

Valtteri Välimäki

HIILIDIOKSIDISTA VALMISTETTAVAT UUSIUTUVAT SYNTEETTISET POLTTO- AINEET

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Maaliskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Valtteri Välimäki: Hiilidioksidista valmistettavat uusiutuvat synteettiset polttoaineet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Maaliskuu 2020

Uusiutuvilla synteettisillä polttoaineilla voidaan vähentää riippuvuutta fossiilista polttoaineista. Jos niiden tuottamiseen on käytetty uusiutuvaa energiaa, ovat ne hiilineutraaleja. Synteettisiä polttoaineita voidaan tuottaa hiilidioksidista useita eri menetelmiä käyttäen. Näitä ovat esimerkiksi metanointi biologisesti tai katalyyttisesti. Muita tapoja on hiilidioksidin ja vedyn muuntaminen synteetisikaasuksi, josta voidaan Fischer-Tropsch-menetelmällä tuottaa erilaisia hiilivetyjä

Synteettisten polttoaineiden tuottamisen ympäristövaikutukset riippuvat suuresti prosissa käytetyn energian laadusta. Etenkin vedyn tuottamiseen elektrolyysillä kuluu paljon energiaa. Energian tulisi olla uusiutuvasta lähteestä, jotta synteettisillä polttoaineilla olisi positiivinen ympäristövaikutus.

Synteettisten polttoaineiden tuottamiseen kuluu paljon energiaa. Suurin osa energiasta kuluu vedyn tuotantoon ja hiilidioksidin talteenottoon. Lisäksi synteettisten polttoaineiden tuotantolaitosten investointikustannukset ovat korkeita. Tämän takia niiden tuottaminen ei vielä ole taloudellisesti kannattavaa.

Avainsanat: hiilidioksidi, synteettinen polttoaine, metanoli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TAUSTA JA MOTIVAATIO VALMISTAA SYNTEETTISIÄ POLTTOAINEITA.....	3
3. VALMISTUSPROSESSEJA	6
4. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA	11
5. TALOUDELLINEN NÄKÖKULMA	13
6. TULEVAISUUDEN POTENTIAALI SUOMESSA	16
7. YHTEENVETO.....	17
8. LÄHTEET.....	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DAC	engl. Direct air capture
DMS	engl. direct methanol synthesis, suora metanolin synteesi
FT	Fischer-Tropsch
MS	engl. Methanol synthesis, metanolin synteesi
MDR	engl. Methane dry reforming, metaanin kuivareformointi
MSR	engl. Methane steam reforming, metaanin höyryreformointi
PEM	engl. Proton exchange membrane, protoninvaihtokenno
SNG	engl. Synthetic natural gas, synteettinen maakaasu
SR	Sabatier-reaktio
RWGS	engl. Reverse water-gas shift reaction, käänteinen veden kaasutusreaktio
SOEC	engl. Solid Oxide electrolyser cell, kiinteäoksidikenno

1. JOHDANTO

Ilman hiilidioksidipitoisuuden kasvu on ongelma, johon pitää puuttua. Hiilidioksidin määrä ilmakehässä on noussut 280 ppm:stä 393 ppm:ään (parts per million), teollisesta vallankumouksesta nykypäivään. Fossiiliset polttoaineet ovat suurin syy ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvuun. On ennustettu, että jos fossiilisten polttoaineiden käyttö jatkuu entisellään, ilmakehän hiilidioksidipitoisuus tulee nousemaan 1500 ppm:ään seuraavien vuosisatojen aikana. [1]

Hiilidioksidia voidaan käyttää erilaisten polttoaineiden valmistukseen. Koska polttoaineet ovat hiilivetyjä, tarvitaan myös vetyä. Vetyä saadaan elektrolyysillä vedestä. Jos veden elektrolyysiin käytetty energia tuotetaan uusiutuvasta energiasta, on mahdollista tuottaa uusiutuvaa synteettistä polttoainetta. Tässä työssä keskitytään synteettisten polttoaineiden valmistukseen hiilidioksidista. Prosessissa käytettävä hiilidioksidi saadaan teollisuuden päästöistä tai suoraan ilmasta. Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö polttoaineen valmistukseen on kestävämpi ratkaisu, kuin sen varastointi tai päästäminen ilmakehään. Hiilidioksidin käyttö synteettisten polttoaineiden valmistamiseen on houkuttelevaa, sillä sitä on runsaasti saatavilla, se on edullista, eikä se ole syttyvää tai hapettavaa. Hiilidioksidi on kuitenkin melko stabiili molekyyli, minkä takia sen hajottaminen kuluttaa paljon energiaa. [2]

Tässä työssä tarkastellaan hiilidioksidin hyötykäyttöä synteettisten polttoaineiden valmistuksessa. Kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on kartoittaa uusiutuvien synteettisten polttoaineiden tuotantoprosesseja. Tavoitteena on myös tutkia hiilidioksidista ja vedystä valmistettävien polttoaineiden tuotannon ympäristövaikutuksia sekä vertailla niitä muihin uusiutuviin liikenteen polttoaineisiin, kuten vetyyn ja sähköön. Tavoitteena on selvittää synteettisten polttoaineiden potentiaalia korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Kirjallisuusselvityksen yhtenä tutkimuskysymyksenä on synteettisten polttoaineiden valmistuskustannukset. Työssä tarkastellaan myös synteettisten polttoaineiden potentiaalia ja nykytilaa Suomessa.

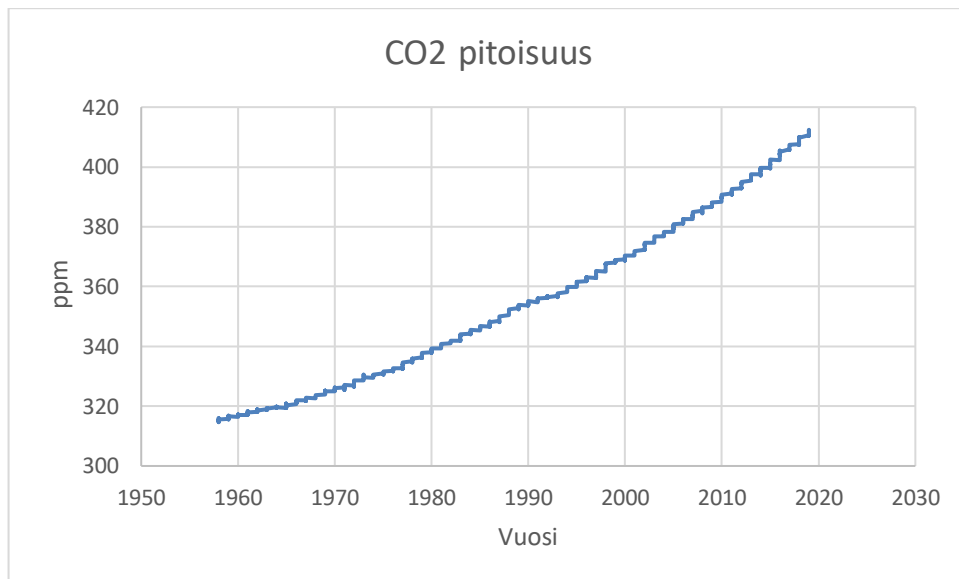
Luvussa kaksi tarkastellaan syitä synteettisten polttoaineiden valmistukselle, sekä niiden nykytilaa. Kolmannessa luvussa käsitellään hiilidioksidista valmistettävien polttoaineiden mahdollisia ympäristövaikutuksia. Neljännessä luvussa käydään läpi eri valmistusprosesseja. Käsitteilyyn on valittu erilaisia valmistusprosesseja, joista osa on pidemmälle

