

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

## Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä

### Direct Air Capture (DAC)

Työn tarkastaja: Kari Myöhänen

Työn ohjaaja: Kari Myöhänen

Lappeenranta 28.10.2019

Roope Kasvi

## **TIIVISTELMÄ**

Opiskelijan nimi: Roope Kasvi

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Kari Myöhänen

Kandidaatintyö 2019: Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä

Sivuja 31 ja kuvia 8

Hakusanat: DAC, hiilidioksidin talteenotto, ilmastonmuutos, negatiiviset päästöt

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää kirjallisuuden pohjalta hiilidioksidin kaappaamista suoraan ilmakehästä. Tarkastelun tavoitteena on tuoda esille erilaisia hiilidioksidin talteenottomenetelmiä suoraan ilmakehästä sekä niihin liittyviä kustannuksia, potentiaaleja, etuja ja haittoja.

Ilmastonmuutoksen takia tarve saavuttaa negatiivisia päästöjä on huomattu kansainvälisissä tutkimusryhmissä ja eri maiden hallinnoissa. Negatiivisia päästöjä saadaan, kun prosessissa otetaan talteen enemmän hiilidioksidia, kuin mitä sitä syntyy. Negatiiviset päästöt tulevat olemaan iso osa ilmastonmuutoksen torjuntaa tulevaisuudessa.

DAC-teknologiassa hiilidioksidi otetaan talteen kemialliseen prosessiin. Ilma johdetaan kontaktoriin, jossa se altistetaan väliaineelle, joka reagoi ilman hiilidioksidin kanssa. Reagoitunut väliaine kulkeutuu kaustisointiyksikköön, jossa se elpyy ja siirtää hiilidioksidin elvytysmoduulin väliaineeseen. Elvytysmoduulissa väliainetta lämmitetään, jolloin siitä saadaan irrotettua hiilidioksidia. Hiilidioksidi voidaan absorboida joko kiinteisiin sorbentteihin tai vesipohjaiseen liuokseen.

Hiilidioksidin kaappaaminen suoraan ilmakehästä on vielä tällä hetkellä liian kallista. Kuitenkin teknologian hinta on ollut laskussa, ja mahdollisesti siitä voi tulla kustannustehokasta tulevaisuudessa. Hiilidioksidin kaappaaminen on yhdistettynä myös hiilipohjaisten polttoaineiden raaka-aineeksi.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo

<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Ilmastonmuutos ja asetettujen tavoitteiden saavuttaminen</b>	<b>8</b>
2.1 Pariisin ilmastopöytäkirja.....	9
2.2 IPCC.....	9
2.3 NET.....	10
<b>3 Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä</b>	<b>13</b>
3.1 Liuotinpohjainen systeemi.....	14
3.2 Kiinteän sorbentin systeemi.....	16
3.3 Muut systeemit.....	20
3.4 Pilottihankkeet ja yritykset.....	21
<b>4 Kustannukset</b>	<b>25</b>
<b>5 Tulevaisuuden näkymät</b>	<b>28</b>
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>30</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>32</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

t tonni [10<sup>3</sup> kg]

### Kemialliset merkit

CaCO<sub>3</sub> kalsiumkarbonaatti

CaO kalsiumoksidi

Ca(OH)<sub>2</sub> kalsiumhydroksidi

CO<sub>2</sub> hiilidioksidi

H<sub>2</sub>O vesi

KOH kaliumhydroksidi

K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kaliumkarbonaatti

NaOH natriumhydroksidi

### Lyhenteet

APS American Physical Society

BECCS Bio-energy with Carbon Capture and Storage

CCS Carbon Capture and Storage

DAC Direct Air Capture

GISS Goddard Institute for Space Studies

HT High temperature

IEA	International Energy Agency
IEM	Ion-Exchange Membranes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LT	Low temperature
MSA	Moisture swing adsorption
NET	Negative emission technology
NSA	National Academy of Science
PPM	Parts per million
PSA	Pressure swing adsorption
TSA	Temperature swing adsorption
TCSA	Temperature concentration swing adsorption
TVSA	Temperature vacuum swing adsorption
VSA	Vacuum swing adsorption

## 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos uhkaa ekosysteemiämme. Maapallon keskilämpötila on noussut viimeisen 100 vuoden aikana erittäin nopeasti. Suurimpana yksittäisenä tekijänä on ollut kasvihuonekaasupäästöjen lisääntyminen, joista hiilidioksidilla on merkittävin osuus. Monet kansainväliset energia- ja ilmastojärjestöt, kuten Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ja International Energy Agency (IEA) ovat arvioineet, että kriittinen raja lämpötilan nousulle on kaksi astetta esiteolliseen aikaan verrattuna. Tämän jälkeen ilmastonmuutoksen haittavaikutukset moninkertaistuvat ja ilmastonmuutos alkaa vauhdittamaan itse itseään, eli sen pysäyttäminen tulee vaikeutumaan erittäin paljon.

