

Markus Luukkonen

VEDYN JATKOJALOSTUS METANOLIKSI

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Tarkastaja: Jukka Konttinen
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Markus Luukkonen: Vedyn jatkojalostus metanoliksi
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023

Ilmastonmuutos haastaa meitä löytämään tapoja vähentää päästöjä ja parantaa energiatehokkuutta. Uusiutuvan energian tuotannon ja käytön lisääntyminen vie meitä lähemmäs hiilineutraalisuutta, mutta tulevaisuudessa tulemme tarvitsemaan yhä enenevässä määrin vaihtoehtoja myös fossiilisille polttoaineille. Uusiutuvalla energialla saadaan tuotettua vihreää vetyä, jota pystytään käyttämään metanolin valmistamiseksi. Vihreästä vedystä valmistettua metanolia voidaan käyttää polttoaineena ja vähentää näin fossiilisten polttoaineiden kulutusta. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan vedyn ja metanolin nykyisiä tuotantoteknologioita sekä niiden kehitystä tulevaisuudessa. Työssä käydään läpi vedystä valmistetun metanolin taloudellisesta kannattavuudesta polttoaineena sekä mahdollisia tulevaisuuden skenaarioita. Tutkielma keskittyy myös siihen, miten vihreästä vedystä valmistetusta metanolista saataisiin kannattavampaa ja sen mahdollisuuksiin korvata fossiilisia polttoaineita tulevaisuudessa.

Työssä laskettiin bensiinin, vedyn ja metanolin valmistuskustannuksia eri valmistusteknologioilla. Vedyn valmistusteknologioista mukana olivat yleisin valmistusmenetelmä eli höyryreformointi (engl. Steam Methane Reforming, SMR) ja tulevaisuuden kannalta tärkein menetelmä eli veden elektrolyysi. Metanolin osalta tarkasteltiin synteetikaasusta ja synteettisesti valmistettua metanolia. Vertailussa mukana oli myös bensiinin ja eri menetelmillä valmistetun vedyn ja metanolin hiilidioksidiekvivalentit.

Tulosten pohjalta fossiilisia polttoaineita hyödyntämällä metanolin ja vedyn valmistuskustannukset ovat pienempiä kuin uusiutuvaa energiaa hyödyntämällä, mutta hiilidioksidiekvivalentti on lähes 7 kertaa suurempi. Vihreästä vedystä valmistetun metanolin hinta on nykytilanteessa vielä yli 2 kertaa kalliimpaa kuin bensiini ja yli 3,5 kertaa kalliimpaa kuin metaanista valmistettu metanoli energiasisältöön suhteutettuna. Vihreästä vedystä valmistetun metanolin kustannustehokkuutta voitaisiin parantaa edullisemmalla sähköllä, joka on mahdollista toteuttaa esimerkiksi kasvattamalla tuuli- ja aurinkoenergian kapasiteettia. Kustannustehokkuus paranisi myös elektrolyysikennojen tehostamisella, jossa elektrolyysikennojen huonoa hyötysuhdetta, lyhyttä elinikää ja kallista hintaa parannettaisiin tuotantokapasiteettien kasvattamisella sekä parempien valmistusmateriaalien avulla. Vuonna 2030 globaalin vihreän vedyn kysynnän oletetaan olevan 15-30Mt. Tämä työ vastaa tarpeeseen selvittää vihreän vedyn kustannustehokkuutta nyt, jotta kustannustehokkuutta voidaan parantaa ja pystymme vastaamaan vihreän vedyn kasvavaan tarpeeseen tulevaisuudessa.

Avainsanat: Vihreä vety, höyryreformointi, veden elektrolyysi, synteettinen metanoli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	4
2. VEDYSTÄ METANOLIKSI	6
2.1 Vety	6
2.1.1 Vedyn valmistaminen höyryreformoinnilla	7
2.1.2 Vety elektrolyysillä	8
2.1.3 Vihreä vety	11
2.2 Metanoli.....	13
2.2.1 Synteetisistä kaasusta valmistettu metanoli.....	15
2.2.2 Synteettinen metanoli.....	16
3. KANNATTAVUUS	19
3.1 Vedyn valmistuskustannukset	19
3.2 Synteetisistä kaasusta tuotetun metanolin valmistuskustannukset.....	20
3.3 Synteettisen metanolin valmistuskustannukset.....	20
3.4 Benssiinin valmistuskustannukset	22
4. TULOKSET	26
4.1 Vedystä valmistetun metanolin kannattavuus	26
4.2 Tulevaisuuden näkymät.....	26
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	28
LÄHTEET	29

LIITE A: KUSTANNUSLASKELMAT

1. JOHDANTO

Kestävä kehitys ja energiakriisi ovat yhä ajankohtaisempia ongelmia. Ihmisten arvioidaan kuluttavan vuoteen 2050 mennessä maailmanlaajuisesti 30 TW energiaa. Ilmastokatastrofilta välttyminen edellyttää Pariisin ilmastosopimuksen mukaisesti, ettei maapallon lämpötila saa nousta yli 1,5 celsiusastetta. Samalla yritetään päästä eroon fossiilisista polttoaineista, jolloin uusiutuvan energiantuotannon on kasvettava. Globaaleja päästöjä on mahdollista vähentää 55 % paremmalla energiatehokkuudella ja uusiutuvalla energialla, mutta kaikkia sektoreja ei ole mahdollista saada hiilineutraaleiksi. Jäljelle jäävän päästösuuden osalta tarvitaan muita ratkaisuja. (Ellen MacArthur Foundation, 2019.)

Uusiutuvien energialähteiden yleistyessä energiantuotannon määrät vaihtelevat enemmän kuin ennen johtuen sääolosuhteiden vaikutuksesta tuotannon määrään. Tuotannon määrien suurempi vaihtelu aiheuttaa tilanteen, jossa ajoittain tuotamme enemmän sähköenergiaa kuin kulutamme. Käyttämättä jäänyt ylimääräinen energia menee hukkaan. Yhdeksi ratkaisuksi on esitetty veden elektrolyysiä. Veden elektrolyysissä ylimääräisellä energialla saadaan tuotettua vetyä, joka jatkojalostetaan metanoliksi. Tällä tulee olemaan suuri vaikutus päästöjen vähentämisessä kiertotalouden ohella. Kiertotaloutta hyödynnetään jo nyt laajasti, mutta vedyn käytön on arvioitu kasvavan tulevien vuosien aikana merkittävästi. Ongelmana tällä hetkellä on, että 95 % vedystä on valmistettu fossiilisilla polttoaineilla ja siitä jatkojalostettu metanoli tuottaa suuria hiilidioksidipäästöjä. (International Renewable Energy Agency, IRENA, 2019.)

Vetyä voidaan käyttää polttoaineena polttokennoissa sähkön tuottamiseksi. Polttokennot ovat sopiva sähköntuotantosovellus kannettavissa sekä pienissä laitteissa. Polttokennoista aiheutuvat päästöt ovat myös alhaiset, joten miksi siis jatkojalostaa vety metanoliksi? Vedyn käytön ongelmiksi muodostuvat sen varastointi ja kuljetus. (Sá et al., 2010.) Vety on kaasua normaalipaineessa ja -lämpötilassa. Sen varastointi nestemäisenä vaatii -253 °C lämpötilan. (Singh et al., 2021.) Kaasun varastointi aiheuttaa räjähtämis- ja syttymisriskin ja sen käyttö näistä syistä on vaikeaa esimerkiksi lentokoneissa. Metanoli taas on normaalipaineessa ja -lämpötilassa nestemäistä, jolloin sen varastointi on helpompaa ja räjähtämisriski pienempi. Metanolin nestemäisyys helpottaa myös sen käyttämistä liikennepolttoaineena. Metanoli on itsessään myrkyllistä, mutta varovaisella käsittelyllä voidaan vähentää myrkytyksen riskiä. Metanolin valmistus vaatii vedyn lisäksi hiilidioksidia, jolloin saadaan sidottua hiilidioksidia metanoliin. (Huang et al., 2022.)

Tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten vetyä valmistetaan?

1.1 Miten vedystä tehdään metanolia?

2. Voiko vedystä valmistettu metanoli olla kannattavaa?

2.1 Miten vihreästä vedystä valmistetusta metanolista saataisiin kannattavaa?

2.2 Milloin vihreästä vedystä valmistettu metanoli voisi korvata fossiilisia polttoaineita?

Tutkielman tarkoituksena on käydä läpi vedyn valmistuksen tärkeimmät tuotantotavat ja niistä jatkojalostetun metanolin tuotantotavat. Sen jälkeen lasketaan eri tuotantotavoilla valmistetun metanolin kustannuksia ja vertaillaan niitä bensiinin ja vedyn valmistuskustannuksiin. Saatujen tulosten sekä aiemman tutkimusaineiston avulla arvioidaan metanolin kannattavuutta tulevaisuudessa polttoaineena. Työssä käytetään enimmäkseen vertaisarvioituja artikkeleita ja työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Tutkielman luvussa 2 käsitellään vedyn valmistustapoja ja vedyn jatkojalostusta metanoliksi. Luvussa 3 lasketaan kahdella tavalla valmistetun metanolin kustannuksia sekä bensiinin valmistuskustannuksia. Luvussa 4 vertaillaan luvun 3 tuloksia ja pohditaan metanolin tulevaisuutta. Lopuksi luvussa 5 esitetään johtopäätökset.

2. VEDYSTÄ METANOLIKSI

Teorialuvuissa käsitellään vetyä yleisesti ja vedyn valmistutusta höyryreformoinnilla sekä veden elektrolyysillä. Myös metanolia käydään läpi yleisesti ja metanolin valmistusta synteetikaasusta sekä synteettisesti.

2.1 Vety

Vety on yksinkertaisin alkuaine, josta maailmankaikkeuden muut alkuaineet ovat muodostuneet. Jopa 90 % atomeista on vetyatomeja (Kelola, 2021). Vedyllä on pienin atomiluku ja sen atomiluku on yksi jaksollisessa järjestelmässä, mikä tekee siitä kevyimmän alkuaineen. Maapallolla vety ei kuitenkaan ole primaarienergianlähde, koska sitä ei löydy sellaisenaan. Se on sitoutuneena aina toisiin atomeihin, ja suurin osa maapallolla löytyvästä vedystä on sitoutuneena veteen. Vedessä vety on sitoutuneena happeen. (Kelola, 2021.)

Vetyä pidetään puhtaana tulevaisuuden polttoaineena, millä on tunnetuista polttoaineista suurin energiatiheys massa suhteutettuna. 1 kg vetyä pystyy varastoimaan 120 MJ energiaa. (Kelola, 2021.) Toisaalta vedyn energiatiheys on matala tilavuuteen, jolloin sen varastointi on tehtävä korkeassa paineessa (Singh et al., 2021).

Vuonna 2020 maailmanlaajuisesti vedyn tuotanto oli 90 Mt (Wappler et al., 2022). Vedyn valmistuksessa käytetään eri värejä kuvaamaan tuotannossa syntyviä hiilipäästöjä. Näitä värejä ovat harmaa, sininen ja vihreä (Navas-Anguila et al., 2021). Harmaata vetyä tuotetaan fossiilisista luonnonvaroista useimmiten metaanin höyryreformoinnilla. Erona harmaalla ja sinisellä vedyllä on se, että sinisessä vedyssä tuotanto sisältää myös hiilidioksidin talteenottojärjestelmän (Carbon Capture and Storage, CCS). Vihreä vety on uusiutuvaa vetyä, joka on tuotettu uusiutuvista lähteistä. Uusiutuvia lähteitä ovat biomassan kaasutus sekä veden elektrolyysi tuulivoiman tai aurinkosähkön avulla. (Navas-Anguila et al., 2021.) Polttoaineena vety on päästötön, koska reagoissaan hapen kanssa se muodostaa vettä (LeValley et al., 2014).

Vetyä voidaan muuttaa sähköenergiaksi polttokennolla ja turbiinilla. Turbiinissa vety pyörittää turbiinin lapoja ja lapojen liike-energia muutetaan generaattorilla sähköksi. Yleisempää on polttokennojen käyttö. Polttokennot koostuvat kahdesta elektrodista, joista toinen on positiivisesti varautunut (katodi) ja toinen negatiivisesti varautunut (anodi). Elektrodien välissä on

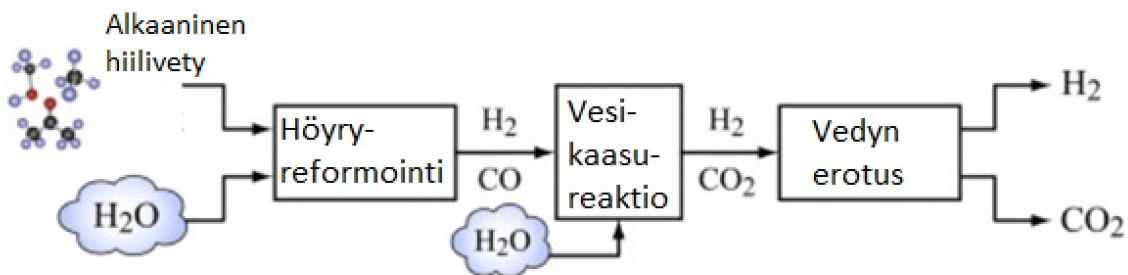
elektrolyyttikalvo. Anodilla vety hapettuu ja katodilla happi pelkistyy. Protonit siirtyvät anodilta katodille elektrolyyttikalvon läpi ja elektronit siirtyvät ulkoisen piirin kautta. Katodilla happi reagoi protonien ja elektronien kanssa muodostaen vettä ja tuottaen lämpöä. (Wilberforce et al., 2017.)