kehittyneitä ja osa vielä tutkimuksen tasolla. Viidennessä luvussa tarkastellaan synteettisten polttoaineiden tuotantokustannuksia. Koska synteettisten polttoaineiden tuotantoa ei juurikaan vielä ole, tarjolla on vain arvioita mahdollisista kustannuksista. Kuudennessa luvussa tarkastellaan synteettisten polttoaineiden tuotantoa Suomen näkökulmasta.

2. TAUSTA JA MOTIVAATIA VALMISTAA SYNTEETTISIÄ POLTTOAINEITA

Teollisen vallankumouksen alettua ja ihmisten populaation nopean kasvun myötä maapallolla hiilidioksidipäästöistä tuli merkittävä tekijä ilmastonmuutokseen. Tällä hetkellä koko maailman energiantuotanto perustuu suurimmalta osalta fossiilisten polttoaineiden polttamiseen, joista syntyy paljon hiilidioksidipäästöjä. Uusiutuvan energian lisääminen etenkin liikennesektorilla on haastavaa nestemäisille polttoaineille rakennetun infrastruktuurin takia. Hiilidioksidista valmistettavat synteettiset polttoaineet mahdollistavat olemassa olevan infrastruktuurin käytön ja niihin voidaan varastoida uusiutuvaa energiaa. [3]

Kuvassa 1 on esitetty hiilidioksidipitoisuuden kasvua viime vuosikymmeninä. Kuvaajasta nähdään, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kasvanut merkittävästi teollistumisen myötä.



Kuva 1: Hiilidioksidin määrä ilmakehässä, tiedot lähteestä [1]

On ennustettu, että vuosituhannen loppuun mennessä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus olisi noin 500-1000 ppm. Arvioihin vaikuttaa fossiilisten polttoaineiden käyttö tulevaisuudessa sekä taloudelliset tekijät. [4] Jos päästöjä ei saada vähennettyä, johtaa se ilmaston lämpenemiseen. Ilmaston lämpenemisen seurauksena jäätiköt sulavat ja merenpinta nousee. Lämpöaallot ja suuret maastopalot voivat myös olla seurausta ilmaston lämpenemisestä. [1]

Ilmakehään pääsevän hiilidioksidin määrää voidaan vähentää päästöjä pienentämällä, hiilidioksidin talteenotolla ja säilömisellä tai käyttämällä hiilidioksidia raaka-aineena synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien valmistuksessa. Päästöjen vähentäminen on haastavaa kasvavan väestön ja energiankulutuksen lisääntymisen takia etenkin nousevan elintason maissa. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi vaatii kuitenkin suuria investointeja. [2]

Hiilidioksidin muuntaminen synteettisiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi uusiutuvalla energialla luo keinotekoisien hiilidioksidikierron. Hiilidioksidi on hyvä materiaali polttoaineiden valmistukseen, koska se ei ole syttyvä eikä se ole korrosoiva. Sitä on myös runsaasti saatavilla esimerkiksi teollisuuden päästöistä tai suoraan ilmakehästä. Synteettisten polttoaineiden valmistamiseen tarvitaan myös vetyä. Vetyä saadaan esimerkiksi veden elektrolyysistä. [2] Jos veden elektrolyysiin tarvittava energia hankitaan uusiutuvista lähteistä, on mahdollista valmistaa uusiutuvia synteettisiä polttoaineita. Tällä tavoin on mahdollista valmistaa synteettisiä polttoaineita, joiden polttaminen ei lisää ilman hiilidioksidimäärää ja vähentää riippuvuutta fossiilista polttoaineista. Synteettisten polttoaineiden valmistaminen vaatii kuitenkin paljon energiaa. [5]

Maailmalla ei vielä juurikaan ole hiilidioksidista polttoaineita valmistavia tuotantolaitoksia. On kuitenkin olemassa joitain laitoksia, jotka tuottavat uusiutuvia synteettisiä polttoaineita. Alempana on taulukoitu tällä hetkellä toiminnassa olevia synteettisten polttoaineiden tuotantolaitoksia Euroopassa.

Taulukko 1: Synteettisten polttoaineiden tuotantolaitoksia. DAC Hiilidioksidin kaappamien suoraan ilmasta (engl. direct air capture), FT Fischer-Tropsch, tiedot lähteistä [5] ja [6]

Laitoksen nimi/toimija	Maa	Käynnistysvuosi	Tuotettu polttoaine	Sähkön kulutus	Hiilidioksidin lähde
BioCat	Tanska	2016	metaani	1 MW	Jätevesikäsittely
CRI	Islanti	2012	Metanoli	6 MW	geotermisen voimalan päästöt
MefCO2	Saksa	2018	metanoli	1 MW	Voimalaitoksen päästöt
Soletair	Suomi	2017	metaani/FT-polttoaineet	1.14 MW	DAC

Islantiin vuonna 2012 valmistunut George Olah-voimalaitos oli maailman ensimmäinen teollisen mittakaavan voimalaitos, joka valmistaa polttoaineita hiilidioksidista. Laitosta on skaalattu sen valmistumisen jälkeen ja nykyään se tuottaa 4000 tonnia metanolia vuodessa. Hiilidioksidia kerätään talteen geotermisen voimalaitoksen päästöistä noin 5,5 tonnia vuodessa. [6]

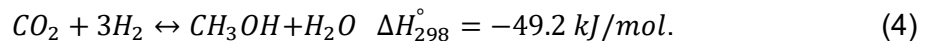
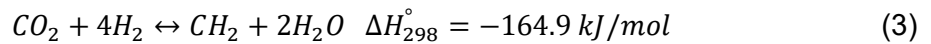
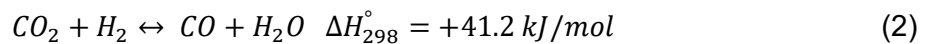
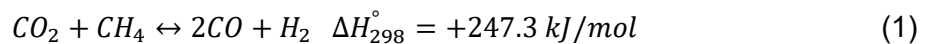
MEFCO₂ voimalaitos valmistui Saksaan vuonna 2019. Päivässä laitos tuottaa tonnin metanolia ja kerää 1,4 tonnia hiilidioksidia. Hiilidioksidi kerätään talteen hiilivoimalaitoksen päästöistä. [7]