Tulevaisuudessa pelkästään päästöjen vähentäminen ei enää riitä, vaan tarvitaan myös negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tuottavia teknologioita (NET). Yksi vaihtoehto on Direct Air Capture (DAC), jossa hiilidioksidi poistetaan suoraan ilmakehästä, eikä pistemäisistä kohteista, kuten esimerkiksi teollisuuslaitosten savukaasuista. Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda katsaus erilaisiin hiilidioksidin talteenottomenetelmiin suoraan ilmakehästä.

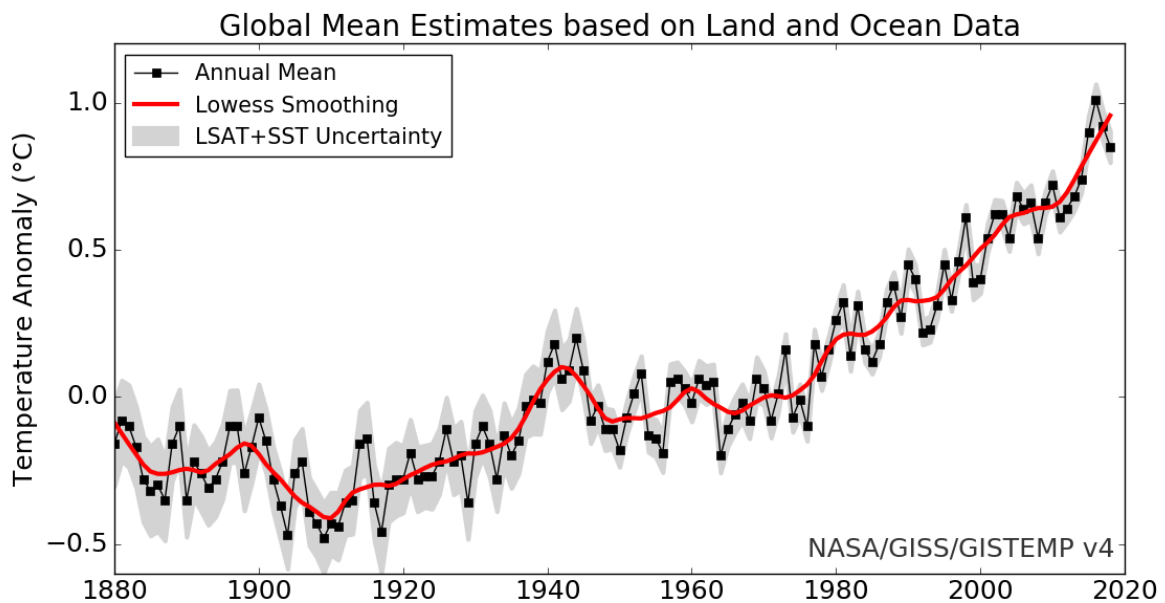
Tutkimuksessa käydään myös läpi kansainvälisiä ilmastotavoitteita, kuten Pariisin ilmastosopimus, ja millä keinoin nämä tavoitteet voitaisiin saavuttaa ja millaista teknologiaa se vaatisi. Yhtenä keskeisimmistä ratkaisuista hiilidioksidipäästöjen hallintaan nostetaan negatiivisen päästöjen teknologiat. Negatiivisilla päästöillä tarkoitetaan sitä, että hiilidioksidia saadaan sitoutettua pois ilmakehästä enemmän kuin sitä päästetään ilmakehään.

Tutkimuksessa perehdytään yleisesti DAC-teknologian toimintaperiaatteeseen, tuodaan esille erilaisia teknologioita, joilla hiilidioksidia saadaan kaapatuksi ilmakehästä ja arvioidaan yleisellä tasolla kustannuksia ja teknologian erilaisia haasteita. Tämän lisäksi tutustutaan pilottihankkeisiin, joita on muutamia maailmalla. Tutkimuksessa ei oteta kantaa hiilidioksidin kuljettamiseen ja varastointiin liittyviin ongelmiin ja niistä

aiheutuviin kustannuksiin. Nämä ovat kaikille hiilidioksidin talteenottomenetelmille yhtenäisiä ongelmia. Etenkin hiilidioksidin suuri määrä aiheuttaa varastointiongelmia ja erilaisia vastuukysymyksiä siitä, että saako hiilidioksidia varastoida maaperään ja voiko tästä aiheutua ongelmia seuraaville sukupolville. (Murdock *et al.* 2016.)