Vedyn kilpailukyvyyn parantamiseksi muihin polttoaineisiin verrattuna suuremmat määrät olisi tuotettava päästöttömästi ja tehokkaasti. Infrastruktuuria olisi kehitettävä, jotta vety saataisiin helpommin asiakkaille. Myös tuotantokustannuksia on alennettava, mikä päästöttömän vedyn tapauksessa vaatisi sähkönhinnan alenemista. Ennen kuin infrastruktuuria voidaan kehittää, täytyisi toimituksen olla tasaista ja kustannustehokasta. Vetyenergian tuotannon ensimmäisenä askeleena olisi kehittää menetelmiä, jotta näihin tavoitteisiin päästäisiin. (LeValley et al., 2014.)

Seuraavissa luvuissa käydään läpi vedyn yleisin valmistustapa höyryreformointi sekä puhtaamman tulevaisuuden kannalta tärkein vihreä vety. Muita tapoja vedyn valmistamiseen on hiilen ja biomassan kaasutus, termokemialliset syklit ja valokatalyyysi (dos Santos et al., 2017).

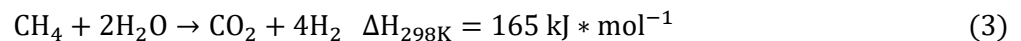
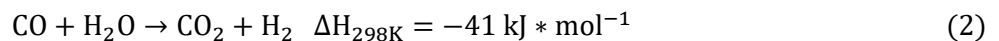
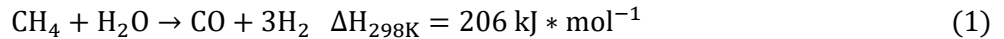
2.1.1 Vedyn valmistaminen höyryreformoinnilla

Höyryreformointi (Steam-Methane Reforming, SMR) on teollisuuden laajimmin käytössä oleva reformointitekniikka. 48 % vedystä tuotetaan metaanin höyryreformoinnilla (Keipi et al., 2018). Tyypillisesti höyryreformointireaktiot toteutetaan nikkelikatalyyttien avulla korkeissa lämpötiloissa 750–1450 °C ja 5–25 baarin paineessa johtuen endotermisestä reaktiosta (LeValley et al., 2014). Näin tuotettu vety aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Kuvassa 1 on esitettyä höyryreformointi vaiheittain:



Kuva 1: Höyryreformoinnin prosessikaavio, muokattu lähteestä (LeValley et al., 2014).

Höyryreformoinnissa alkalinen hiilivety useimmiten metaani sekoitetaan vesihöyryyn. Alkaanisen hiilivedyn ketju katkaistaan, jolloin hiili hapettuu hiilimonoksidiksi ja vesi pelkistyy vedyksi. (Motiva, 2020; Nawfal et al., 2015). Reaktiossa on aina mukana myös vesikaasureaktio (Water Gas Shift, WGS), jossa saatu hiilimonoksidi reagoi uudelleen veden kanssa muodostan hiilidioksidia ja vetyä (Keipi et al., 2018). Kaavassa on esitettyä höyryreformoinnin osareaktiot (1)(2) ja sen jälkeen kokonaisreaktioyhtälö (3) (LeValley et al., 2014.)



Höyryreformoinnissa aktiivisuutta edistävä katalyytti on tärkeässä asemassa saavuttaakseen lähes 100 % teoreettisen vedyn tuotannon. Monet perinteiset katalyytit eivät siedä myrkkijä ja vaativat erityisiä aktivointimenetelmiä. Katalyytin valinnassa tärkeää on myös verrata sen hintaa suhteessa aktiivisuuteen saavuttaakseen optimaalisen katalyytin. (LeValley et al., 2014.)

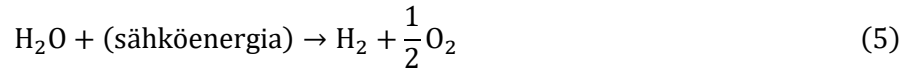
Vedyn höyryreformoinnissa syntyvä hiilidioksidiekvivalentti megajoulea kohden saadaan selville GWP:n (Global Warming Potential) ja lämpöarvon avulla. GWP-arvo on 11,43 kg CO₂-ekv/kg H₂ ja lämpöarvo vedylle on 120 MJ/kg. Hiilidioksidiekvivalentti on GWP jaettuna lämpöarvolla. (Valente et al., 2019) Kaavassa (4) on esitettyä lasku vedyn höyryreformoinnissa syntyvälle hiilidioksidiekvivalentille.

$$\text{CO}_2\text{ekv/MJ} = \frac{11430 \text{ g CO}_2 \text{ ekv}}{1 \text{ kg H}_2 * 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \text{ H}_2} \quad (4)$$

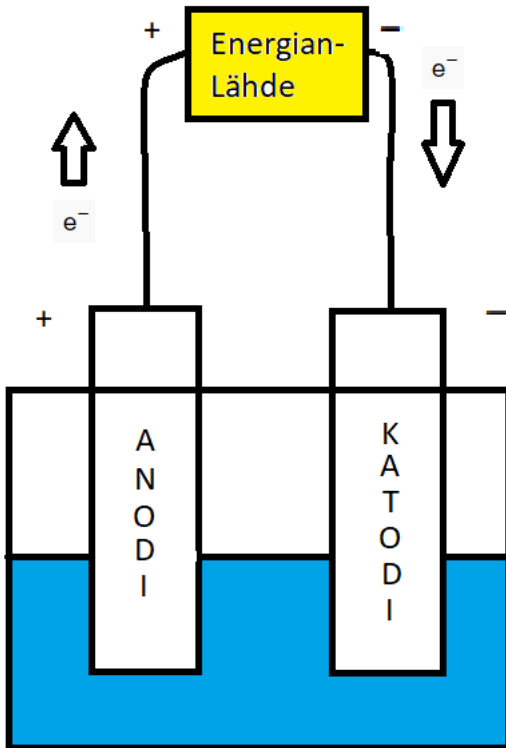
Vedyn höyryreformoinnissa syntyviksi hiilidioksidiekvivalentti päästöiksi saadaan 92,3 g CO₂-ekv/MJ.

2.1.2 Vety elektrolyysillä

Elektrolyysi on prosessi, jossa vettä hajotetaan sähköenergian avulla muodostaen vetyä ja happea (5).

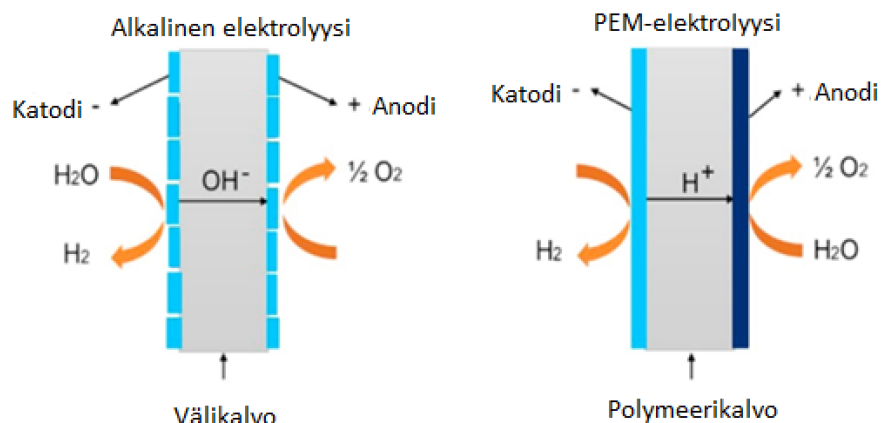


Elektrolyysi suoritetaan elektrolyysikennoilla. Elektrolyyttikennot koostuvat kahdesta elektrodista sekä niiden välissä olevasta kalvosta, joka toimii elektroneja estävänä elektrolyytinä. Elektrolyysi tapahtuu virtalähteellä (kuva 2). (dos Santos et al., 2017.)



Kuva 2. Elektrolyysijärjestelmä.

Yleisimmät elektrolyysijärjestelmät perustuvat alkaliseen elektrolyysiin ja polymeerielektrolyysiin (Proton Exchange Membrane, PEM). Alkalinen elektrolyysi on vakiintunutta ja tunnettua tekniikkaa veden elektrolyysiin. Kehitystä tarvitaan eliniän pidentämiseen, hyötysuhteen parantamiseen sekä valmistuskustannusten vähentämiseen (Barbir, F. 2013). PEM-kennot ovat toinen lupaava veden hajottamistekniikka, koska niillä on korkeampi hyötysuhde, laajempi kuormitusalue ja nopeampi dynaaminen vaste verrattuna alkaliin elektrolyysikennoihin. Alkalelektrolyysikennot ovat käytetympi menetelmä niiden pienempien pääomakustannusten takia. Suuret pääomakustannukset johtuvat katalyyttien, kaksisuuntaisten levyjen sekä kalvon korkeasta hinnasta. (Abraham, M. 2017.) Kuvassa 3 on esitettyä alkalinen ja PEM-elektrolysaattori (dos Santos et al., 2017).

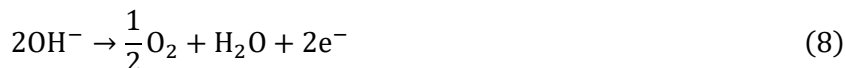


Kuva 3. Alkalinen- ja PEM-elektrolysaattori. Muokattu lähteestä (dos Santos et al., 2017).

PEM-elektrolyysin aikana elektrodien reaktioyhtälöt ovat anodilla (6) ja katodilla (7).



Alkalisella elektrolyysikennolla vastaavat reaktiot anodilla (8) ja katodilla (9)



Kennojen tehokkuudet ovat samaa suuruusluokkaa ja alkalisella kennolla pystytään tuottamaan vetyä enemmän pinta-ala yksikköä kohden. Alkalisella kennolla ja PEM-kennon heikkouksia ovat elektrolyytin syövyttävyyden aiheuttamat korroosion nopeudet. PEM-kennossa käytettävien titaanilevyjen suojaamiseksi on tutkittu jalometallipinnoitteita. Pinnoitteilla on laskettu korroosion nopeutta, mutta ne lisäävät kustannuksia. PEM-kennossa kustannusten alentamiseksi on kehitetty ruteniumia metalleja korvaamaan kallista platinaa. (Shiva Kumar & Himabindu, 2019.) Alkalisella kennolla on alhaisempi hyötysuhde PEM-kennoon verrattuna. Alhaisempi hyötysuhde johtuu hapen diffuusiosta katodikammioon ja vedyn diffuusiosta happikammioon. (dos Santos et al., 2017.) Alkalisten elektrolyysikemien hyötysuhde on noin 58 % ja polymeerielektrolyysikemien 63 % (Abraham, M. 2017).

Alkali- ja PEM-kennojen lisäksi on myös kalvottomia kennoja (Membraneless electrolyzers, MEs). ME:t eivät sisällä fyysistä estettä, vaan tuotekaasut erotetaan nesteestä mekaanisesti. Yksinkertaisuutensa vuoksi niiden uskotaan olevan halvempia ja kestävämpiä, koska kalvon hajoaminen vältetään. ME-kennojen tuottaman vedyn hinnan uskotaan pääsevän lähimmäksi höyrymetaanireformoinnilla tuotetun vedyn hintatasoa. (Manzotti et al., 2022).

Vedyn elektrolyysissä uusiutuvaa energiaa käyttäessä syntyvä hiilidioksidiekvivalentti megajoulea kohden saadaan selville GWP:n (Global Warming Potential) ja lämpöarvon avulla. GWP-arvo on 0,7 kg CO₂-ekv/kg H₂ ja lämpöarvo vedylle on 120 MJ/kg. Hiilidioksidiekvivalentti on GWP jaettuna lämpöarvolla. (Valente et al., 2019.) Kaavassa 10 on esitettyä lasku vedyn elektrolyysissä syntyvälle hiilidioksidiekvivalentille.

$$\text{CO}_2\text{ekv/MJ} = \frac{700 \text{ g CO}_2 \text{ ekv}}{1 \text{ kg H}_2 * 120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \text{ H}_2} \quad (10)$$

Vedyn elektrolyysissä syntyviksi hiilidioksidiekvivalentti päästöiksi saadaan 5,8 g CO₂ -ekv/MJ.

2.1.3 Vihreä vety

Vetyä voidaan tuottaa veden elektrolyysillä. Jos elektrolyysiprosessissa on käytetty uusiutuvaa energiaa, tuotettua vetyä kutsutaan vihreäksi. Toinen tapa tuottaa vihreää vetyä on biomassan kaasutus. Vuonna 2020 veden elektrolyysillä tuotetun vedyn osuus oli vain 0,03 % maailmassa tuotetusta vedystä (Wappler et al., 2022). Tuotannon määrän voi olettaa kasvavan tulevaisuudessa. Tähän on syynä vedyn määritys tärkeäksi osaksi tavoitetta hiilineutraaliin Eurooppaan vuonna 2050. Maailmanlaajuisen vihreän vedyn tuotannon potentiaalın uskotaan olevan 5277 TWh vuonna 2050. Vihreän vedyn tuotantokustannusten ennustetaan laskevan nykyisestä 5,09 eurosta kilogrammalta 2,12 euroon vuoteen 2050 mennessä (Kakoulaki et al., 2021).