Tanskaan vuonna 2016 BioCat laitos tuottaa biologisen prosessin avulla metaania. Laitos sijaitsee biokaasulaitoksen yhteydessä, josta hiilidioksidi kerätään talteen. Vety tuotetaan alkalielektrolyysilaitteella, joka kuluttaa 1 MW:n sähkötehoa. Sähkö otetaan verkosta, kun sen hinta on matalalla. [8]

Soletairin pilottilaitos valmistui Lappeenrantaan vuonna 2017. Vedyn tuottoon käytetään protoninvaihtokennoa eli PEM-kennoa (engl. Proton Exchange Membrane), jota ajetaan aurinkopaneeleista saadulla energialla. Hiilidioksidi kerätään suoraan ilmasta talteen. Laitos kuluttaa 352 kuutiota hiilidioksidia tunnissa, 565 kg vettä tunnissa sekä 3167 kWh sähköenergiaa. Tuotteena saadaan 100 kg/h FT-tuotteita (Fischer-Tropsch). [9]

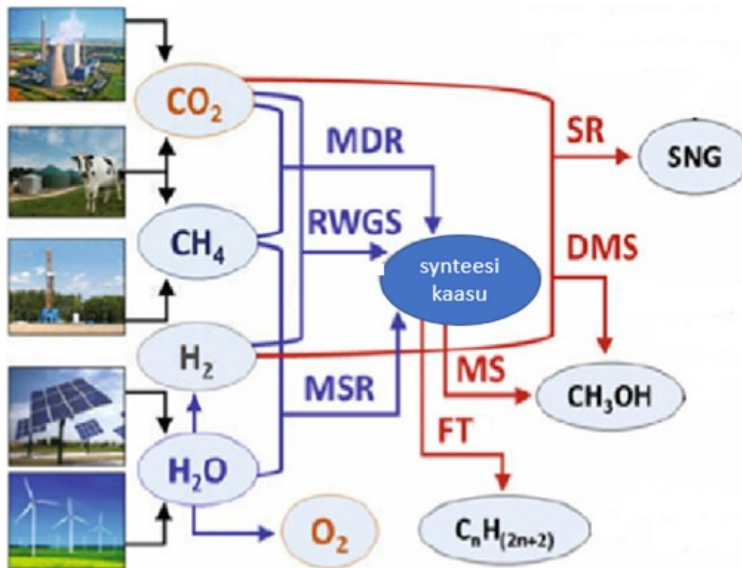
3. VALMISTUSPROSESSEJA

Hiilidioksidista ja vedystä voidaan valmistaa polttoaineita eri menetelmillä. Tässä luvussa käydään taulukon yksi laitosten menetelmiä, joilla voidaan tuottaa synteettisiä polttoaineita. Reaktioita, joilla synteettisiä polttoaineita valmistetaan ovat esimerkiksi metaanin kuivareformointi (1), käänteinen veden kaasutusreaktio (2), Sabatier-reaktio (3) ja suora metanolin synteesi (4). Reaktioyhtälöt ovat seuraavat:



Näiden prosessien endo- ja eksotermisuuden takia tehokas lämmön poisto tai tuonti on hyvin tärkeää ja luo haasteita reaktorisuunnitteluun. Toinen suuri haaste on sopivien katalyyttien löytäminen. [10]

Metaanin kuivareformoinnissa ei tarvita ollenkaan vetykaasua, vaan tarvittava vety saadaan metaanista. Kuvassa 2 on havainnollistettu lämpökatalyyttisiä prosesseja.

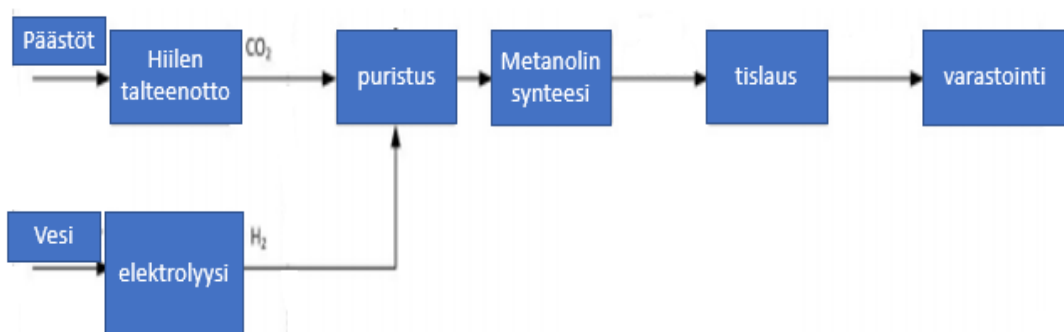


Kuva 2: Synteettisten polttoaineiden tuotantoprosesseja, MDR metaanin kuivareformointi (engl. methane steam reformin), RWGS käänteinen veden kaasutusreaktio (engl. reverse water-gas shift reaction), MSR metaanin höyryreformointi (engl. methane steam reforming), MS metanolin synteesi (engl. methanol synthesis), FT Fischer-Tropsch synteesi, DMS suora metanolin synteesi (engl. direct methanol synthesis), SR sabatier-reaktio, SNG synteettinen maakaasu (engl. synthetic natural gas), muokattu lähteestä [10]

Metaanin kuivareformointi, käänteinen veden kaasutusreaktio ja metaanin höyryreformointi ovat endotermisiä prosesseja, joista saadaan synteetikaasua. Synteetikaasu on sekoitus häkää ja vetyä. Siitä voidaan valmistaa metanolia metanolin synteetillä tai useita eri polttoaineita käyttäen Fisher-Tropsch -menetelmää. Sabatier-reaktio ja suora metanolin synteesi ovat eksotermisiä prosesseja. Sabatier-reaktiolla voidaan tuottaa synteettistä maakaasua, jota voidaan käyttää esimerkiksi lämmön ja sähkön tuotantoon tai liikenteen polttoaineena.

Metaanin kuivareformoinnin ongelmana on katalyytin deaktivoituminen ja tehokas lämmön tuonti, koska prosessi on hyvin endoterminen. Reaktioyhtälöstä (1) nähdään, että moolien määrä on tuotteiden puolella suurempi kuin lähtöaineiden. Sen takia reaktio on termodynaamisesti suotuisaa toteuttaa alhaisessa paineessa. Toisaalta paineen nosto on tarpeen teollisen mittakaavan tuotannossa. Tämä johtaa siihen, että lämpötila on pidettävä mahdollisimman korkeana, jotta hiilidioksidin konversio saadaan pidettyä mahdollisimman korkeana. Termodynaamisten analyysien perusteella tarvitaan yli 1200 kelvinin lämpötila, jotta hiilidioksidin konversioaste olisi yli 80 % edes hieman nostetuilla painetasoilla. Suuren lämpötilan myötä koksien muodostumisesta tulee iso ongelma. [10]

Tällä hetkellä metanolia valmistetaan pääsääntöisesti synteetikaasusta, jota saadaan metaanin höyryreformoinnilla maakaasusta. Toinen vaihtoehto on syöttää hiilidioksidia metanolin synteetireaktoriin, jossa hiilidioksidi reagoi vetymolekyylien ylimäärän kanssa muodostaen metanolia reaktioyhtälön (4) mukaisesti. [10] Islannissa sijaitsevassa George Olah -voimalaitoksessa valmistetaan synteettistä metaania tällä tavalla. Kuva 3 on esitetty laitoksen kulkukaavio.