## 2 ILMASTONMUUTOS JA ASETETTujen TAVOITTEIDEN SAAVUTTAMINEN

Yksi ihmiskunnan tämän hetken suurimmista haasteista on ilmastonmuutos. Ilmastonmuutoksesta puhuttaessa tarkoitetaan ennen kaikkea maapallon keskilämpötilan nousua, joka vaikuttaa koko maapallon ekosysteemiin. Ilmaston lämpötila vaihtelee itsekseen luonnollisesti, mutta viimeisen sadan vuoden aikana lämpötila on noussut nopeasti verrattuna maapallon historiaan. Alla olevassa kuvassa 1 on esitelty maanpinnan lämpötiläkäyrä 1880-luvulta alkaen (GISS 2019).



Kuva 1: Maanpinnan lämpötiläkäyrästä 1880-luvulta 2019-luvulle. Mustalla viivalla kuvataan vuotuista keskiarvoa ja sitä verrataan lämpötiläkäyrästä nollakohtaan, joka on vuosien 1950-1980 keskiarvo. (GISS 2019.)

Ilmastonmuutos on melko todennäköisesti ihmiskunnan aiheuttama. Teollistumisen ja kasvaneen väestömäärän johdosta hiilidioksidipäästöt ovat nousseet maailmalla 280 ppm:stä 407 ppm:ään (2017) (Lindsey and Dlugokencky 2017). Tämä korreloi suoraan myös lämpötilan nousuun. Goddard Institute for Space Studies (GISS) huomasi omasta datastaan 1980-luvulla, että lämpötilat ovat nousussa, ja jos lämpeneminen jatkuu samanlaisena 2000-luvulle asti, niin maapallon lämpötila tulee nousemaan 0,8 astetta



1950-luvulta 2000-luvulle. Kuitenkin, kuten kuvaajasta huomaamme, lämpötila nousi 2000-luvun alkuun vain 0,4 astetta. Kiihtyvän lämpötilan nousun takia, alamme kuitenkin olemaan jo reilussa 1 asteessa, joten pian lämpötilan nousuvauhti pitäisi saada lopetettua. (Murdock *et al.* 2016.)

## 2.1 Pariisin ilmastopimus

Joulukuussa 2015 järjestetyssä Pariisin ilmastokokouksessa sovittiin uudesta, päästöjä rajoittavasta ilmastopimuksesta, jonka tavoitteena on pysäyttää ilmastonmuutos. Kokoukseen osallistui 197 osapuolta, joista jokainen on allekirjoittanut sopimuksen. Yhdysvaltojen hallinto kuitenkin irtaantui sopimuksesta vuonna 2017 presidentti Trumpin johdolla. (UNFCCC 2015.)

Pariisin globaalissa ilmastopimuksessa tehtiin toimintasuunnitelma maapallon lämpenemisen rajoittamisesta alle kahden asteen. Maiden hallinnot valmistelevat sopimuksen pohjalta päästötavoitteensa ja sitoutuvat noudattamaan näitä maakohtaisia tavoitteitaan. Pariisin ilmastopimus on suurin koskaan ilmaston puolesta tehty sopimus, mutta se on silti saanut myös kritiikkiä sen vapaaehtoisuutensa takia. Keinoina tavoitteiden saavuttamiseksi ovat tarvittavien resurssien käyttöönotto, kehittyvien maiden ilmatorahoitus, korvaukset ilmastonmuutoksen aiheuttamista menetyksistä ja uudenlainen viitekehys teknologioille. (UNFCCC 2015.)