Uusiutuvan energian säariippuvuus vaikuttaa merkittävästi vihreän vedyn tuotantoon. Elektrolyysiprosessin vaatiman sähköenergian tuoton suuruuteen vaikuttaa auringonvalon voimakkuus sekä tuulen nopeus. Pilvinen päivä vähentää aurinkopaneelien pääsevän auringonvalon määrää, mikä johtaa pienempään sähköntuotantoon. Samoin tuulivoimassa tyyni tuulijakso vähentää sähköntuotantoa. (Hu et al., 2023.) Asentamalla enemmän tuuli- ja aurinkovoimaloita saadaan lisättyä sähköntuotantomääriä. Suuremmilla tuotantomäärillä tulee useammin tilanteita, jolloin

tuotetaan enemmän sähköenergiaa kuin kulutetaan ja voidaan hyödyntää ylimääräinen energia elektrolyysissä vihreän vedyn tuottamiseksi. Sääriippuvuus on kuitenkin haaste vihreän vedyn johdonmukaiselle tuotannolle. Asianmukaisella suunnitellulla voidaan ennakoida sääriippuvuuden vaikutuksia ja vähentää niitä. Näitä ovat sääolosuhteiden seuranta, jolloin osataan varautua mahdollisiin tuotannonvaihteluihin sekä selvittämällä optimaaliset alueet rakentaa tuuli- ja aurinkovoimaloita. Myös energian varastointijärjestelmillä, kuten akuston avulla voidaan varastoida ylimääräistä energiaa elektrolyysikapasiteetin ollessa riittämätön ja hyödyntää energia myöhemmin. Myös useiden uusiutuvan energialähteiden yhdistäminen, kuten tuuli-, aurinko- ja vesivoimaloiden integroiminen lisää sähköenergian tuottoa. (Hu et al., 2023.)

Vihreän vedyn globaalin kysynnän oletetaan olevan noin 15 Mt vuonna 2030 (IRENA, 2021). Toisen tutkimuksen mukaan vihreän vedyn globaali kysyntä voisi olla 20–30 Mt vuonna 2030 (Hydrogen Council and McKinsey & Company). Tuotettaessa kaikki vety elektrolyysin avulla vaaditaan 104–695 GW:n elektrolyysikapasiteetti. Kapasiteetin suureen vaihteluun syynä uusiutuvan energian suuret vaihtelut huipunkäyttöajassa sekä vedyn mahdollisessa kysynnässä. Esimerkiksi maatuulienergialla huipunkäyttöaika on 2000 tuntia vuodessa. Aurinkoenergian lisääminen tuulipuistoon nostaa tämän arvon 4000 tuntiin vuodessa. Lisätessä vesivoima tai verkkosähkö systeemiin voidaan päästä lähes kokoaikaiseen nimellistehoon. Tällöin huipunkäyttöaika on 8000 tuntia vuodessa. (Wappler et al., 2022.)

Taulukko 1. Asennetut elektrolyysikapasiteetit tuottaakseen 15 Mt tai 25 Mt vihreää vetyä eri huipunkäyttöajoilla (Wappler et al., 2022).

Huipunkäyttöaika (h)	Elektrolyysikapasiteetti tuot- taakseen 15 Mt vetyä (GW)	Elektrolyysikapasiteetti tuot- taakseen 25 Mt vetyä (GW)
2000	417	695
4000	208	348
8000	104	174

Nykyisin globaalisti asennettu elektrolyysikapasiteetti on vain 0,3 GW (Wappler et al., 2022). Tu- levan kysynnän täyttämiseksi vaaditaan riittävän uusiutuvan energian saannin lisäksi myös riittä- västi elektrolyysilaitteiden valmistuskapasiteettia. Vuonna 2020 EU:ssa päätetyllä vetystrategi- alla pyritään siihen, että elektrolyysikapasiteettiä olisi vähintään 6 GW vuoteen 2024 mennessä ja 40 GW vuoteen 2030 mennessä (Euroopan parlamentti, 2023).

Kapasiteetin kasvattamiseen tarvittavan rahan määrää on vaikea arvioida, koska nykyisiä kW - luokan laitoksia ei voida suoraan verrata tuleviin megawattien kokosiin laitoksiin. Kapasiteetin kasvattamisen aiheuttavia kustannuksia voidaan arvioida tulevilla hankkeilla. Proton OnSiten PEM-kennojärjestelmän, joka tuottaa 0,9 t/H₂ vuorokaudessa, ilmoitettiin maksavan 2 750 000 dollaria. (Reksten et al., 2022.) Vihreän vedyn globaalin kysynnän olettaessa olevan 15 Mt vuonna 2030 (IRENA, 2021) tarkoittaisi se yli 90 miljoonan dollarin investointeja elektrolyysikennojärjestelmiin. Tämän lisäksi uusiutuvien energianlähteiden kapasiteettia täytyisi kasvattaa tuotukseen riittävästi päästötöntä sähköä. Aurinkosähkön ja tuulivoiman valmistuskustannukset vuonna 2021 ovat 857 \$/kW ja 1325–2858 \$/kW (IRENA, 2021). Riippuen laitoksen huipunkäyttöajasta vedyn tuottamiseen vaaditaan 104–417 GW uusiutuvan energian kapasiteettia. Kustannukset tälle kapasiteetille olisivat 89–1200 miljardia dollaria. Saadakseen vaadittavat rahat investointeihin tarvitaan yksityishenkilöiden sijoituksia yhdessä valtion antamiin tukiin ja sijoituksiin.

Viimeisen viiden vuoden aikana on toteutettu useita yli 1 MW elektrolyysilaitosta. Kuitenkaan yli 10 MW laitoksia ei ole perustettuna. Vuosien 2025–2030 välillä on suunnitteluvaiheessa suurempia laitoksia, joiden teho yltää enintään 1 GW. Näissä laitoksissa käytettävä teknologia ei ole vielä tiedossa, koska päätöstä teknologian käytöstä ei ole vielä tehty. Kustannukset laskevat MW:a kohden siirryttäessä yli 5 MW laitoskokoihin. Lokakuussa 2018 tehdyn kustannusarvion mukaan elektrolyysikennojen hinnan arvioidaan laskevan 1500 € per kW vuonna 2016 500 € per kW vuonna 2024. Investointikustannukset ovat yksi keskeinen haaste uusiutuvalle vetypohjaiselle energijärjestelmälle. Kustannusten alenemiseen vaikuttavia tekijöitä ovat laitosteknologian kasvattaminen, tuotantomäärien lisääminen ja teknologian kehittäminen. (Reksten et al., 2022.)

2.2 Metanoli

Metanoli on nykyään teollisesti tärkeä kemikaali, jota käytetään pääasiassa bulkkikemikaalien, kuten formaldehydin ja etikkahapon valmistuksessa. Metanolia on käytetty ja valmistettu jo vuosituhansien ajan. Antiikin Egyptissä metanolia käytettiin palsamointiin eli ihmisruumiin suojaamiseen pilaantumista vastaan. Vasta vuonna 1661 Robert Boyle tuotti puhdasta metanolia tislamalla. Vuonna 1834 metanolin alkuaine koostumus saatiin selville eli metanoli on hiilen, typen ja hapen muodostaman molekyyli. 1900-luvun alkupuolella alettiin tutkia katalyyttien vaikutusta ja 1923 vuoden jälkeen siirryttiin pienen mittakaavan puupohjaisista kuivatusprosesseista

teollisiin katalyyttiprosesseihin. Ensimmäisessä teollisessa prosessissa metanolia tuotettiin synteettisesti vedyn ja hiilimonoksidin sekoituksesta. (Sheldon, 2017.)

Nykyään metanolia käytetään monissa kuluttajatuotteissa, kuten tuulilasipesunesteenä, jäänpoistonesteenä, pakkasnesteenä sekä retkeily- ja ulkopolttoaineina. Metanolin käytön esteenä on nähty sen myrkyllisyys. Metanoli on erittäin myrkyllistä suurempina määrinä (30–100 ml) nautittuna, jolloin seurauksena on sokeutuminen ja lopulta kuolema. Yhdysvaltain FDA:n mukaan metanolin päivittäinen saanti 500 mg/vrk ei ole vaarallista aikuiselle. Metanolin käytön ja jakelun yleispolttoaineena ei kuitenkaan odoteta aiheuttavan merkittäviä turvallisuusongelmia. (Olah et al., 2009.)

Metanolin käyttö polttoaineena nähdään tapana vähentää syntyviä kasvihuonekaasuja. Sitä voidaan käyttää itsessään tai lisäämällä bensiiniin sekaan. Metanoli on vaihtoehtoinen nestemäinen energianlähde tarjoten tehokkuus- ja päästöetuja bensiiniin verrattuna. Kipinäsytytteillä moottoreilla metanolista syntyy vähemmän palamattomia hiilivetyjä ja typen oksideja kuin bensiinistä. (Wouters et al., 2023.)

Metanolin valmistus tuottaa tai sitoo kasvihuonekaasuja riippuen valmistustavasta. Perinteisillä tavoilla, kuten maakaasulla valmistetusta metanolista, syntyy hiilidioksidipäästöjä. Näitä päästöjä voidaan rajoittaa lisäämällä hiilidioksidintalteenotto prosessiin. Uusi kehitteillä olevan synteettisen metanolin valmistus taas hyödyntää muista prosesseista syntyneitä hiilidioksidipäästöjä ja käyttää niitä prosessissa metanolin valmistukseen. Maakaasusta tuotetun metanolin kasvihuonepäästöt ovat 91,5 g CO₂ -ekv/MJ. Synteettisen metanolin valmistus aiheuttaa kasvihuonepäästöjä 13,6 g CO₂ -ekv/MJ. (Zang et al., 2021.) Näin saadaan vähennettyä hiilidioksidipäästöjen määrää siirtymällä maakaasusta synteettiseen metanoliin. Metanolin käytössä eli polttamisessa taas syntyy aina hiilidioksidipäästöjä.

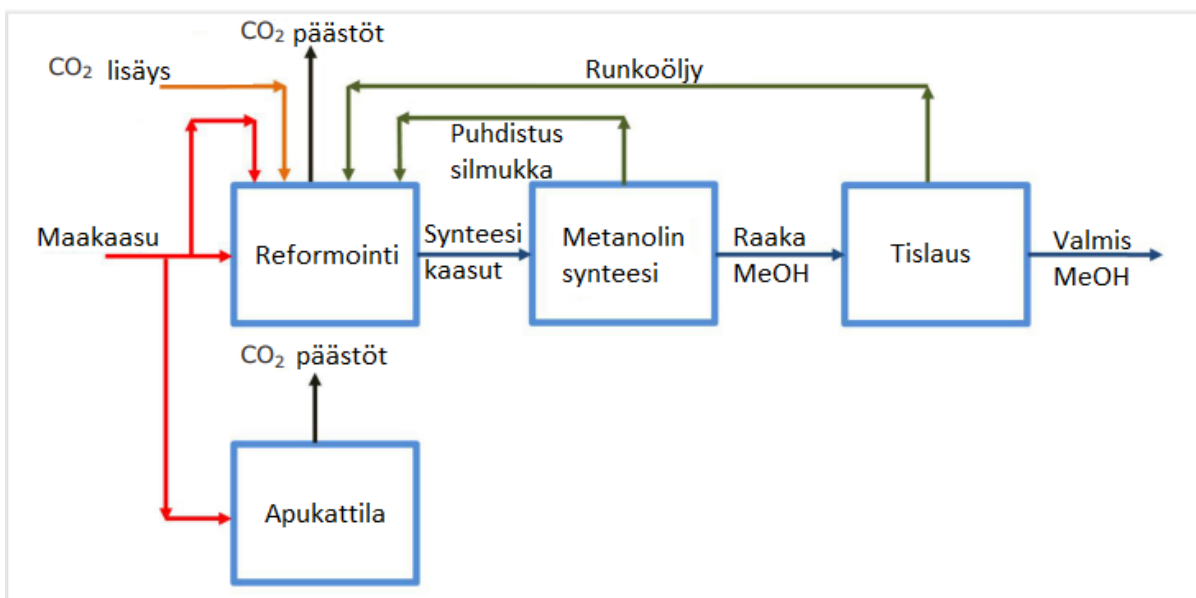
Vihreästä vedystä valmistetulla metanolilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, kun teknologia on tarpeeksi kehittyntä, taloudellinen kannattavuus on riittävä ja vaadittava infrastruktuuri on rakennettu. Näiden tapahtumiseksi vaaditaan poliittisia toimenpiteitä vihreän metanolin suosimiseksi. Kansainvälisen energiajärjestön (International Energy Agency, IEA) Future of Hydrogen -raportissa vuodelta 2019 esitetään skenaario, jossa vuoteen 2030 mennessä synteettisen metanolin tuotanto voi nousta useisiin miljooniin tonneihin vuodessa. Näin suurella tuotannolla olisi mahdollista korvata fossiilisia polttoaineita. (IEA, 2019) Väitettä tukee useiden yritysten tavoitteet

lisätä ja kehittää synteettisen metanolin tuotantoaan. Esimerkiksi islantilainen yritys Carbon recycling international (CRI) pyrkii tuottamaan satatuhatta tonnia synteettistä metanolia vuoteen 2025 mennessä (CRI, n.d.). Suomessa st1 pyrkii saamaan tuotantolaitoksen toimintaa 2026 mennessä. Valmiina laitoksen pitäisi tuottaa 25 000 tonnia synteettistä metanolia (St1, 2022).

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi metanolin valmistusta synteettisistä kaasuista. Synteettisistä kaasuista valmistettu metanoli on pidempään käytössä ollut metanolin valmistustapa. Sitten synteettisen metanolin valmistusta, joka on uudempaa teknologiaa.

2.2.1 Synteesikaasusta valmistettu metanoli

Metanolin tuotannossa eniten käytetty tekniikka on maakaasun muuntaminen synteesikaasuksi ja sen jatkojalostus nestemäisiksi polttoaineiksi. Näin tuotettu metanoli aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä, joten tuotanto ei ole ympäristöystävällistä. Syntyneitä hiilidioksidipäästöjä voidaan laskea hiilidioksidin talteenotto- ja varastointijärjestelmillä. (Blumberg et al., 2017.) Kuvassa 4 on esitettyä metanolin valmistuksen vaiheet.