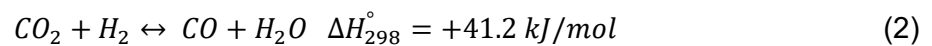


Kuva 3: George Olah -voimalaitoksen kulkukaavio [11]

Hiilidioksidi kerätään talteen ja puhdistetaan geotermisen voimalaitoksen päästöistä. Vety tuotetaan elektrolyysillä alkalikennolla. Elektrolyysiin käytetään uusiutuvaa energiaa. Vety ja hiilidioksidi puristetaan reaktorin toimintapaineeseen ja syötetään reaktoriin, jossa tapahtuu reaktioyhtälöiden (2) ja (4) mukaiset yhtälöt. Tehokas lämmönpoisto on tärkeää reaktioiden eksotermisyyden takia. Tuotteena saadaan raakametanolia, jossa on liuenneena sivutuotteita kuten etanolia ja kaasuja. Epäpuhtaudet poistetaan raakametanolista tislamalla. [11]

Teollisuuden sivuvirtana syntyvän hiilidioksidin ja uusiutuvalla energialla tuotetun vedyn avulla valmistetun metanolin tuotanto on kestävä vaihtoehto maakaasuun perustuvalla synteetisikaasulle. Metanolin hydrauksessa hiilidioksidin avulla on samoja piirteitä kuin perinteisessä metanolin synteesissä. [10] Suora metanolin hydraus on vähemmän eksotermisen, joten lämpöä pitää poistaa vähemmän. Tämä mahdollistaa putkimaisesti jäähdytetyn reaktorin käytön kiehutusvesireaktorin sijaan. Kiehutusvesireaktorit ovat monimutkaisempia ja kalliimpia verrattuna putkimaisesti jäähdytettyihin reaktoreihin. [11] Yhtenä ongelmana on kuitenkin se, että perinteisen valmistustavan katalyytit toimivat paljon huonommin suorassa hydrauksessa. [10] Islannissa sijaitsevassa voimalaitoksessa on kuitenkin hiilidioksidille optimoidut katalyytit. [11]

Käänteinen veden kaasutusreaktio



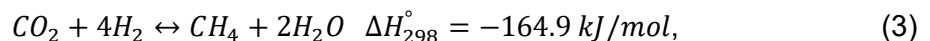
on reversiibeli ja endotermisen, joten suurimmat hiilidioksidin konversiot saadaan korkeissa lämpötiloissa. Lämpötilan nostaminen saattaa kuitenkin johtaa siihen, että metaania alkaa muodostua häkäkaasun sijaan. Veden käänteisellä kaasutusreaktiolla on suuri potentiaali ison mittakaavan tuotantoon. Verrattuna metaanin kuivareformointiin RWGS eli käänteinen veden kaasutusreaktio (engl. Reverse water-gas shift reaction) tarvitsee matalamman lämpötilan, koska se on vähemmän endotermisen. Suurimpana haasteena on löytää katalyytti, joka on hyvin selektiivinen häkäkaasun tuotantoon ja kestää korkeita lämpötiloja. [10]

Sabatier-reaktiolla, jota kutsutaan myös metanoinniksi, voidaan tuottaa metaania joko korkeassa lämpötilassa ja paineessa nikkelikatalyytin avulla kuten aikaisemmin mainitun Soletairin tapauksessa tai biologisesti alemmassa lämpötilassa ja paineessa. Suomalainen Q Power tuottaa metaania biologisesti kiintopetireaktorissa. [12]

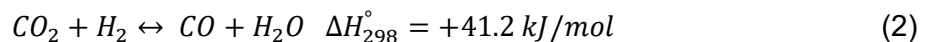
Tanskassa sijaitseva BioCat-laitos valmistaa metaania biologisen metanoinnin avulla bioreaktorissa. Bioreaktorin sisällä metanogeeniset arkeonit, jotka ovat yksisoluisia tu-

mattomia eliöitä, tuottavat metaania hiilidioksidista ja vedystä. Vety on tuotettu alkalikennoilla. Kennoon syötetään vettä, joka hajotetaan sähköenergialla vedyksi ja hapeksi. Tämän jälkeen vety ja hiilidioksidi syötetään metanointireaktoriin. Prosessissa käytetylle arkeonikannalle on selektiivisesti kehitetty tiettyjä ominaisuuksia, jotta ne sopivat mahdollisimman hyvin teolliseen metaanin tuotantoon. Näitä ominaisuuksia ovat matalaenerginen metaanin tuotto, suuri hiilen konversion hyötysuhde, suuri toleranssi saastumiselle, sopivat operointilämpötilat, selektiivisyys metaanin tuottoon ja nopea vasteaika, jota mahdollistavat bioreaktorin nopean käynnistämisen ja sammuttamisen. [8]

Soletair Power valmistaa hiilivetyt polttoaineita uusiutuvalla energialla tuotetusta vedystä ja ilmasta kerätystä hiilidioksidista. Vedyn tuotantoon käytetään PEM-kennoa. Hiilidioksidin keräämiseen ilmasta käytetään amiinia, johon hiilidioksidi kemiallisesti adsorptoutuu. Ilman happi ja typpi kulkevat keräysyksikön läpi reagoimatta. Tämän jälkeen keräysyksiköstä poistetaan ilma ja yksikköä lämmitetään, jotta amiiniin sitoutunut hiilidioksidi vapautuu kaasuksi. Tämän jälkeen hiilidioksidi ja vety syötetään synteesiyksikköön. Yksikössä tuotetaan synteettistä maakaasua Sabatier-reaktiolla

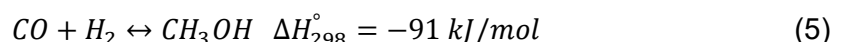


sekä nestemäisiä ja vahamaisia komponentteja Fischer-Tropsch -menetelmällä. Sabatier-reaktion toimintalämpötila on noin 300 °C ja paine hieman yli ilmanpaineen. Prosessissa käytetään nikkelikatalyyttiä. Fischer-Tropsch -menetelmässä hiilidioksidi ensin muutetaan häkäkaasuksi käänteisellä veden kaasutusreaktiolla:

