-selection.grundfos.com/fi/products/nb-nbe-nbe-series-2000/nbe/nbe-32-125142-99103564?tab=variant-specifications&pumpsystemid=1724461481>.

Pauli Jumppanen. 2009. Vety energiantuotannossa. Viitattu 1.10.2022. [http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek\\_42\\_4\\_2009\\_4.pdf](http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek_42_4_2009_4.pdf).

Power-to-Gas: Technology and Business Models. 2014. Markus Lehner, Robert Tichler, Horst Steinmüller, Markus Koppe.

Prizztech Oy. 2021. METHANATION PLANT – MERI-PORI. Viitattu 22.11.2022. [https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/final-report\\_rev2.pdf](https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/final-report_rev2.pdf).

Ramboll Oy. 2022. YVA-ohjelma, synteettisen metaanin valmistus, Westenergy Oy, Mustasaari (pdf). Viitattu 24.9.2022. <https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi-luvut-ja-ymparistovaikutusten-arviointi/Ymparistovaikutusten-arviointi/YVAhankkeet/Synteettisen-metaanin-valmistus-Mustasaari>.

Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. 2016. Manuel Götz, Jonathan Lefebvre, Friedemann Mörs, Amy McDaniel Koch, Frank Graf, Siegfried Bajohr, Rainer Reimert, Thomas Kolb. Viitattu 15.10.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301610>.

Soile Javarus. 2016. Savukaasupesurin lämpövirrat ja hukkalämmön talteenotto. Viitattu 26.9.2022. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114037/Javarus\\_Soile.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114037/Javarus_Soile.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

State of the Art and Perspectives of CO2 Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications. 2014. Manuel Götz, Amy McDaniel Koch, Frank Graf. Viitattu 6.11.2022. (PDF) [State of the Art and Perspectives of CO2 Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications \(researchgate.net\)](#).

Thermodynamic comparison of three small-scale gas liquefaction systems. 2017. Nguyen, Tuong-Van; Rothuizen, Erasmus Damgaard; Markussen, Wiebke Brix; Elmegaard, Brian. Viitattu 7.12.2022. [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portal-files/portal/136893568/paper\\_postECOS2016\\_LNG\\_postprint.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portal-files/portal/136893568/paper_postECOS2016_LNG_postprint.pdf).

Tilastokeskus. 2022. Yhdyskuntajätteet Suomessa käsittelytavoittain, 2018–2020. Viitattu 07.10.2022. [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_jate/statfin\\_jate\\_pxt\\_12cv.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_jate/statfin_jate_pxt_12cv.px/).

Vaasan yliopisto Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. 2020. Techno-economic analysis of biomethane liquefaction processes. Viitattu 15.10.2022. [https://www.uwasa.fi/sites/default/files/2021-05/WP1%20Techno\\_economic%20analysis%20of%20biomethane%20liquefaction%20processes\\_revised2.pdf](https://www.uwasa.fi/sites/default/files/2021-05/WP1%20Techno_economic%20analysis%20of%20biomethane%20liquefaction%20processes_revised2.pdf).

Vesihuoltolaitoksen-hinnasto. 2016. Mustasaaren vesihuoltolaitoksen-hinnasto. Viitattu 22.12.2022. <https://mustasaari.fi/wp-content/uploads/2021/02/Vesihuoltolaitoksen-hinnasto-22.1.2016.pdf>.

WaterSmart solutions Ltd. 2020. Water for the Hydrogen Economy. Viitattu 6.11.2022. [https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy\\_WaterSMART-Whitepaper\\_November-2020.pdf](https://watersmartsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/12/Water-for-the-Hydrogen-Economy_WaterSMART-Whitepaper_November-2020.pdf).

Westenergy Oy Ab. 2020. Savukaasupesuri siivitti Westenergyn kaukolämpöennätykseen. Viitattu 26.9.2022. <https://westenergy.fi/savukaasupesuri-siivitti-westenergyn-kaukolampoennatykseen/>.

Westenergy Oy Ab. 2022. kuukausipalaveri. 30.9.2022. Petri Suomela.

Westenergy Oy Ab. 2022. Opinnäytetyöpalaveri. 20.9.2022. Petri Suomela.

Westenergy Oy Ab. 2022. Nettisivut. Viitattu 22.9.2022. [www.westenergy.fi](http://www.westenergy.fi).

Woima Corporation. 2022. CLIMATE POSITIVE SYNTHETIC METHANE PRODUCTION STARTS IN THE VAASA REGION IN 2025. Viitattu 22.11.2022. <https://woimacorporation.com/climate-positive-synthetic-methane-production-starts-in-the-vaasa-region-in-2025/>.

Wärtsilä Oyj. 2013. FUEL GAS HANDLING SYSTEM AND BOG RELIEFACTION FOR LNG CARRIER. Viitattu 15.10.2022. <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/ogi/lng-solutions/presentation-o-ogi-ppt-df-2-stroke-gas-handling.pdf>.



## LIITTEET

Liite 1. Salassa pidettävä aineisto, Lauhdetieto Exceli

Liite 2. Salassa pidettävä aineisto, Säiliö tarjous

Liite 3. Wärtsilä, monikylmäainetekniikka