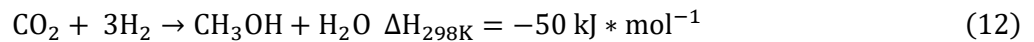
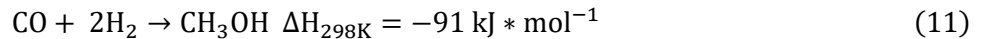


Kuva 4. Synteettisistä kaasuista valmistetun metanolin prosessikaava. Muokattu lähteestä (Ingham, 2017)

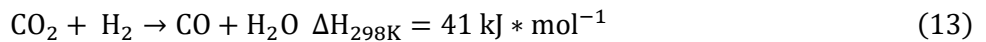
Metanolin tuotanto synteesikaasusta koostuu kolmesta alajärjestelmästä. Synteesikaasun tuotannosta, raakametanolin tuotannosta sekä metanolin puhdistuksesta. Raaka-aineesta

(maakaasu tai biokaasu) poistetaan ensin rikki ja sitten se höyryreformoidaan (kts. luku 1.1). Saatu synteetikaasu eli hiilidioksidin, hiilimonoksidin ja vedyn sekoitus jäähdytetään ja puristetaan kompressoreissa. (Ingham, 2017.)

Toisessa alajärjestelmässä nostetaan paine ja lämpötila taas korkeaksi. Höyryreformaatiosta saatua hiilidioksidia ja hiilimonoksidia hydrataan eli ne reagoivat vedyn kanssa kahden pääreaktion (11)(12) mukaisesti tuottaakseen metanolia. Reaktiossa käytetään tyypillisesti kuparikatalyyttiä. (Ingham, 2017.)



Sivureaktio, joka voi tapahtua reformoinnin aikana on käänteinen vesikaasureaktio (Reverse Water Gas Shift, RWGS), jossa syötössä oleva hiilidioksidi reagoi vedyn kanssa muodostaen hiilimonoksidia ja vettä (14). Korkeissa paineissa reaktio voi tulla erittäin yleiseksi. Tämä johtaa vedyn kulumiseen ja näin ollen heikentää saatua metanolin määrää.

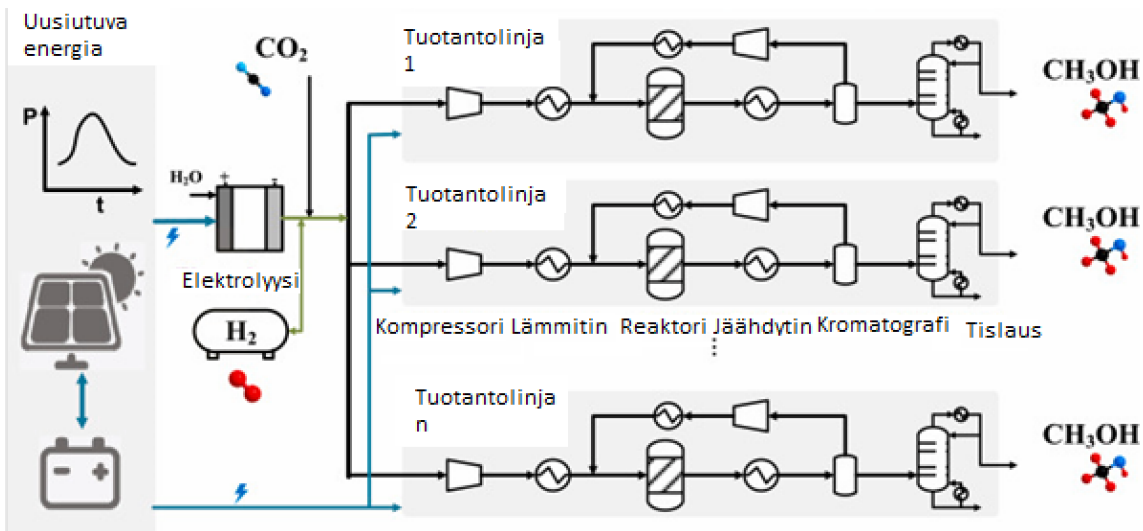


Kolmannessa alajärjestelmässä raakametanolin puhdistetaan kolmen kolonnin tislauksyksikössä. Tislauksessa hyödynnetään aineiden eri kiehumispisteitä, jolloin ne höyrystyvät eri lämpötiloissa. Höyry tiivistetään takaisin nesteeksi, jolloin aineet saadaan erotettua toisistaan. Vaaditaan vähintään kolmen kolonnin tislauksen saavuttaakseen vaaditun puhtauden (99,8 mol-%) metanolia (Blumberg et al., 2017.)

2.2.2 Synteettinen metanoli

Synteettisen metanolin valmistuksen lisäämisellä on merkittävä vaikutus hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Synteettisen metanolin valmistus ei ole vielä yleistä, mutta yleisyys lisääntyy kustannusten laskiessa. Kustannusten suurin tekijä ovat raaka-aineet, jolloin synteettisen metanolin valmistus on kannattavampaa halvalla vedyllä sekä korkealla hiilidioksidiverolla verrattuna synteettisistä kaasuista valmistettuun metanoliin. (Huang et al., 2022.)

Synteettisen metanolin valmistusprosessi eroaa muista metanolin valmistustavoista siten, että käytetty vety on vihreää vetyä. Vety tuotetaan siis veden elektrolyysillä käyttäen uusiutuvaa energiaa (kts. luku 2.1.2). Höyryreformoinnin poistaminen prosessista poistaa myös hiilidioksidin ja hiilimonoksidin tuotannon. Hiilidioksidi voidaan kerätä talteen voimalaitosten savukaasuista tai suoraan ilmakehästä, jolloin ilmakehän hiilidioksidipäästöjä saadaan rajoitettua. Kerätty hiilidioksidi täytyy puhdistaa ennen sen käyttöä prosessissa. (Huang et al., 2022.) Synteettinen metanoli valmistetaan siis vedyn reagoiessa hiilidioksidin tai hiilimonoksidin kanssa kaavojen (11) ja (12) mukaisesti. Vedyn reagoiessa hiilidioksidin kanssa muodostuu myös vettä. Yli puolet ihmisten aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä aiheutuu pienistä hajallaan olevista lähteistä, kuten toimistojen ja kotien lämmityksestä, ruoanlaitosta ja ennen kaikkea kuljetusalasta. Hiilidioksidioksidin kerääminen miljoonista pienistä fossiilisten polttoaineiden polttoyksiköistä on vaikeaa. Hiilidioksidin kierrätys on helpompaa korkean hiilidioksidipitoisuuden teollisista lähteistä. Parempi olisi liittää hiilidioksidin keräysjärjestelmät ensin teollisiin prosesseihin ennen kuin siirrytään keräämään suoraan ilmakehästä. (Olah et al., 2009.) Kuvassa 5 on esiteltyä tämän prosessin.



Kuva 5. Synteettisen metanolin valmistuksen prosessikaavio. Muokattu lähteestä (Huang et al., 2022).

Prosessi on muuten samanlainen kuin höyryreformointiprosessi, jolloin seuraavaksi hiilidioksidi ja hiilimonoksidi hydrataan eli ne reagoivat vedyn kanssa reaktioiden (11)(12) mukaisesti ja näin saadaan tuotettua raakametanolia. Raakametanolitislataan tämän jälkeen saadakseen puhdasta metanolia. (Huang et al., 2022.)

Synteettisen metanolin teknisiä, taloudellisia ja ympäristövaikutuksia on tutkittu ja analysoitu laajasti. Ympäristövaikutuksista on huomattu synteettisen metanolin vähentävän hiilidioksidipäästöjä moninkertaisesti verrattuna höyryreformointiin. Metanolin taloudellisuutta tutkittaessa huomataan raaka-ainekustannusten olevan avaintekijä metanolin tuotannon yksikkökustannuksissa. Valmistusprosessissa voidaan menettää yli puolet sähköenergiasta huonon hyötysuhteen takia, mutta sivutuotteena saatavalla hapella voidaan parantaa prosessin taloudellista kannattavuutta. Synteettinen metanoli on siis kannattavinta, kun uusiutuvalla energialla tuotettu vety on halpaa, hiilidioksidivero korkea ja sivutuotteena saatu happi saadaan kerättyä ja myytyä. Teknisestä näkökulmasta metanolia on helpompi varastoida kuin vetyä tai metaania johtuen helpommasta varastoinnista nestefaasissa. (Huang et al., 2022.) Metanolilla on myös suurempi energiatiheys litraa kohden verrattuna metaaniin ja vetyyn, mutta pienempi kuin bensiinillä (Demuynck et al., 2012). Metanoli nähdään tulevaisuudessa korvaajana akkuteknologialle ja pumppuvesivarastoille uusiutuvan energianvarastona (Baak et al., 2019). Uusiutuvan energian tuotannonvaihteluun on kiinnitetty vain vähän huomiota. Tähän olisi tärkeä kiinnittää enemmän huomiota toiminnan juostavuuden täyttymiseksi, koska raaka-aineena käytetään jaksoittain vaihtelevaa energiantuotantotapaa. (Huang et al., 2022.)

3. KANNATTAVUUS

Tässä luvussa käydään läpi synteettisistä kaasuista sekä synteettisesti valmistetun metanolin kustannuksia. Lisäksi bensiinin valmistuskustannuksia, koska metanoli voi tulevaisuudessa toimia bensiinin korvikkeena polttoaineena.

3.1 Vedyn valmistuskustannukset

Höyryreformoidun vedyn valmistuskustannuksiin vaikuttaa polttoaineena ja raaka-aineena käytetty maakaasu. Maakaasun hinta vuosien 1990–2020 aikana on vaihdellut 0,01–0,045 USD/kWh (Federal reserve bank of St. Louis, 2021). Toinen suuri hintaan vaikuttava tekijä on hiilidioksidin päästöoikeudet, joiden vaikutus luultavasti kasvaa tulevaisuudessa.

Vedyn elektrolyysissä taas raaka-aine eli vesi ei aiheuta paljoa kustannuksia, vaan prosessiin tarvittava sähkö. Sähkön hinta vuonna 2021 aurinkosähkölle, maatuulelle ja merituulelle olivat 0,048 USD/kWh, 0,075 USD/kWh ja 0,033 USD/kWh (IRENA, 2021). Hinnat ovat siis samaa luokkaa kuin maakaasun hinta. Vedyn valmistuskustannukset koostuvat siis enimmäkseen sähkön hinnasta, mutta kustannuksiin vaikuttavat myös käyttö ja kunnossapito, käyttöomaisuusinvestoinnit, valmistusmateriaalit, verot ja elektrolysaattori ja sen tarvittavat lisäosat. Vedyn valmistuksen kustannuksia vähentävät vedyn tuotannon yhteydessä syntyvät lämpö ja happi, jotka voidaan myydä. (Manzotti et al., 2022.)

Lasketaan vihreän vedyn hinnan ero uusiutuvilla energianlähteillä tai sähköverkosta otetun sähkön avulla. Lasketaan hinnat myös 500 tH₂/vuodessa ja 1000 tH₂/vuodessa tuottaville kehittyneille vedyntuotantolaitoksille, jotka käyttävät kalvottomia elektrolysaattoreita. Vedyn hinnaksi saadaan 500 tH₂/vuodessa tuottavalle kehittyneelle vedyntuotantolaitokselle 2,77 \$/kg H₂ ja 1000 tH₂/vuodessa tuottavalle kehittyneelle vedyntuotantolaitokselle 2,60\$/kg H₂. Toisaalta varhaisessa vaiheessa olevalle laitokselle, jonka vedyn tuotantomäärä on 500 tH₂/vuodessa saadaan hinnaksi 6,86 \$/kg H₂. (Manzotti et al., 2022).

Laskennassa otettaessa huomioon kaikki investointi- ja toimintakustannukset höyryreformoinnilla tuotetun vedyn hinnaksi saadaan 1,35 \$/kg H₂ (Al-Qahtani et al. 2021) ja 1–2,4 \$/kg H₂ (Manzotti et al., 2022). PEM- ja alkalikemien elektrolyysillä saadun vedyn hinta taas riippuen uusiutuvasta energianlähteestä on 4,95–9,49 \$/kg H₂ (Al-Qahtani et al. 2021), 3–8 \$/kg H₂ (Manzotti et al.,

2022) ja 3,6–9,5 \$/kg H₂ (Muñoz Díaz et al., 2023). Uusiutuvaa energiaa käyttävien ME-kennojen elektrolyysillä tuotetun vedyn hinnaksi saadaan 1,87–3.65 \$/kg H₂ (Manzotti et al., 2022). Uusiutuvalla energialla tuotetun vedyn hinta on riippuen tuotantotavasta ja uusiutuvan energian lähteestä 1,87–9,49 \$/kg H₂

3.2 Synteesikaasusta tuotetun metanolin valmistuskustannukset

Metaania voidaan jatkojalostaa metaanin höyryreformoinnilla (SMR), Autotermisellä reformoinnilla (Autothermal reforming, ATR), kuivametaanireformoinnilla (Dry Reforming of methane, DRM) ja yhdistetyllä metaanireformoinnilla (Combined Methane Reforming, CMR). Kustannukset vaihtelevat eritavoilla valmistetulle metaanille, mutta kustannukset syntyvät samoista asioista. Käydään läpi höyryreformoinnin kustannuksia tarkemmin. Laitoksessa tuotetaan 2590 t/d metaanolia. Metaania kuluu prosessikaasuna ja polttoaineena 55,6 kg/s ja sen tehollinen lämpöarvo on 54 MJ/kg. Laitos tuottaa sähköä 140,2 MW. Maakaasulle käytetään hintaa 2,9 \$/GJ ja sähkölle 113,4 \$/MWh. Laitoksia käytetään 8000 h vuodessa. (Blumberg et al., 2019.)