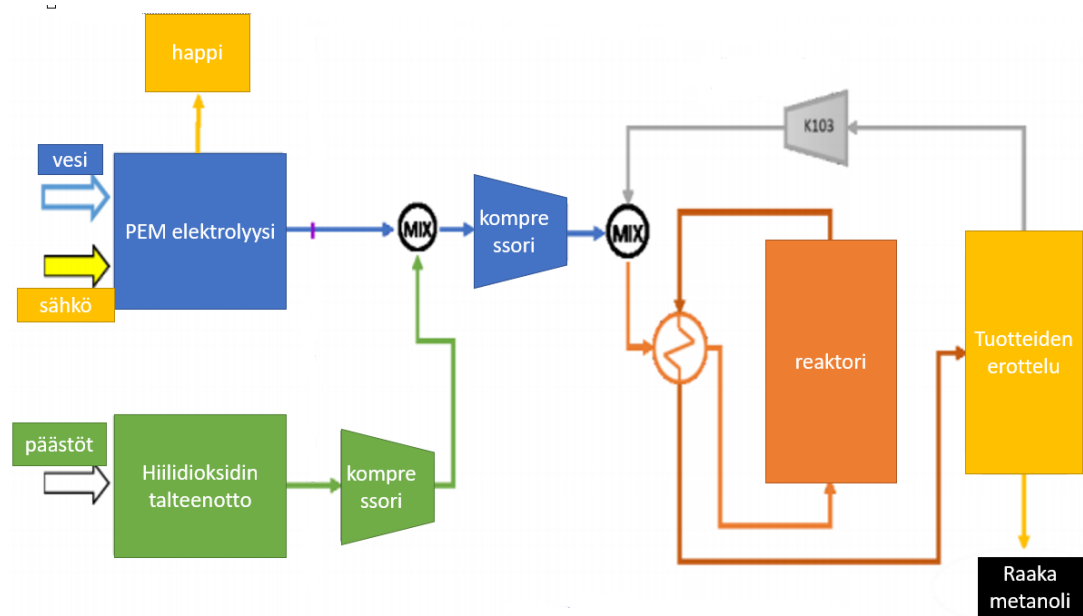


Kaasutus suoritetaan 800 °C lämpötilassa ja katalyyttinä käytetään jalometallia [9]. Tämän jälkeen saatu synteetikaasu ajetaan Fischer-Tropsch -reaktoriin, jonka toimintapaine on 20 bar ja katalyyttinä käytetään kobolttia [13]. Reaktorista saadaan tuotteena useita eri hiilivetyjä kevyistä kaasuista raskaampiin vahoihin. Saadut tuotteet erotellaan vielä lopuksi toisistaan. [9]

Saksassa sijaitsevassa MEFCO2-laitoksessa tuotetaan metanolia katalyyttisesti nostetuilla paine- ja lämpötiloilla. Metanolin synteesi-reaktorissa tapahtuu kolme reaktiota, jotka ovat suora metanolin synteesi-reaktio, häkäkaasun hydrausreaktio



ja käänteinen veden kaasutusreaktio. Kuvassa 4 on kuva MEFCO2-laitoksen prosessikaaviosta. [7]



Kuva 4: MEFCO2 synteettisen metanolin tuotantolaitoksen prosessikaavio [7]

Prosessissa käytetty vety tuotetaan elektrolyysillä PEM-kennossa, jonka toimintapaine on 30 bar. Hiilidioksidi kerätään talteen hiilivoimalan päästöistä amiinien avulla. Hiilidioksidi paineistetaan 30 baariin, jonka jälkeen se sekoitetaan vetykaasun kanssa. Hiilidioksidi ja vety esilämmitetään ja syötetään metanolireaktoriin. Reaktorissa käytetään kuparikatalyyttiä. Reaktioiden eksotermisyyden vuoksi paras metanolin saanto saadaan korkeassa paineessa ja matalassa lämpötilassa. Reaktorin jälkeen metanolista erotetaan vielä reagoimattomat kaasut. [7]

4. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA

Synteettisten polttoaineiden polttamista voidaan pitää hiilineutraalina, vaikka siinä syntyykin päästöjä. Tämä kuitenkin edellyttää, että hiilidioksidi on kerätty talteen joko teollisuuden päästöistä tai suoraan ilmasta. Polttoaineiden valmistuksessa syntyy kuitenkin päästöjä. Synteettisten polttoaineiden valmistuksen ympäristövaikutukset riippuvat suuresti niiden valmistustavasta ja valmistukseen käytetyn energian laadusta. [5] Synteettisten polttoaineiden valmistukseen kuluu paljon sähköenergiaa. Pienten hiilidioksidipäästöjen takaamiseksi käytetty sähköenergia tulisi olla uusiutuvasta lähteestä. [14] Jos tuotantoon käytetään fossiililla polttoaineilla tuotettua energiaa, ei synteettisillä polttoaineilla ole ilmastohyötyjä. Ilmastohyötyjä ei myöskään saavuteta, jos tuotantoon käytetään jo olemassa olevaa uusiutuvan energian kapasiteettia, koska silloin muualla on vähemmän uusiutuvaa energiaa käytettävissä. [5]

Lähteessä [5] väitetään, että hiilidioksidipäästöt ilmakehään eivät ole riippuvaisia siitä, mistä lähteestä hiilidioksidi on kerätty talteen synteettisiä polttoaineita valmistettaessa. Tätä perustellaan sillä, että hiilidioksidin kerääminen ilmakehästä kuluttaa enemmän energiaa, kuin kerääminen päästölähteestä eikä sen käytöllä ole selvää ympäristöllistä hyötyä verrattuna fossiiliseen hiileen. [5] Tämä on ristiriidassa muiden tutkimusten kanssa, joissa todetaan ilmasta kerätyn hiilidioksidin olevan paras vaihtoehto hiilidioksidipäästöjen kannalta. Parempi vaihtoehto olisi kerätä hiilidioksidi talteen esimerkiksi biovoimalaitoksen päästöistä. [14]

Suurin osa energiasta, joka kuluu synteettisten polttoaineiden valmistukseen hiilidioksidista, kuluu elektrolyysivaiheessa. Jos elektrolyysin energia tuotetaan uusiutuvista lähteistä, on mahdollista tuottaa polttoaineita lähes hiilineutraalisti. Tutkimuksen mukaan synteettisen dieselin valmistuksen hiili-intensiteetti on 1,9 gCO_{2e}/MJ, jos kaikki valmistukseen käytetty energia on peräisin uusiutuvasta lähteestä. Jos taas valmistukseen käytetty energia olisi peräisin fossiilisen hiilen poltosta, olisi hiili-intensiteetti jopa 600 gCO_{2e}/MJ. Perinteisellä fossiilisella dieselillä arvo on 94 gCO_{2e}/MJ. [5] Laskelmissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon uusiutuvan energian tuotantolaitosten rakentamisesta johtuvia päästöjä, jotka arvioiden mukaan olisivat tuulivoimalalle 10 gCO_{2e}/MJ ja aurinkovoimalalle 27 gCO_{2e}/MJ. Jotta siis synteettisten polttoaineiden tuottaminen olisi vähemmän päästöjä synnyttävää kuin fossiilisten polttoaineiden, tulisi käytetyn energian olla uusiutuvaa. [15]

Synteettisten polttoaineiden tuottaminen sähköverkosta otetun sähkön avulla ei välttämättä ole kestävä, jos tuotettu sähkö on peräisin fossiilisista lähteistä. [5] Suomessa tuotetun sähkön keskimääräinen hiili-intensiteetti on 158 gCO₂/kWh. [16] Sähköverkosta otetulla sähköllä ei voida valmistaa täysin uusiutuvia polttoaineita. Tuotantolaitoksen yhteydessä tulisi olla esimerkiksi tuulivoimala, josta saadaan sähköenergia synteettisten polttoaineiden tuottamiselle. Energian jatkuva saanti kuitenkin luo haasteen tuulienergian käytölle.