## 2.2 IPCC

IPCC eli hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change) perustettiin vuonna 1988 tarjoamaan kansainvälistä, riippumatonta tieteellistä tietoa ilmastonmuutoksesta ja ihmisten vaikutuksesta siihen. IPCC on organisaatio hallituksille, jotka kuuluvat Yhdistyneisiin kansakuntiin. Se ei itse tee tutkimuksia, vaan se kokoaa kansainvälistä tutkimustietoa ilmastonmuutoksesta, sen vaikutuksista ja riskeistä ja siitä, kuinka voimme sopeutua ja lieventää niitä. Yksi IPCC:n pääideoista on tarjota tietoa valtioiden päätöselimille. Raportit on tehty riippumattomasti eri valtioista tai organisaatioista tarjoten näin varmaa tietoa, joka on kerätty tuhansista eri

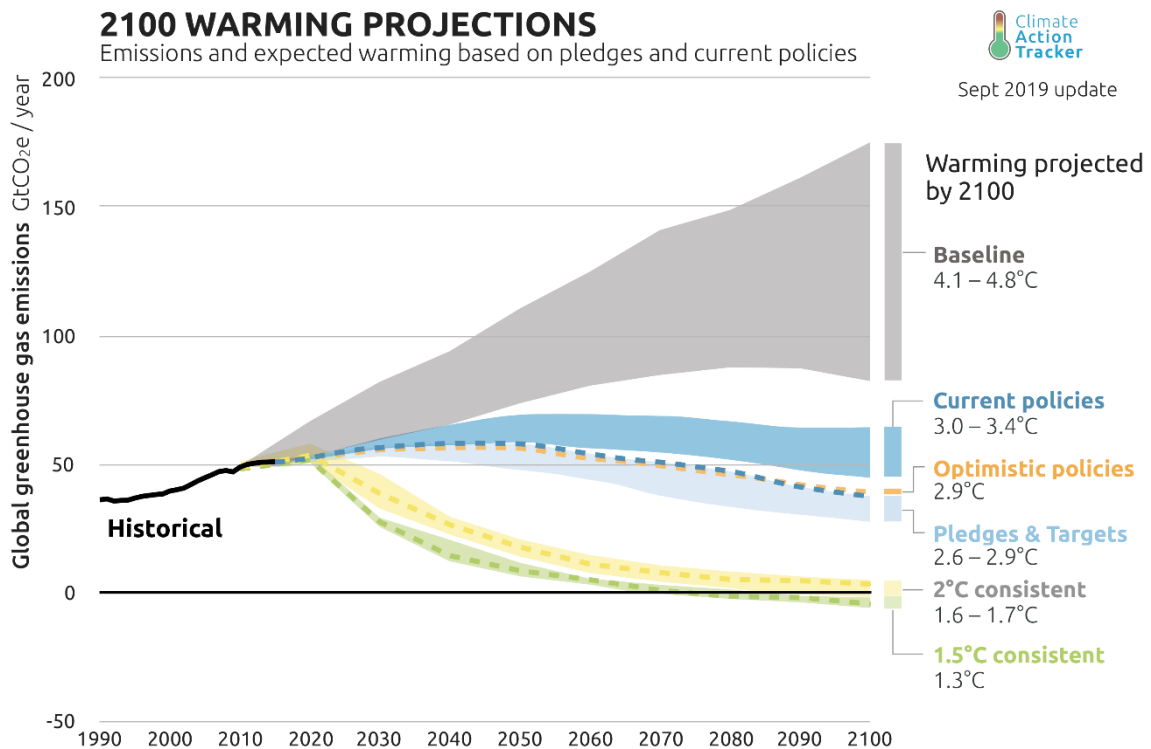
utkimuksista ja koottu helppolukuiseksi, verrattain lyhyeksi, tietopaketti. Myös Suomesta on työryhmä IPCC:n toiminnassa mukana. (IPCC 2019; Ilmatieteen laitos 2019.)

IPCC:n ensimmäinen raportti julkaistiin 1990 (First Assessment Report), ja viimeinen, viides versio 2014. Raportissa todetaan, että ilmasto lämpenee ennätysvauhtia ja on olemassa suuri riski siihen, että lämpeneminen jatkuu läpi vuosisadan. Tällöin se aiheuttaa vakavia ja peruuttamattomia tuhoja ympäristölle ja ihmiskunnalle (IPCC 2014). IPCC julkaisee myös erikoisraportteja, joista 2018 julkaistu Global Warming of 1,5 °C -erikoisraportti käsittelee ilmastomuutoksen vastatoimien vahvistamista, jos lämpötilan nousu halutaan rajoittaa 1,5 asteeseen. Raportti vastaa pyyntöön, joka IPCC:lle esitettiin Pariisin ilmastokokouksessa ja sen pääkohtina on käydä läpi vaikutuksia, joita syntyy, jos maapallo lämpenee 1,5 astetta ja näitä verrataan kahden asteen nousuun. Raportissa käydään läpi myös erilaisia keinoja, joilla lämpeneminen voidaan rajoittaa 1,5 asteeseen. Raportissa isona osana ongelmien ratkaisuun nähdään negatiiviset päästöt. (IPCC 2018.)