Pääomasijoituksia syntyy laitteiden kustannuksista, asennuksesta ja muista materiaaleista, kuten katalyytistä. Pääomasijoitusten kokonaismäärä on 674,7 M\$. Reformointiyksikkö on noin 65 % näistä kustannuksista. Höyrykierto, johon kuuluu pumput, lauhduttimet, lämmöntalteenotto-generaattori ja turbiini on noin 10 % kustannuksista. Loput näistä kustannuksista syntyvät asennuksista ja materiaaleista. Laitoksen käyttäminen ja ylläpito aiheuttavat kustannuksia 62,8 M\$/vuosi. Kuljetuskustannuksia syntyy vakuutuksista, varastoinnista ja sijoitettujen varojen koroista yhteensä 68,7 M\$/vuosi. Myös polttoaineena sekä synteesikaasuna käytetty metaani aiheuttaa kustannuksia 250 M\$/vuosi. Metanolin hinnaksi saadaan laskettua 0,295 \$/kg. (Blumberg et al., 2019.) Toisen lähteen mukaan metanolin hinta maakaasun hinnasta riippuen voisi olla 0,135–0,269 \$/kg (Arnaiz del Pozo et al., 2022).

3.3 Synteettisen metanolin valmistuskustannukset

Synteettisesti valmistetun metanolin kustannuksiin vaikuttavat tekijät ovat vihreän vedyn valmistuskustannus, joka riippuu enimmäkseen sähköhinnasta. Tämän lisäksi vedyn varastointi ja kuljetus lisäävät kustannuksia. Investointikustannukset ovat noin 30 % tuotantokustannuksista ja yli puolet tästä on elektrolysaattorista. Tarvittava vesi elektrolyysiin lisää myös vähän kustannuksia. Veden elektrolyysistä saadaan tuotettua vedyn lisäksi myös happea, joka voidaan myydä ja näin

vähentää valmistuskustannuksia. (Atsonios et al., 2016.) Kerätystä hiilidioksidista voi saada hyötyksiä, joka on erittäin merkittävässä asemassa synteettisen metanolin kannattavuuden parantamisessa.

Jäähdytysveden, teollisuussähkön ja prosessiveden hintojen oletetaan olevan 0,03 \$/t, 0,07 \$/kWh ja 0,63 \$/t. Metanolisynteesiin käytetyn katalyytin kokonaiskustannusten oletetaan olevan 2 254 000 \$ ja katalyytti vaihdetaan kolmen vuoden välein. Prosessivesi menee kuvan 5 mukaisesti elektrolysaattoriin ja jäähdytysvettä käytetään jäähdyttimessä. Mallinnettu prosessi tuottaa metanolia 1190 t/d kuluttaen 243 t/d vetyä sekä 1978 t/d hiilidioksidia. Kyseinen prosessin metanolin tuotannon hyötysuhde olisi 75,9 % ottaen huomioon prosessin kokonaisenergiapanos sisältäen vedyn sekä sähkön. Suurimmat asennettujen laitteiden kustannukset ovat 76 M\$, 50 M\$ ja 40 M\$, jotka ovat 35,8 %, 23,3 % ja 19,0 % poistettavissa olevista pääomakustannuksista. prosessin raaka-aineiden kokonaiskustannukset ovat 205 M\$/vuosi, kun vedyn hinta on 2,0 \$/kg ja hiilidioksidin hinta 38,6 \$/t. (Zang et al., 2021.)

Näillä arvoilla tuotetun metanolin hinnaksi saadaan 0,64 \$/kg, kun metanolin keskimääräinen hinta viimeisen viiden vuoden aikana on ollut 0,38 \$/kg. Vedyn valmistaminen uusiutuvasta sähköstä elektrolyysin avulla, nostaa vedyn hinnan 5 \$/kg. Tällöin metanolin valmistuskustannukset nousevat hintaan 1,24–1,28 \$/kg (Zang et al., 2021), mutta hiilidioksidipäästöjen määrät vähenevät. Tällä hetkellä hiilidioksidin talteenotosta hyvitetään 35 \$/t, jolloin hyvityksen jälkeen metanolin valmistuskustannus on 0,58 \$/kg. Nostaessa hiilidioksidipäästöhyvitys 200 \$/Mt ja vedyn hinta 1 \$/kg metanolin hinta on 0,18 \$/kg, joka on 0,20 \$/kg halvempi kuin nykyinen markkinahinta. (Zang et al., 2021.) Synteettisen metanolin hinnan arvioidaan olevan 0,36–0,60 \$/kg vuonna 2030 vedyn hinnalla 1,35–2 \$/kg ja ilmasta kerätyn hiilidioksidin hinnalla 100 \$/t (Arnaiz del Pozo et al., 2022).

Metanolin valmistushintaan vaikuttaa uusiutuva energianlähde. Vesivoimalla ja maatuulella valmistetun metanolin hinta ilman hiilidioksidihyvitystä arvioidaan olevan 0,94–1,02 \$/kg, bioenergialla 1,02–1,10 \$/kg, geotermisellä energialla 1,15–1,23 \$/kg ja aurinkoenergialla 1,32–1,40 \$/kg. Näiden lisäksi mahdollisesti tulevaisuudessa kiinnostavia teknologioita ovat keskitetty aurinkovoima 2,62–2,71 \$/kg ja merituulivoima 1,87–1,95 \$/kg. Kiinnostavimpina näistä pidetään aurinkoenergiaa ja tuulivoimaa. Näillä energianlähteillä saadaan tuotettua paljon energiaa, jota ei voida säätää tarpeen mukaan. Näiden energialähteiden huipputehopiikkien tuottama energia saadaan siten hyötykäyttöön. (Battaglia et al., 2021.)

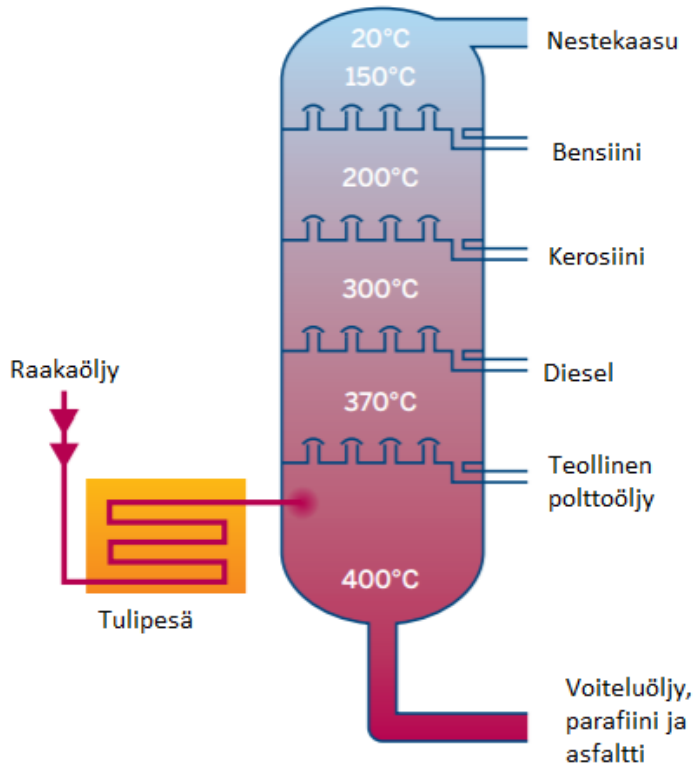
Veden elektrolyysin sivutuotteena saadaan happea (n. 8 kg/kg vetyä). Happi voidaan puristaa tai nesteyttää ja varastoida. Saatua happea voidaan käyttää monissa teollisuuden prosesseissa, mikä edustaa toista tulonlähdettä synteettisen metanolin valmistuksessa. Hapesta saataessa 0,07 \$/kg laskee vesivoimalla valmistetun metanolin hinta noin 14 %. Hapesta voidaan saada jopa 0,15 \$/kg, jolloin hinta laskee 30 %. (Battaglia et al., 2021.)

Metanolin markkinahinnan uskotaan nousevan 0,80 \$/kg johtuen sen suuremmista markkinoista tulevaisuudessa (Bellotti et al., 2019). Synteettisesti valmistetun metanoli pystyy tällöin kilpailemaan markkinoilla. Valtioiden päästöhyvitysten kasvaminen ja uusiutuvan energian hinnan halpeneminen edesauttavat synteettisen metanolin hinnan alentamisessa.

3.4 Bensiinin valmistuskustannukset

Raakaöljy on seos hiilivetyjä, josta jalostuksessa erotetaan tislaamalla eri jakeita. Jalostus aloitetaan lämmittämällä raakaöljyä. Tislausyksikössä nesteet ja höyryt erottuvat ryhmiksi niiden painon ja kiehumispisteen mukaan. Raskaat osat, kuten asfaltti, erottuvat tislausyksikön alaosasta. Kevyemmät jakeet, kuten bensiini, höyrystyvät ja nousevat ylös. Jalostuksen viimeisenä vaiheena tuotteita sekoitetaan ja käsitellään tuottaakseen markkinastandardien mukaisia tuotteita. Esimerkiksi bensiiniä sekoitetaan etanoliin vähittäismyyntiin tarkoitetun bensiinin valmistamiseksi. Tislauksen tuotteena saadaan esimerkiksi raskasöljyä, kevyttä polttoainetta eli dieseliä, petrolia ja bensaa sekä kaasuja. Noin puolet jalostamoiden tuotannosta on bensiiniä. (CME Group) Kuvassa 6 on esitettyä raakaöljyn jalostusprosessi.

Öljyä käytettiin maailmanlaajuisesti noin 15056 miljoonaa litraa päivässä vuonna 2021. Öljyn kulutus on kasvanut vuosittain vuodesta 1998 lähtien lukuun ottamatta vuoden 2008 finanssikriisiä sekä koronapandemiaa vuonna 2020. (Aizarani, 2023.)



Kuva 6. Raakaöljyn jalostusprosessi tislausyksikössä. Muokattu lähteestä (CME Group).

Bensiinin hinta ilman veroja koostuu raakaöljyn hinnasta, jalostuksesta, jakelusta, henkilökunnasta sekä ylläpidosta. Raakaöljyn hinta 4/2023 on ollut 0,50 \$ litraa kohden. Hinta on vaihdellut viimeisen 20 vuoden aikana 0,10–0,88 \$ litralta (Trading Economics). Kiinteät kulut eli henkilökunta, ylläpito ja yleiskulut (verot, vakuutukset, käyttökulut) lisäävät noin 0,016 \$ litraan valmista bensiiniä jalostamon toimiessa täydellä teholla. Muuttuviin jalostuskustannuksiin kuuluu katalyytit ja kemikaalit, jotka lisäävät valmiin bensiinin hintaan 0,006 \$ litraan. Jalostamon tuottaessa 25,4 miljoonaa litraa bensiiniä päivässä vaatii se noin 6 miljardin dollarin investoinnin. Investoinnin kustannukset lisäävät bensiinin hintaa 0,05 \$ litraa kohden. (Favenec, 2022.) Bensiinin hinta vaihtelee siis 0,172–0,952 \$/litra. Bensiinin tiheys on 0,74 kg/litra (Demuyne et al., 2012), joten hinnat kilogrammaa kohden ovat 0,232–1,286 \$/kg.

Bensiinistä aiheutuu kasvihuonepäästöjä raaka-aineen eli raakaöljyn valmistuksesta ja kuljetuksesta, bensiinin valmistuksesta ja kuljetuksesta sekä bensiinin käytöstä. Tästä aiheutuu suurimaksi osaksi hiilidioksidipäästöjä, mutta myös metaani ja typpioksiduulipäästöjä. Näiden päästöjen hiilidioksidiekvivalentti on 91,3 g CO₂ -ekv/MJ. (Ren et al., 2020.)

Taulukko 2. Bensiinin, vedyn ja metanolin vertailu, muokattu lähteestä (Demuynck et al., 2012).

Polttoaine	Bensiini	Vety		Metanoli	
Happipitoisuus massasta [%]	0	0		50	
Tiheys NTP:ssä (kg/l)	0,74	0,00008		0,79	
Alempi lämpöarvo (MJ/kg)	42,9	120		20,17	
Tilavuusenergiasisältö (MJ/l)	31,7	0,010		15,9	
Itsesyttymislämpötila [K]	753–823	848–853		738	
Hinta (\$/kg)	0,232–1,286	Elektrolyysillä 1,87–9,49	Höyryreformoinnilla 1–2,4	Synteettisesti 0,18–1,40	Synteesisikaasusta 0,135–0,295
Hinta (\$/MWh)	19,5–108	56,1–285	30–72	32,1–250	24,1–52,7
Hintakeskiarvo (\$/MWh)	63,8	171	51	141	38,4
Hiilidioksidipäästöt (g CO ₂ -ekv/MJ)	91,3	5,8	95,3	13,6	91,5

Hiilidioksidipäästöt ovat laskettu itse kaavalla (4) vedyn höyryreformoinnille (Valente et al., 2019) ja kaavalla (10) veden elektrolyysille (Valente et al., 2019). Bensiinin hiilidioksidipäästöt on saatu lähteestä (Ren et al., 2020), kun taas synteesisikaasusta ja synteettisesti valmistetulle metanolille päästöt on otettu lähteestä (Zang et al., 2021).