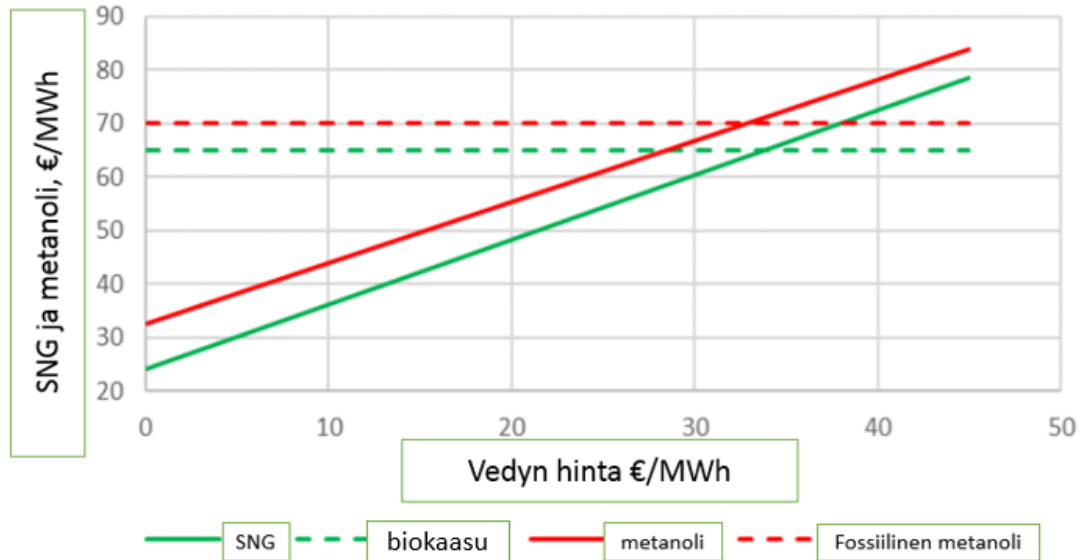
5. TALOUDELLINEN NÄKÖKULMA

Synteettisten polttoaineiden kanssa kilpailevia uusiutuvia liikenne-energian muotoja ovat vety- ja sähköautot. Synteettisten polttoaineiden tai vedyn tuotanto ei ole yhtä energiatehokasta kuin sähkön käyttäminen suoraan energian lähteenä. Baker J toteaa, että akkukäyttöisten ajoneuvojen energiankäytön hyötysuhde on 73% kun taas vetyä käyttävillä ajoneuvoilla se on 22%. Synteettisillä polttoaineilla hyötysuhde on 13%. [14] Vedyllä on hyvin korkea energiatiheys massaansa suhteutettuna: 33.3 kWh/kg. Vetyä voidaan tuottaa esimerkiksi maakaasun tuotannosta tai veden elektrolyysillä käyttäen sähköenergiaa. Maakaasun reformoinnista saadun vedyn hinta on noin 1-2 €/kg kun taas uusiutuvan vedyn hinta on noin 4-7 €/kg. Uskotaan kuitenkin, että elektrolyysillä tuotetun vedyn hinta voisi lähitulevaisuudessa olla 3 €/kg [17]. Vetyä voidaan käyttää liikenteen polttoaineena polttokennoissa. Polttokennojen etuna on, että vetyä saadaan muutettua sähköenergiaksi hyvällä hyötysuhteella, vaikka uusiutuvan vedyn tuotantoon kuluukin paljon energiaa. Polttokennojen huonona puolena on niiden lyhyt elinikä. Vedyn turvallinen varastointi on myös ongelmana polttokennoajoneuvoissa. [5]

Sähkömoottoria voidaan käyttää joko ainoana energianlähteenä ajoneuvossa tai sitä voidaan käyttää polttomoottorin apuna. Sähköautojen huonona puolena voidaan pitää pitkiä latausaikoja. Akkujen korkea hinta on myös ongelmana. Sähköautot eivät itsessään tuota päästöjä, mutta käytetty sähköenergia tulisi olla peräisin uusiutuvista energian lähteistä, jotta sähköautot olisivat ympäristön kannalta kestäviä. [5] Sähkö- ja vetyajoneuvojen etuna on, että ne eivät aiheuta päästöjä käytössä, mikä voi auttaa parantamaan ilmanlaatua kaupungeissa.

Synteettisten polttoaineiden hintaan vaikuttaa useita eri tekijöitä. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi vedyn tuottamiseen liittyvät kulut, hiilidioksidin talteenottoon liittyvät kulut sekä synteettisten polttoaineiden tuotantolaitoksen pääoma- ja käyttökustannukset. Eniten käytetyt elektrolyysikennot ovat PEM, kiinteäoksidikennon SOEC (engl. Solid Oxide Electrolyser Cell) sekä alkalikennon. Alkalikennon hyötysuhde on noin 43-69% ja sen etu muihin kennotyyppeihin on edulliset investointikustannukset ja mahdollisuus suuriin ja pitkäikäisiin laitoiksiin. Korkeat ylläpitokustannukset ovat alkalikennojen huono puoli. PEM kennon hyötysuhde on 40-69%. SOEC-kennot ovat vasta laboratoriomittakaavassa. Niiden etuna on hyvä vedyn tuoton hyötysuhde, joka on noin 80 %. SOEC-kennoon olisi mahdollista myös syöttää suoraan hiilidioksidia ja vetyä ja saada häkäkaasun ja vedyn seosta eli synteesikaasua, jota voidaan käyttää Fischer-Tropsch prosessissa. [18]

Synteettisten polttoaineiden hinnasta merkittävä osa tulee vedyn tuotantoon kuluva energiasta. Kuvassa 5 on esitetty vedyn hinnan vaikutus synteettisen maakaasun ja metanolin tuotannon kustannuksiin,



Kuva 5: Synteettisen maakaasun ja metanolin tuotantokustannukset vedyn hinnan funktiona. Metanoli on tuotettu suoran metanolin synteesin kautta ja synteettinen maakaasu biologisen metanoinnin kautta, SNG synteettinen maakaasu (engl. synthetic natural gas), muokattu lähteestä [19]