Taulukon 2 hintavaihtelun tekemiseksi käytettiin vedylle lähteitä (Manzotti et al., 2022), (Al-Qah-tani et al. 2021) ja (Muñoz Díaz et al., 2023), synteesisikaasusta tuotetulle metanolille lähteitä (Blumberg et al., 2019 ja (Arnaiz del Pozo et al., 2022), synteettiselle metanolille lähteitä (Zang et al., 2021) ja (Battaglia et al., 2021) ja bensiinille lähteitä (Favenec, 2022) ja (Trading Economics).

Vedyn, metanolin ja bensiinin kustannuslaskelma (liite 1) tehtiin vain osalla lähteistä, joita käytettiin hintavaihtelun saamiseksi taulukkoon 2. Elektrolyysillä valmistetulle vedylle kustannuslaskelma perustuu lähteeseen (Manzotti et al., 2022), synteetisistä lähteistä valmistettu metanoli lähteeseen (Blumberg et al., 2019), synteettisesti valmistettu metanoli lähteeseen (Zang et al., 2021) ja bensiini lähteisiin (Favenec, 2022) ja (Trading Economics).

Loput taulukon arvoista ovat otettu lähteestä (Demuyne et al., 2012). Kustannusarvioiden avulla laskettiin valmistuksesta aiheutuvat kustannukset ja se jaettiin tuotetun polttoaineen määrällä saadakseen selville kilohinta. Kilohinnasta saatiin hinta megajoulea kohden käyttämällä tilavuusenergiasisältöä.

Metanolin ja vedyn saaminen käyttäjälle vaatii infrastruktuuria. Metanoli on nestemäistä normaali paineessa ja -lämpötilassa ja vety kaasua. Metanolin jakeluun voidaan hyödyntää olemassa olevaa nestemäisten polttoaineiden infrastruktuuria, mutta suurempi tuotantokapasiteetti vaatii kuitenkin investointeja. Vedyn jakelussa voidaan hyödyntää maakaasun jakeluverkostoa, mutta vedyn käyttö ajoneuvoissa vaatii investointeja polttoaineen jakeluasemilta. (Singh et al., 2021.) Metanolin ja vedyn hintaan tulee vaikuttamaan infrastruktuurin kehittämisestä aiheutuvat kustannukset.

Verot ovat otettu huomioon pelkästään vedyn hinnan laskemisessa kalvottomien kennojen elektrolyysillä. Verot vaihtelevat tuotantotavasta ja maasta riippuen, joten lopulliset hinnat muuttuvat vielä näistä tuloksista. Uusiutuvan energiankäyttö polttoaineen valmistuksessa todennäköisesti vähentää verotuksen suuruutta, koska hiilidioksidipäästöt vähentyvät.

4. TULOKSET

Tässä luvussa käsitellään metanolin kannattavuutta nykyisten valmistusmenetelmien ja resursien puitteissa. Aiemman tutkimuksen perusteella tehtyihin laskelmiin nojaten käydään läpi kustannuksia, joita vedystä valmistettuun metanoliin liittyy ja vertaillaan näitä kustannuksia bensiinin ja vedyn valmistuksen kustannuksiin. Lopuksi käydään läpi vedystä valmistetun metanolin tulevaisuuden näkymiä.

4.1 Vedystä valmistetun metanolin kannattavuus

Bensiinin, vedyn ja metanolin valmistuksesta syntyviä kustannuksia on koottuna taulukkoon 2. Tärkein rivi taulukossa on polttoaineiden hinta suhteutettuna energiasältöön. Taulukko esittää, että fossiilisista polttoaineista valmistettu polttoaine on edullisempaa kuin uusiutuvalla energialla valmistettu polttoaine. Bensiinin, höyryreformoinnilla valmistetun vedyn ja synteetisikaasusta valmistetun metanolin valmistuskustannukset ovat luokkaa 19,5–72 \$/MWh. Bensiinin hinta on näistä keskimääräisesti kallein energiasältöön suhteutettuna, mutta eniten käytetty. Synteetisikaasusta valmistettu metanoli on näistä keskimääräisesti halvin 38,4 \$/MWh ja se on keskimäärin 12,6 \$/MWh halvempaa kuin höyryreformoinnilla valmistettu vety ja 25,4 \$/MWh halvempaa kuin bensiini.

Vedyn valmistus elektrolyysillä hyödyntäen uusiutuvaa energiaa maksaa 56,1–285 \$/MWh, jolloin se maksaa keskimäärin 125 \$/MWh enemmän kuin fossiilisia polttoaineita hyödyntävissä prosessissa valmistetut polttoaineet. Synteettisesti valmistetun metanolin tuotannossa hyödynnetään uusiutuvaa energiaa ja sen hinta on 32,4–248 \$/Wh, jolloin se on keskimäärin 95 \$/MWh enemmän kuin fossiilisia polttoaineita hyödyntävien prosessien keskimääräinen hinta, mutta keskimäärin 30 \$/MWh halvempi kuin elektrolyysillä valmistetun vedyn hinta. Nykyisessä tilanteessa vihreästä vedystä valmistetun metanolin hinta on yli 2 kertaa kalliimpaa kuin bensiini ja yli 3,5 kertaa kalliimpaa kuin synteetisikaasusta valmistettu metanoli energiasältöön suhteutettuna. Vihreästä vedystä valmistetun metanolin hiilidioksidiekvivalentti on lähes 7 kertaa pienempi kuin bensiinin ja metaanista valmistetun metanolin. Hinta tilanne voi kuitenkin tulevaisuudessa muuttua, jos fossiilisella polttoaineille tulisi korkeammat CO₂ -päästökustannukset.

4.2 Tulevaisuuden näkymät

Vihreästä vedystä valmistetun metanolin tulevaisuuden näkymiin vaikuttavat esimerkiksi nykyisen infrastruktuurin käytettävyys, hiilidioksidipäästöhyvitykset sekä nykyisten vedyn valmistusmenetelmien kehittyminen. Metanolin jakelussa voidaan tulevaisuudessa hyödyntää olemassa olevaa infrastruktuuria bensiinille, mutta infrastruktuuria on lisättävä suuremman kapasiteetin metanolin tuotannolle. Metanolin energiasisältö on puolet verrattuna bensiiniin, jolloin polttoainetankkien täytyy olla suurempia saman energiamäärän varastoimiseksi.

Synteettisesti valmistetun metanolin hinnan alimmaksi arvoksi saatu 32,1 \$/MWh on kilpailukykyinen bensiinin ja höyryreformoinnilla valmistetun vedyn rinnalla. Metanolin alhainen hinta vaatii kuitenkin nykyistä korkeampaa hiilidioksidipäästöhyvitystä. Hyvityksen suuruuden täytyisi olla 200 \$/Mt hiilidioksidia. Tulevaisuudessa hyvityksen suuruuden voidaan uskoa kasvavan johtuen halusta torjua ilmastonmuutos. Uusiutuvasti valmistetut polttoaineet ovat hyvä tapa vähentää ilmastoon joutuvien hiilidioksidipäästöjen määrää. Tämä muutos vaatii valtioiden välistä yhteistyötä.

Myös menetelmissä on heikkouksia ja parantamisen varaa. Yleisimmät veden elektrolyysijärjestelmät ovat alkaliset ja PEM-elektrolysaattorit. Järjestelmien heikkouksia ovat lyhyt elinikä, heikko hyötysuhde ja kallis hinta. Uusien parempien materiaalien löytäminen elektrolyysiin on tärkeässä roolissa heikkouksien poistamiseksi. PEM-kennoissa on kehitetty halvempia rutenium materiaaleja korvaamaan kallista platinaa. Myös jalometallien käyttö korroosion estämiseksi parantaa elektrolyysin hyötysuhdetta sekä suuremman tuotantokapasiteetin avulla pystytään pudottamaan yksikkökustannuksia. Menetelmien kehittäminen on siis myös olennaisessa roolissa vedystä valmistetun metanolin kustannustehokkuuden parantamisessa tulevaisuudessa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkielmassa käsiteltiin nykypäivän ja lähitulevaisuuden metanolin sekä vedyn tuotantoteknologioita. Kirjallisuuskatsauksen perusteella tärkein vedyn valmistustapa nykypäivänä on höyryreformointi ja tulevaisuudessa veden elektrolyysi eli vihreä vety. Myös vedyn jatkojalostuksessa metanoliksi käytetyin menetelmä nykypäivänä on höyryreformointi ja tulevaisuudessa enenevässä määrin vihreä vety. Näitä teknologioita vertailtiin tutkielmassa taloudellisesta näkökulmasta. Höyryreformointi toimii korkealla hyötysuhteella ja on kustannustehokas, mutta aiheuttaa ympäristölle haitallisia päästöjä. Vihreän vedyn hyödyntäminen taas aiheuttaa vähemmän päästöjä ympäristölle, mutta vaatii suuremman mittaluokan tuotantoa, suurempaa hiilidioksidihyvitystä sekä korkeampaa hyötysuhdetta kilpaillakseen kustannustehokkuudessa höyryreformoinnin kanssa.

Vuonna 2030 vihreän vedyn kysynnän oletetaan olevan 15-30Mt. Osa vihreästä vedystä menee synteettisen metanolin valmistukseen. Vihreästä vedystä valmistettu metanoli voi toimia tulevaisuudessa ilmastoystävällisempänä vaihtoehtona fossiilisille polttoaineille kuten bensiinille. Vihreästä vedystä valmistettu metanoli ei kuitenkaan vielä yllä kustannustehokkuudessaan fossiilisista polttoaineista valmistettujen polttoaineiden tasolle. Synteettisen metanolin hinta on nykytilanteessa vielä yli 2 kertaa kalliimpaa kuin bensiini ja yli 3,5 kertaa kalliimpaa kuin metaanista valmistettu metanoli energiasisältöön suhteutettuna. Synteettisen metanolin hiilidioksidiekvivalentti on lähes 7 kertaa pienempi kuin bensiinin ja metaanista valmistetun metanolin. Vedystä valmistetun metanolin kustannustehokkuutta voitaisiin parantaa laskemalla vedyn hintaa sekä tehostamalla elektrolyysikennoja. Vedyn hinnan alentaminen vaatii halvempaa sähköä, joka on mahdollista toteutettua esimerkiksi kasvattamalla tuuli- ja aurinkoenergian kapasiteettia. Elektrolyysikennojen huonoa hyötysuhdetta, lyhyttä elinikää ja kallista hintaa voidaan parantaa tuotantokapasiteettien kasvattamisella sekä parempien valmistusmateriaalien avulla.

Synteettisestä metanolista on koko ajan enemmän tietoa saatavilla ja sitä tutkitaan yhä enemmän. Työssä esiteltyjä teknologioita kehitetään jatkuvasti ja näin ollen tuotantomäärät kasvavat ja hinta laskee. Synteettisen metanolin kehittäminen ja sen käyttöönotto fossiilisten polttoaineiden sijaan asettaa haasteen tuleville vuosikymmenille, mutta sen tuomat mahdollisuudet voivat olla ratkaisevan tärkeitä ilmastonmuutoksen torjunnassa.

LÄHTEET

Al-Qahtani, A., Parkinson, B., Hellgardt, K., Shah, N., Guillen-Gosalbez, G., 2021. Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Applied energy* 281, 115958-.

Arnaiz del Pozo, C., Cloete, S., Jiménez Álvaro, Á., 2022. Techno-economic assessment of long-term methanol production from natural gas and renewables. *Energy conversion and management* 266, 115785-.

Atsonios, K., Panopoulos, K.D., Kakaras, E., 2016. Investigation of technical and economic aspects for methanol production through CO₂ hydrogenation. *International journal of hydrogen energy* 41, 2202–2214.

Battaglia, P., Buffo, G., Ferrero, D., Santarelli, M., Lanzini, A., 2021. Methanol synthesis through CO₂ capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment. *Journal of CO₂ utilization* 44, 101407-.

Blumberg, T., Morosuk, T., Tsatsaronis, G., 2017. Exergy-based evaluation of methanol production from natural gas with CO₂ utilization. *Energy (Oxford)* 141, 2528–2539.

Blumberg, T., Tsatsaronis, G., Morosuk, T., 2019. On the economics of methanol production from natural gas. *Fuel (Guildford)* 256, 115824-.

Carbon recycling international. n.d. Carbon dioxide to methanol since 2012. Verkkosivu. Viitattu 13.6.2023. <https://www.carbonrecycling.is/>

CME Group. n.d. A look into the refining process. Verkkosivu. Viitattu 19.3.2023. <https://www.cmegroup.com/education/courses/introduction-to-refined-products/a-look-into-the-refining-process.html>

Demuynck, J., Van De Ginste, M., Verhelst, S., 2012. Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline – Engine efficiency study. *International journal of hydrogen energy* 37, 9914–9924.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. Ellen MacArthur Foundation.

Euroopan parlamentti. 4.2023. Energiapolitiikka: yleiset periaatteet. Verkkosivu. Viitattu 22.6.2023. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fs/sheet/68/energiapolitiikka-yleiset-periaatteet>

Favennec, J.P. 28.5.2022. Economics of oil refining. Palgrave Macmillan. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-86884-0_3#Sec8

Trading economics. n.d. Crude oil. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023. <https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>

Hu, J., Koning, V., Bosshard, T., Harmsen, R., Crijns-Graus, W., Worrell, E., van den Broek, M., 2023. Implications of a Paris-proof scenario for future supply of weather-dependent variable renewable energy in Europe. *Advances in applied energy* 10, 100134-.

Huang, R., Kang, L., Liu, Y., 2022. Renewable synthetic methanol system design based on modular production lines. *Renewable & sustainable energy reviews* 161, 112379-.

Ingham, A., 2017. Reducing the Carbon Intensity of Methanol for Use as a Transport Fuel: Impact of technology choice on greenhouse gas emissions when producing methanol from natural gas. *Johnson Matthey technology review* 61, 297-.

Jessica Aizarani. (2.3.2023), Global oil consumption 1998-2021. Statista. <https://www-statista.com/statistics/265239/global-oil-consumption-in-barrels-per-day/>

Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., Jäger-Waldau, A., 2021. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy conversion and management* 228, 113649-.

Keipi, T., Tolvanen, H., Konttinen, J., 2018. Economic analysis of hydrogen production by methane thermal decomposition: Comparison to competing technologies. *Energy conversion and management* 159, 264–273.

Kelola, K. 19.10.2021. Mullistaako vety maailman energijärjestelmän?. Verkkosivu. Viitattu 23.2.2023. <https://www.helen.fi/ajankohtaista/arjessa/ilmi%C3%B6t/vety>

LeValley, T.L., Richard, A.R., Fan, M., 2014. The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies – A review. *International journal of hydrogen energy* 39, 16983–17000.

Manzotti, A., Quattrocchi, E., Curcio, A., Kwok, S.C.T., Santarelli, M., Ciucci, F., 2022. Membraneless electrolyzers for the production of low-cost, high-purity green hydrogen: A techno-economic analysis. *Energy conversion and management* 254, 115156-.

Motiva. 4.8.2020. Vety. Verkkosivu. Viitattu 12.2.2023 <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/valitse-auto-viisaasti/energialahteet/vety>

Muñoz Díaz, M.T., Chávez Oróstica, H., Guajardo, J., 2023. Economic Analysis: Green Hydrogen Production Systems. *Processes* 11, 1390-.

Navas-Anguita, Z., García-Gusano, D., Dufour, J., Iribarren, D., 2021. Revisiting the role of steam methane reforming with CO₂ capture and storage for long-term hydrogen production. *The Science of the total environment* 771, 145432–145432.

Nawfal, M., Gennequin, C., Labaki, M., Nsouli, B., Aboukaïs, A., Abi-Aad, E., 2015. Hydrogen production by methane steam reforming over Ru supported on Ni–Mg–Al mixed oxides prepared via hydrotalcite route. *International journal of hydrogen energy* 40, 1269–1277.

Olah, G.A., Goepfert, A., Prakash, G.K.S., 2009. Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons. *Journal of organic chemistry* 74, 487–498.

Reksten, A.H., Thomassen, M.S., Møller-Holst, S., Sundseth, K., 2022. Projecting the future cost of PEM and alkaline water electrolyzers; a CAPEX model including electrolyser plant size and technology development. *International journal of hydrogen energy* 47, 38106–38113.

Ren, L., Zhou, S., Ou, X., 2020. Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China. *Energy (Oxford)* 209, 118482-.

Sá, S., Silva, H., Brandão, L., Sousa, J.M., Mendes, A., 2010. Catalysts for methanol steam reforming—A review. *Applied catalysis. B, Environmental* 99, 43–57.

Sheldon, D., 2017. Methanol Production – A Technical History: A review of the last 100 years of the industrial history of methanol production and a look into the future of the industry. *Johnson Matthey technology review* 61, 172-.

Singh, R., Singh, M., Gautam, S., 2021. Hydrogen economy, energy, and liquid organic carriers for its mobility, in: *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, pp. 5420–5427.

St1. 4.10.2022. St1 suunnittelee synteettisen metanolin pilottilaitosta Lappeenrantaan. Verkkosivu. Viitattu 13.6.2023. <https://www.st1.fi/st1-suunnittelee-synteettisen-metanolin-pilottilaitosta-lappeenrantaan>

Valente, A., Iribarren, D., Dufour, J., 2019. Harmonising methodological choices in life cycle assessment of hydrogen: A focus on acidification and renewable hydrogen. *International journal of hydrogen energy* 44, 19426–19433.

Wappler, M., Unguder, D., Lu, X., Ohlmeyer, H., Teschke, H., Lueke, W., 2022. Building the green hydrogen market – Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International journal of hydrogen energy* 47, 33551–33570.

Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F.N., Al Makky, A., Baroutaji, A., Carton, J.G., Olabi, A.G., 2017. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International journal of hydrogen energy* 42, 25695–25734.

Zang, G., Sun, P., Elgowainy, A., Wang, M., 2021. Technoeconomic and Life Cycle Analysis of Synthetic Methanol Production from Hydrogen and Industrial Byproduct CO₂. *Environmental science & technology* 55, 5248–5257.

LIITE A: KUSTANNUSLASKELMAT

KUSTANNUSLASKELMAT

Tässä liitteessä on laskettu vedyn ja metanolin hinnat kilogrammaa kohden erituotantotavoilla. Laskuja on suoritettu eri tuotantomäärillä ja raaka-aineiden kustannuksilla. Lisäksi bensiinin hintaväli on laskettu raakaöljyn kalleimman ja halvimmän hinnan avulla lisäten siihen muut tuotannosta aiheutuvat kustannukset. Hinnat saadaan muotoon \$/kg, josta kaavan (1) avulla voidaan muuttaa hinnat muotoon \$/MWh.

$$P_{\frac{\$}{\text{MWh}}} = \frac{P_{\frac{\$}{\text{kg}}} * 3600}{LHV} \quad (1)$$

, jossa $P_{\frac{\$}{\text{MWh}}}$ on hinta megawattituntia kohden, $P_{\frac{\$}{\text{kg}}}$ on hinta kilogrammaa kohden ja LHV on alempilämpöarvo.

Vihreän vedyn valmistuskustannukset

Vedyn valmistuskustannukset tuotettua vety kiloa kohden Euroopassa, kun vedyn tuotantomäärät ovat 500 tH₂/vuodessa ja 1000 tH₂/vuodessa. Laitokset ovat kehittyneitä tuotantoyksiköitä. Sähkö on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä ja sähkön hinta on molemmissa tuotantomäärissä sama 2,20 \$/kg H₂, Käyttö ja kunnossapito kustantavat 0,61 \$/kg H₂ ja 0,55 \$/kg H₂, materiaalit 0,05 \$/kg H₂, elektrolysaattorin lisäosat 0,38 \$/kg H₂ ja 0,33 \$/kg H₂, käyttöomaisuuden investoinnit 0,27 \$/kg H₂ ja 0,24 \$/kg H₂ ja viimeiseksi verot 0,61 \$/kg H₂ ja 0,58 \$/kg H₂. Prosessissa syntyy lisäksi lämpöä ja happea, joista saadaan tuloja 1,35 \$/kg H₂. Tästä voidaan laskea yhteenlaskulla molemmissa tapauksissa aiheutuvat vedyn valmistuskustannukset. (Manzotti et al., 2022).

$$\begin{aligned} P_{500} &= 2,20 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,61 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,05 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,38 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,27 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,61 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 - 1,35 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 \\ &= 2,77 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{1000} &= 2,20 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,55 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,05 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,33 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,24 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,58 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 - 1,35 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 \\
 &= 2,60 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2
 \end{aligned}$$

Laitoksen tuottaessa 500 tH₂/vuodessa, saadaan vedyn hinnaksi 2,77 \$/kg H₂. Vedyn hinta 1000 tH₂/vuodessa tuottavalla laitoksella on 2,60 \$/kg H₂.

Tarkastellaan vielä vertailun vuoksi eurooppalaista varhaisessa vaiheessa olevaa laitosta, joka tuottaa 500 tH₂/vuodessa. Laitos ottaa sähkön sähköverkosta. Tällöin sähkön hinta on 6,69 \$/kg H₂, käyttö ja kunnossapito ovat 0,47 \$/kg H₂, materiaalit ovat 0,09 \$/kg H₂, elektrolysaattorin lisäosat ovat 0,23 \$/kg H₂, käyttöomaisuuden investoinnit 0,25 \$/kg H₂ ja verot 0,48 \$/kg H₂. Lämmöstä ja hapestä saadut tuotot 1,35 \$/kg H₂. Vedyn hinta lasketaan kustannusten ja tulojen summana. (Manzotti et al., 2022).

$$\begin{aligned}
 P_{500,g} &= 6,69 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,47 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,09 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,23 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,25 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 + 0,48 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 - 1,35 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2 \\
 &= 6,86 \frac{\$}{\text{kg}} \text{H}_2
 \end{aligned}$$

Varhaisessa vaiheessa olevan laitoksen vedyn tuotantokustannukset ovat 6,86 \$/kg H₂.

Vedyn alempilämpöarvo on 120 MJ/kg (Demuyne et al., 2012). Muutetaan kaavalla (1) vedyn hinnat \$/kg:sta \$/MWh:iin. Lasketaan ensin alimmalla saadulla hinnalla eli 2,60 \$/kg ja sitten ylimmällä eli 6,86 \$/kg.

$$P_{\frac{\$}{\text{MWh}}} = \frac{2,60 \frac{\$}{\text{kg}} * 3600}{120 \text{ MJ/kg}} = 78 \frac{\$}{\text{MWh}}$$

Alimmaksi vihreän vedyn hinnaksi saadaan 78 \$/MWh.

$$P_{\frac{\$}{\text{MWh}}} = \frac{6,86 \frac{\$}{\text{kg}} * 3600}{120 \text{ MJ/kg}} = 206 \frac{\$}{\text{MWh}}$$

Ylimmäksi vihreän vedyn hinnaksi saadaan 206 \$/MWh.

Vihreän vedyn hintavaihteluksi saadaan 78–206 \$/MWh (Demuyne et al., 2012; Manzotti et al., 2022).

Synteesikaasusta tuotetun metanolin valmistuskustannukset

Metaanista prosessikaasuna ja polttoaineena aiheutuvat kustannukset voidaan lasketa kaavalla (2).

$$FC_L = \dot{m}_{\text{fuel}} * LHV * t * f_c \quad (2)$$

, jossa \dot{m}_{fuel} on metaanin massavirta, LHV on alempilämpöarvo, t on käyttöaika ja f_c on metaanin hinta.

Metaania kuluu polttoaineena ja prosessikaasuna 55,6 kg/s ja alempilämpöarvo on 54 MJ/kg. Metaanin hinta on 2,9 \$/GJ ja käyttöaika vuodessa 8000 h (Blumberg et al., 2019). Lasketaan metaanista syntyvät kustannukset kaavan (2) avulla.

$$FC_L = 55,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 54 \frac{\text{GJ}}{\text{kg}} * 10^{-3} * 8000 * 3600\text{s} * 2,9 \frac{\$}{\text{GJ}} = 250 \text{ M\$}$$

Metaanista syntyvät kustannukset polttoaineena ja prosessikaasuna ovat 250 M\$. Laitoksesta syntyy käyttö ja ylläpitokustannuksia (Operation And Maintenance cost, OMC) 62,8 M\$/vuosi. Kuljetuskustannuksia (Carrying Charge, CC) syntyy laitoksessa 68,7 M\$/vuosi. Lisäksi laitoksesta syntyy käyttö ja ylläpitokustannuksia (Operation And Maintenance cost, OMC) 62,8 M\$/vuosi. (Blumberg et al., 2019.)

Laitos tuottaa sähköä (W_{net}) 140,2 MW hintaan (C_{elec}) 113,4 \$/MWh sekä metanolia (\dot{m}_{MeOH}) 2590 t/d (Blumberg et al., 2019).

Metanolin vähimmäismyyntihinta saadaan laskettua laskemalla laitoksen vuosittaiset kustannukset yhteen ja jakamalla se tuotetun metanolin määrällä. Kaavassa (3) on esitetty metanolin vähimmäismyyntihinnan laskukaava.

$$MC_{MeOH} = \frac{CC + FC_L + OMC - W_{net} * t * C_{elec}}{\dot{m}_{MeOH} * t} \quad (3)$$

Lasketaan metaanin vähimmäismyyntihinta kaavalla (3).

$$MC_{MeOH} = \frac{(68,7 + 250 + 62,8) * 10^6 \$ - 140,2 \text{ MW} * 113,4 \frac{\$}{\text{MWh}} * 8000 \text{ h}}{2590 * 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{d}} * 365 * \frac{8000 \text{ h}}{8765 \text{ h}}} = 0,295 \frac{\$}{\text{kg}}$$

Synteesikaasusta valmistetun metanolin vähimmäismyyntihinnaksi saadaan $0,295 \frac{\$}{\text{kg}}$.

Metanolin alempilämpöarvo on $20,17 \text{ MJ/kg}$ (Demuyne et al., 2012). Muutetaan kaavalla (1) synteesikaasusta valmistetun metanolin hinta $\$/\text{kg}$:sta $\$/\text{MWh}$:iin. Lasketaan hinta saadulla vähimmäismyyntihinnalla $0,295 \frac{\$}{\text{kg}}$.

$$P \frac{\$}{\text{MWh}} = \frac{0,295 \frac{\$}{\text{kg}} * 3600}{20,17 \text{ MJ/kg}} = 52,6 \frac{\$}{\text{MWh}}$$

Synteesikaasusta valmistetun metanolin vähimmäismyyntihinnaksi saadaan muunnoksen jälkeen $52,6 \text{ \$/MWh}$ (Demuyne et al., 2012; Blumberg et al., 2019).

Synteettisen metanolin valmistuskustannukset

Jäähdytysveden, prosessiveden ja teollisuussähkön yhteissumma vuosittain on $8,5 \text{ M\$}$. Työntekijöihin käytetään vuosittain $17 \text{ M\$}$ ja katalyytin vaihdosta syntyvät vuosittaiset kustannukset ovat $0,75 \text{ M\$}$. Suurimmat asennettujen laitteiden kustannukset ovat $76 \text{ M\$}$, $50 \text{ M\$}$ ja $40 \text{ M\$}$, jotka ovat $35,8 \%$, $23,3 \%$ ja $19,0 \%$ poistettavissa olevista pääomakustannuksista. Lasketaan yhteenlaskulla vuosittain syntyvät kustannukset. (Zang et al., 2021.)

$$C_m = 8,5 \text{ M\$} + 17 \text{ M\$} + 0,75 \text{ M\$} + 76 \text{ M\$} * 0,358 + 50 \text{ M\$} * 0,233 + 40 \text{ M\$} * 0,19 = 72,7 \text{ M\$}$$

Laitoksen vuosittaiset kustannukset muuhun kuin raaka-aineisiin on $72,7 \text{ M\$}$.