Kuvasta nähdään, että vedyn hinnan ollessa alle 35 €/MWh synteettisen metaanin tuotanto on halvempaa kuin biokaasun tuotanto. Kun taas vedyn hinta on alle noin 33 €/MWh, on synteettisen metanolin tuottaminen halvempaa, kuin fossiilisen metanolin. [19] Jos oletetaan, että vetyä pystytään tuottamaan 3 €/kg ja vedyn ylempi lämpöarvo on 141,88 MJ/ kg, jolloin saadaan vedyn hinnaksi noin 76 €/MWh. Tämä tarkoittaa, että vedyn hinnan tulisi melkein puolittua, jotta synteettisen metaanin tai maakaasun tuottaminen olisi taloudellisesti järkevää. [20] Koska vedyn tuottaminen muodostaa ison osan synteettisten polttoaineiden tuotantokustannuksista on järkevää myös harkita teollisuuden sivuvirtoina syntyvän vedyn ostamista. Erityisesti Suomessa selluteollisuudessa syntyy sivutuotteena vetyä noin 23000 tonnia vuodessa, joka vastaa noin 770 GWh kapasiteettia. Jos vety ostetaan muualta sen sijaan että se tuotetaan elektrolyysillä paikan päällä, täytyy kuitenkin ottaa huomioon vedyn siirtämisestä aiheutuvat kulut. [19]

Hiilidioksidin talteenoton kustannuksiin vaikuttaa sen konsentraation talteenottolähteestä sekä talteenottoteknologia. Bioetanolilaitoksen päästöistä kerätty hiilidioksidi saadaan talteen melko pienillä kustannuksilla, sillä bioetanolilaitoksen päästöt koostuvat melkein täysin hiilidioksidista, eikä savukaasuja tarvitse juurikaan puhdistaa. Taulukkoon 2 on koottu arvioita hiilidioksidin talteenoton kustannuksista.

Taulukko 2: Hiilidioksidin talteenoton kustannuksia päästölähteittäin tiedot lähteistä [18] [21], [12]

Päästölähde	€/tonni
sementin tuotanto	70-135
rauta ja teräs teollisuus	40-65
maaöljyn tuotanto	50-65
biovoimalaitos	20
hiilivoimalaitos	40
maakaasun tuotanto	50
ilma	75-155

Hiilidioksidin talteenotolle hyviä vaihtoehtoja ovat biovoimalaitokset, terästehtaat ja paperitehtaat. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen myös suoraan ilmasta, mutta se kuluttaa energiaa 2-4 kertaa enemmän kuin talteenotto savukaasuista. Parempia menetelmiä hiilidioksidin talteenotolle ilmasta ollaan kuitenkin kehittämässä ja tarvittavan energiamäärän uskotaan tulevaisuudessa pienenevän. Taulukosta nähdään, että bioetanolin tuotannon yhteydestä kerättävä hiilidioksidi on edullisinta. Hiilidioksidin talteenoton kustannusten uskotaan kuitenkin putoavan tulevaisuudessa parempien menetelmien kehittymisen myötä. [12]

Uusiutuvat synteettiset polttoaineet ovat vielä melko uusi asia, jonka takia osa tuotannon vaiheista ei ole vielä kovin kehittynyttä. Tämän takia kustannusten arviointi on vaikeaa. Eri arviot vaihtelevat paljon. Vaihtelu johtuu esimerkiksi elektrolyysilaitteiston ja synteesireaktorin pääomakustannusten ennustamisen vaikeudesta. [18]

6. TULEVAISUUDEN POTENTIAALI SUOMESSA

Synteettisten polttoaineiden tuottaminen vaatii suuria määriä uusiutuvaa energiaa. Käytännössä tämä tarkoittaa tuulienergiaa, sillä aurinkoenergian käyttö rajoittuisi suurelta osin kesään. Vesivoiman käyttö olisi mahdollista, mutta Suomessa ei ole juurikaan enää mahdollista rakentaa lisää vesivoimaa. [22] Suomessa on paljon potentiaalia lisätä tuulivoimaa. Tällä hetkellä hankkeita on 212 kappaletta, joka vastaa noin 18000 MW kapasiteettia. Tämä kattaisi tämän hetken sähkön kulutuksesta 71%. Vaikka tuulivoimahankkeita onkin suunnitteilla ennätysmäärä, eivät kaikki hankkeet kuitenkaan toteudu esimerkiksi suunnittelussa ilmenevien ongelmien takia. [23]

Tarvittavan uusiutuvan energian määrää voidaan merkittävästi laskea, jos synteetissä käytettävä vety hankitaan teollisuuden sivuvirtojen synnyttämästä vedystä. Tämä voi olla etenkin Suomen kannalta hyvä vaihtoehto, sillä selluteollisuudessa syntyy sivutuotteena vetyä, joka vastaa noin 770 GWh kapasiteettia [19] Tuotettua synteettistä polttoainetta ei välttämättä voi kuitenkaan kutsua uusiutuvaksi, jos käytetty vety ei ole peräisin uusiutuvasta lähteestä

Suomessa synteettisiä polttoaineita tuottaa ainakin Soletair sekä Q Power. Soletairin pilotihankkeessa tuotettiin hiilineutraaleja polttoaineita uusiutuvaa energiaa käyttäen vuonna 2017. Vuonna 2019 Wärtsilä sijoitti 500 000 euroa Soletair Poweriin edistääkseen sen kansainvälistä kehittymistä ja kaupallistamista. Wärtsilän energialiiketoiminnan strategian ja liiketoiminnan kehityksen johtajan Matti Rautkivi kertoo, että tavoitteena on kaupallinen liiketoiminta vuonna 2021. [24]

7. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin synteettisten polttoaineiden valmistusta hiilidioksidista uusiutuvaa energiaa käyttäen. Työssä käytiin läpi synteettisten polttoaineiden nykytilaa maailmalla ja tarkasteltiin syitä valmistaa synteettisiä polttoaineita. Tarkoituksena oli selvittää eri valmistusprosesseja synteettisille polttoaineille ja arvioida niiden valmistuskustannuksia sekä ympäristövaikutuksia. Lopuksi vielä tarkasteltiin synteettisten polttoaineiden potentiaalia Suomen näkökulmasta.

Synteettisiä polttoaineita tuotetaan, jotta niillä voitaisiin korvata tarvetta fossiilisille polttoaineille ja vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tällä hetkellä maailmalta löytyy joitain pienen mittakaavan tuotantolaitoksia. Suurin näistä on Islannissa sijaitseva synteettisen metanolin tuotantolaitos, joka tuottaa 4000 tonnia metanolia vuodessa.

Synteettisiä polttoaineita voidaan valmistaa eri termokemiallisia menetelmiä käyttäen. Tässä työssä perehdyttiin luvussa kaksi esiteltyjen jo olemassa olevien laitosten valmistusmenetelmiin. Näitä olivat käänteinen vesikaasun -reaktio, jossa tuotettiin synteetisikaasua, jota voitiin edelleen jalostaa FT-synteetisillä erilaisiksi hiilivedyiksi. Sabatier -reaktiolla pystytään tuottamaan hiilidioksidista ja vedystä synteettistä metaania. Reaktio voidaan toteuttaa joko katalyyttisesti tai biologisesti. Metanolia voidaan tuottaa metanolin synteetisireaktiolla synteetisikaasusta ja vedystä. Synteetisikaasua voidaan tuottaa hiilidioksidista ja vedystä käänteisellä veden kaasutusreaktiolla.