Raaka-aineista eli vedystä ja hiilidioksidista aiheutuvat kustannukset saadaan laskettua kaavalla (4).

$$C_r = \dot{m}_{H_2} * C_{H_2} * t + \dot{m}_{CO_2} * C_{CO_2} * t \quad (4)$$

, jossa \dot{m}_{H_2} on vedyn massavirta, C_{H_2} on vedyn hinta, \dot{m}_{CO_2} on hiilidioksidin massavirta, C_{CO_2} on hiilidioksidin hinta ja t on aika.

Vetyä kulutetaan 243 t/d hintaan 2 \$/kg ja hiilidioksidia 1978 t/d hintaan 38,6 \$/t. Metanolia prosessista saadaan 1190 t/d (Zang et al., 2021). Lasketaan raaka-aineista eli vedystä ja hiilidioksidista syntyvät kustannukset vuodessa kaavalla (4).

$$C_r = 243 \frac{t}{d} * 1000kg * 365 d * 2 \frac{\$}{kg} + 1978 \frac{t}{d} * 38,6 \frac{\$}{t} * 365d = 205 M\$$$

Lasketaan sitten kaikki kustannukset yhteen ja jaetaan tuotetun metanolin määrällä kaavaa (5) käyttäen. Tulokseksi saadaan metanolin hinta vedyn hinnalla 2 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg.

$$MC_{MeOH} = \frac{C_r + C_m}{\dot{m}_{MeOH} * t} = \frac{205 M\$ + 72,7 M\$}{1190 \frac{t}{d} * 1000kg * 365d} = 0,64 \frac{\$}{kg} \quad (5)$$

Metanolin hinta vedyn hinnalla 2 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg on 0,64 \$/kg.

Vedyn valmistus elektrolyysillä nostaa vedyn hinnan 5 \$/kg, jolloin raaka-aineista syntyvät kustannukset voidaan laskea uudelleen kaavalla (4).

$$C_r = 243 \frac{t}{d} * 1000kg * 365 d * 5 \frac{\$}{kg} + 1978 \frac{t}{d} * 38,6 \frac{\$}{t} * 365d = 471 M\$$$

Raaka-aineiden kustannukset vedyn hinnan 5 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg on 471 M\$.

Lasketaan sitten kaikki kustannukset yhteen ja jaetaan tuotetun metanolin määrällä kaavaa (5) käyttäen. Tulokseksi saadaan metanolin hinta vedyn hinnalla 5 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/t.

$$MC_{\text{MeOH}} = \frac{C_r + C_m}{\dot{m}_{\text{MeOH}} * t} = \frac{471 \text{ M\$} + 72,7 \text{ M\$}}{1190 \frac{\text{t}}{\text{d}} * 1000 \text{ kg} * 365 \text{ d}} = 1,25 \frac{\$}{\text{kg}}$$

Metanolin hinnaksi vedyn hinnalla 5 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/t saadaan 1,25 \$/kg.

Uusiutuvaa energianlähdettä käyttäessä hiilidioksidipäästöt vähenevät ja niistä voidaan antaa hyvityksiä. Jos hiilidioksidipäästöjen määrän vähentämisestä annetaan hyvitystä 35 \$/t, saadaan hyvityksen suuruus laskettua hyödyntäen kaavaa (4).

$$C_h = 35 \frac{\$}{\text{t}} * 365 \text{ d} * 1987 \frac{\text{t}}{\text{d}} = 25,3 \text{ M\$}$$

Hiilidioksidihyvityksen suuruudeksi hyvityksellä 35 \$/t tulee 25,3 M\$.

Lasketaan sitten kaikki kustannukset yhteen ja jaetaan tuotetun metanolin määrällä kaavaa (5) käyttäen. Tulokseksi saadaan metanolin vähimmäismyyntihinta vedyn hinnalla 2 \$/kg, hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg ja hiilidioksidihyvityksellä 35 \$/t.

$$MC_{\text{MeOH}} = \frac{C_r + C_m - C_h}{\dot{m}_{\text{MeOH}} * t} = \frac{205 \text{ M\$} + 72,7 \text{ M\$} - 25,3 \text{ M\$}}{1190 \frac{\text{t}}{\text{d}} * 1000 \text{ kg} * 365 \text{ d}} = 0,58 \frac{\$}{\text{kg}}$$

Metanolin vähimmäismyyntihinta vedyn hinnalla 2 \$/kg, hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg ja hiilidioksidihyvityksellä 35 \$/t on 0,58 \$/kg.

Hiilidioksidihyvityksen kasvaessa 200 \$/t hyvityksen suuruus saadaan laskettua kaavalla (4).

$$C_h = 200 \frac{\$}{\text{t}} * 365 \text{ d} * 1000 \text{ kg} = 144 \text{ M\$}$$

Hiilidioksidihyvityksen suuruudeksi hyvityksellä 200 \$/t tulee 144 M\$.

Lasketaan sitten raaka-ainekustannukset vedyn hinnalla 1,35 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg kaavalla (4).

$$C_r = 243 \frac{t}{d} * 1000kg * 365 d * 1,35 \frac{\$}{kg} + 1978 \frac{t}{d} * 38,6 \frac{\$}{t} * 365d = 149 M\$$$

Raaka-aineiden hinnaksi vedyn hinnalla 1,35 \$/kg ja hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/kg saadaan 149 M\$.

Lasketaan sitten kaikki kustannukset yhteen ja jaetaan tuotetun metanolin määrällä kaavaa (5) käyttäen. Tulokseksi saadaan metanolin hinta vedyn hinnalla 1,35 \$/kg, hiilidioksidin hinnalla 38,6 \$/t sekä hiilidioksidihyvityksellä 200 \$/t.

$$MC_{MeOH} = \frac{C_r + C_m - C_h}{m_{MeOH} * t} = \frac{149 M\$ + 72,7 M\$ - 144 M\$}{1190 \frac{t}{d} * 1000kg * 365d} = 0,18 \frac{\$}{kg}$$

Alhaisella vedyn hinnalla 1,35 \$/kg ja korkealla hiilidioksidihyvityksellä 200 \$/t tuotetun metanolin hinnaksi saadaan 0,18 \$/kg.

Metanolin alempilämpöarvo on 20,17 MJ/kg (Demuyne et al., 2012). Muutetaan kaavalla (1) synteettisen metanolin hinnat \$/kg:sta \$/MWh:iin. Lasketaan ensin alimmalla saadulla hinnalla eli 0,18 \$/kg ja sitten ylimmällä eli 1,25 \$/kg.

$$P_{\frac{\$}{MWh}} = \frac{0,18 \frac{\$}{kg} * 3600}{20,17 MJ/kg} = 32,1 \frac{\$}{MWh}$$

Synteettisen metanolin alimmaksi hinnaksi saadaan 32,1 \$/MWh.

$$P_{\frac{\$}{MWh}} = \frac{1,25 \frac{\$}{kg} * 3600}{20,17 MJ/kg} = 223 \frac{\$}{MWh}$$

Synteettisen metanolin ylimmäksi hinnaksi saadaan 223 \$/MWh.

Synteettisen metanolin hintavaihteluksi saadaan 32,1–223 \$/MWh (Demuyne et al., 2012; Zang et al., 2021).

Bensiinin valmistuskustannukset

Bensiinin valmistus vaatii raaka-aineena raakaöljyä. Raakaöljyn hinta on ollut viimeisen 20 vuoden aikana 0,10–0,88 \$/l (Trading Economics).

Hinnat ovat lähteessä (Favenec, 2022) esitetty barreliä kohden. Yhden barrelin koko on 159 litraa.

Laitos tuottaa 160000 barreliä bensiiniä päivässä. Lasketaan laitoksen tuottama määrä litroina.

$$T = 160000 \frac{b}{d} * 159l * 365d = 9286 * 10^6 l = 9286 \text{ Ml}$$

, jossa b on barreli, d on vuorokausi ja l on litra. Laitos tuottaa siis 9286 miljoonaa litraa bensiiniä vuodessa.

Laitoksessa syntyy vuodessa kiinteitä kuluja henkilökunnasta 40 M\$, ylläpidosta 100 M\$ ja yleiskuluista 10 M\$. Lasketaan kiinteät kustannukset yhteenlaskulla.

$$KIK = 40 \text{ M\$} + 100 \text{ M\$} + 10 \text{ M\$} = 150 \text{ M\$}$$

Kiinteitä kustannuksia syntyy yhteensä 150 M\$ vuodessa. Muuttuvia kustannuksia (MK) vuodessa syntyy katalyyteistä ja kemikaaleista 58 M\$ vuodessa. (Favenec, 2022.)

Laitoksen investointikustannukset ovat 6000 M\$ (Favenec, 2022). Oletetaan laitoksen käyttöiksi 13 vuotta, jolloin pääoman arvo on alentunut paljon. Laitoksen investointikustannukset jaetaan 13 vuodelle. Investoinnista aiheutuneet vuosittaiset kustannukset saadaan laskettua jakolaskulla.

$$IK = \frac{6000\text{M\$}}{13} = 461,5 \text{ M\$}$$

Bensiinin valmistuksen kokonaiskustannukset saadaan laskemalla kaikki kustannukset yhteen kaavalla (6).

$$KK = IK + KIK + MK \tag{6}$$

Sijoitetaan kiinteät kustannukset, muuttuvat kustannukset ja investointikustannukset kaavaan (6), jolloin saadaan kokonaiskustannukset.

$$KK = 461,5 \text{ M\$} + 150 \text{ M\$} + 58 \text{ M\$} = 670 \text{ M\$}$$

Raakaöljyn jalostamisen hinta litraa kohden saadaan laskettua jakamalla kokonaiskustannukset tuotetulla bensiinin määrällä kaavalla (7).

$$\frac{KK}{T} = \frac{IK + KIK + MK}{T} \quad (7)$$

Sijoitetaan kaavaan (7) kokonaiskustannukset ja tuotetun bensiinin määrä litroina.

$$\frac{670 \text{ \$} \cdot 10^6}{9286 \cdot 10^6 \text{ l}} = 0,0721 \frac{\text{\$}}{\text{l}}$$

Hinta ilman raakaöljyä on 0,0721 \$/l. Tähän lisätään raakaöljyn hinta, jolloin saadaan bensiinin hinta. Lasketaan ensin bensiinin alin hinta lisäämällä valmistuskustannuksiin raakaöljyn alin hinta.

$$0,10 \frac{\text{\$}}{\text{l}} + 0,0721 \frac{\text{\$}}{\text{l}} = 0,172 \frac{\text{\$}}{\text{l}}$$

Lasketaan sitten bensiinin ylin hinta lisäämällä valmistuskustannuksiin raakaöljyn ylin hinta.

$$0,88 \frac{\text{\$}}{\text{l}} + 0,0721 \frac{\text{\$}}{\text{l}} = 0,952 \frac{\text{\$}}{\text{l}}$$

Bensiinin hinnaksi saadaan 0,172–0,952 \$/l riippuen raakaöljyn hinnasta. Bensiinin tiheys on 0,74 kg/l (Demuynck et al., 2012). Jaetaan bensiinin ylin ja alin hinta bensiinin tiheydellä, jolloin saadaan bensiinin hinnaksi 0,232–1,286 \$/kg.

Bensiinin alempilämpöarvo on 42,9 MJ/kg (Demuynck et al., 2012). Muutetaan kaavalla (1) bensiinin hinnat \$/kg:sta \$/MWh:iin. Lasketaan ensin alimmalla saadulla hinnalla eli 0,232 \$/kg ja sitten ylimmällä eli 1,286 \$/kg.

$$P \frac{\$}{\text{MWh}} = \frac{0,232 \frac{\$}{\text{kg}} * 3600}{42,9 \text{ MJ/kg}} = 19,46 \frac{\$}{\text{MWh}}$$

Bensiinin alimmaksi hinnaksi saadaan 19,5 \$/MWh.

$$P \frac{\$}{\text{MWh}} = \frac{1,286 \frac{\$}{\text{kg}} * 3600}{42,9 \text{ MJ/kg}} = 107,9 \frac{\$}{\text{MWh}}$$

Bensiinin ylimmäksi hinnaksi saadaan 108 \$/MWh.

Bensiinin hintavaihtelu on siis 19,5–108 \$/MWh (Favennec, 2022; Demuynck et al., 2012; Trading Economics).

LÄHTEET

Blumberg, T., Tsatsaronis, G., Morosuk, T., 2019. On the economics of methanol production from natural gas. *Fuel* (Guildford) 256, 115824-.

Demuynck, J., Van De Ginste, M., Verhelst, S., 2012. Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline – Engine efficiency study. *International journal of hydrogen energy* 37, 9914–9924.

Favennec, J.P. 28.5.2022. Economics of oil refining. Palgrave Macmillan. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-86884-0_3#Sec8

Manzotti, A., Quattrocchi, E., Curcio, A., Kwok, S.C.T., Santarelli, M., Ciucci, F., 2022. Membraneless electrolyzers for the production of low-cost, high-purity green hydrogen: A techno-economic analysis. *Energy conversion and management* 254, 115156-.

Zang, G., Sun, P., Elgowainy, A., Wang, M., 2021. Technoeconomic and Life Cycle Analysis of Synthetic Methanol Production from Hydrogen and Industrial Byproduct CO₂. *Environmental science & technology* 55, 5248–5257.