Hiilidioksidista valmistettävien synteettisten polttoaineiden ympäristövaikutukset riippuvat suurimmalta osalta vedyn tuottamiseen käytetyn energian laadusta. Suurin osa prosessiin kuluvaan energiasta kuluu vedyn tuottamisessa elektrolyysillä. Jotta synteettisillä polttoaineilla olisi ympäristöhyötyä, tulisi käytetty energia olla peräisin uusiutuvasta lähteestä. Synteettisten polttoaineiden tuotantokustannuksista suurin osa tulee myös vedyn tuotantoon kuluvaan energiasta. Hiilidioksidin lähde on myös isossa osassa tuotantokustannuksissa. Suoraan ilmasta kerättävä hiilidioksidi kalliimpaa verrattuna teollisuuden päästöistä kerättävään hiilidioksidin. Teollisuuden päästöistä kerätyn hiilidioksidin kustannuksiin vaikuttaa hiilidioksidin puhtaus. Biovoimalaitoksen päästöistä kerättyä hiilidioksidia pitää puhdistaa vähiten ja on siksi hyvä vaihtoehto hiilidioksidin keräämiselle.

Suomessa on paljon potentiaalia lisätä tuulivoimaa, jolla on mahdollista tuottaa uusiutuvia synteettisiä polttoaineita. Lisäksi Suomen selluteollisuuden tuottama vety voisi mahdollistaa vedyn hankinnan kustannuksiin liittyviä ongelmia. Tällä hetkellä Suomessa on

joitain voimalaitoksia, jotka tuottavat synteettisiä polttoaineita hiilidioksidista. Soletair Power käyttää ilmasta kerättyä hiilidioksidia prosessissaan ja Q Power tuottaa synteettistä metaania biologisen metanoinnin kautta.

8. LÄHTEET

- [1] NASA, "Global Climate Change," 2020. [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>. [Haettu 20 Helmikuu 2020].
- [2] M. Rajendran ja M. Tizazu, "Recent progress in carbon dioxide (CO₂) as feedstock for sustainable materials development: Co-polymers and polymer blends," *Polymer*, osa/vuosik. 36, nro 1, pp. 348-373, 2018.
- [3] I. Ridjan , B. V. Mathiesen, D. Conolly ja N. Duić, "The feasibility of synthetic fuels in renewable energy systems," *Energy*, nro 57, pp. 76-84, 2013.
- [4] IPCC, "Data Distribution Centre," 2020. [Online]. Available: https://www.ipcc-data.org/observ/ddc_co2.html. [Haettu 15 Helmikuu 2020].
- [5] C. Malins , "What role is there for electrofuel," Transport & Environment, Bryssel, 2017.
- [6] Carbon Recycling International, "Carbon recycling," 2012. [Online]. Available: <https://www.carbonrecycling.is/projects#project-goplant>. [Haettu 12 Tammikuu 2020].
- [7] D. Bellotti, M. Dierks, F. Moellenbruck, L. Magistri, K. Göner ja G. Oeljeklaus, "Thermodynamic and economic analysis of a plant for the CO₂ hydrogenation for methanol production," 2019.
- [8] BioCat, "BioCat Project," 2020. [Online]. Available: <https://www.biocat-project.com/about-the-project/technology-components/>. [Haettu 13 Tammikuu 2020].
- [9] Soletair, "Soletair," 2020. [Online]. Available: <https://soletair.fi/technical-specifications/>. [Haettu 3 Helmikuu 2020].
- [10] D. S. Simakov, Renewable Synthetic Fuels and Chemicals from Carbon Dioxide Fundamentals, Catalysis, Design Considerations and Technological Challenges, Ensimmäinen painos toim., Springer International Publishing, 2017.
- [11] D. S. Marlin, E. Sarron ja Ó. Sigurbjörnsson, "Process Advantages of Direct CO₂ to Methanol Synthesis," *Frontiers in Chemistry*, 27 Syyskuu 2018.
- [12] I. Hannula, "Co-production of synthetic fuels and district heat from biomass residues, carbon dioxide and electricity: Performance and cost," *Biomass and Bioenergy*, nro 74, pp. 26-46, 2015.

- [13] F. V. Vázquez, J. Koponen, V. Ruuskanen, C. Bajamundi, A. Kosonen, P. Simell, J. Ahola, C. Frilund, J. Elfving, M. Reinikainen, N. Heikkinen, J. Kauppinen ja P. Piermartini, "Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept," *Journal of CO₂ Utilization*, osa/vuosik. I, nro 28, pp. 235-246, 2018.
- [14] J. Bracker ja C. Timpe, *An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport*, Freiburg: Öko-Institut e.V., 2017.
- [15] P. Schmidt, W. Weindorf, A. Roth, V. Batteiger ja F. Riegel, "Umweltbundesamt," Syyskuu 2016. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/power-to-liquids-potentials-perspectives-for-the>. [Haettu 18 Helmikuu 2020].
- [16] Motiva, "Motiva," Motiva Oy, 21 Marraskuu 2019. [Online]. Available: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet. [Haettu 21 Maaliskuu 2020].
- [17] J. Proost, "State-of-the art CAPEX data for water electrolyzers, and their impact on renewable hydrogen price settings," *International Journal of Hydrogen Energy*, osa/vuosik. 44, nro 9, pp. 4406-4413, 2019.
- [18] S. Brynolf, M. Taljegard, M. Grahn ja J. Hansson, "Electrofuels for the transport sector: A review of production costs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nro 81, pp. 1887-1905, 2018.
- [19] J. Kärki, E. Tsupari, M. Hurskainen, H. Saastamoinen ja K. Melin, "Climate-friendly hydrocarbons from biogenic carbon dioxide and renewable electricity," Aachen, 2019.
- [20] The Pacific Northwest National Laboratory, "Hydrogen Tools," 2020. [Online]. Available: <https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels>. [Haettu 15 Helmikuu 2020].
- [21] T. Kuramochi, A. Ramírez, W. Turkenburg ja A. Faaij, "Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes," *Progress in Energy and Combustion Science*, osa/vuosik. I, nro 31, pp. 87-112, 2012.
- [22] Motiva Oy, "Motiva," 2017. [Online]. Available: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/. [Haettu 15 Helmikuu 2020].
- [23] Suomen Tuulivoimayhdistys, "Suomen Tuulivoimayhdistys," 2020. [Online]. Available: https://www.tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/5285/suomeen_suunnitteilla_ennatysmaara_tuulivoimaa. [Haettu 23 Helmikuu 2020].

- [24] T. Laatikainen , ""Ilmasta dieseliä?" Wärtsilä sijoittaa suomalaiseen startupiin - Soletair Power kerää talteen rakennusten sisällmän hiilidioksidia," *Tekniikka & Talous*, 15 Huhtikuu 2019.