### **2.3 NET**

Negative Emission Technology eli negatiivisten päästöjen teknologiat ovat olleet paljon esillä puhuttaessa ilmastomuutoksesta. IPCC:n raportit ovat ottaneet kantaa näihin uusiin teknologioihin, joilla voidaan päästä negatiivisiin päästöihin, eli saadaan hiilidioksidia sidotuksi enemmän kuin sitä vapautuu. (IPCC 2014; IPCC 2018.)

Pariisin ilmastosopimuksessa määritelty 1,5 asteen tavoite vaatii kuitenkin enemmän toimia kuin sopimuksessa olevat tavoitteet ovat. Kuvassa 2 on esitelty skenaarioita ilmaston lämpenemiseen tämän hetkisten poliittisten linjausten ja sopimusten pohjalta. Tämän hetkisten poliittisten linjausten mukaisesti maapallon keskilämpötila tulee olemaan noin kolme astetta korkeampi 2100-luvulla verrattaessa esiteolliseen aikaan. Jos haluamme pitää lämpenemisen 1,5 asteessa tai jopa sen alle, niin hiilidioksidipäästöjä tulee pienentää välittömästi, ja vuosisadan lopulla meidän pitää olla lähellä nollapäästöjä. (Climate Action Tracker 2019.)



Kuva 2: Skenaarioita ilmaston lämpenemisen kehitykselle. (Climate Action Tracker 2019.)

Kuten kuvasta 2 voi todeta, meidän pitää tämän vuosisadan aikana saada päästöjä vähennettyä korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla energialähteillä, kehittämällä energian loppukäyttöä ja tehdä järjestelmistä älykkäämpiä. Negatiivisen päästön teknologioilla tulee myös tulevaisuudessa olemaan rooli, jos haluamme pysyä korkeintaan 1,5 asteen lämpötilan nousussa verrattuna esiteolliseen aikaan. Tulemme siis tarvitsemaan teknologiaa, jolla saamme hiilidioksidin talteen, vaikka käyttäisimme jo pääasiassa uusiutuvia ja päästöttömiä energialähteitä jokaisella sektorilla.

Päästäksemme negatiivisiin päästöihin, tarvitsee hiilidioksidi ottaa talteen ja sitoa tai sijoittaa johonkin, että se ei pääse vapautumaan takaisin ilmakehään. Hiilidioksidin talteenotossa on muutamia erilaisia vaihtoehtoja. Sitä voidaan ottaa talteen kohdennetuista paikoista, kuten esimerkiksi suurten voimalaitosten savukaasuista. CCS-menetelmässä hiilidioksidi otetaan talteen, puhdistetaan, puristetaan ja kuljetetaan pitkäaikaiseen säilytykseen. Teknologian kaupallistumisen esteenä ovat olleet sen kalleus, suuret talteen otettavat hiilidioksidimäärät, säilönnän epävarmuudet ja

vastuukysymykset (Teir *et al.* 2009). CCS-menetelmä ei ole päästöneegatiivinen, ellei polttoaine ole sitonut itseensä hiilidioksidia ilmakehästä. Lisäksi on hyvin vaikeaa ottaa talteen nykyisellä teknologialla hiilidioksidipäästöjä auto-, meri- ja lentoliikenteestä. Vuonna 2016 noin 30% Euroopan kasvihuonekaasupäästöistä tuli liikenteestä (EEA 2018). Liikenteen lisäksi myös maatalous ja jätehuolto aiheuttavat vaikeasti kerättävissä olevia hiilidioksidipäästöjä, koska päästöt syntyvät laajoilla alueilla.

Toinen vaihtoehto on kerätä hiilidioksidia suoraan ilmakehästä. Maapallon luontainen ekosysteemi on sitonut hiilidioksidia jo olemassaolonsa alusta, mutta ihmisten aiheuttamien päästöjen lisääntymisen vuoksi sen tasapaino ei ole kunnossa, jolloin ilman hiilidioksidipitoisuus kasvaa. Yksi vaihtoehto tähän on BECCS eli bioenergian käyttö yhdistettynä hiilidioksidin talteenottoon. Tässä menetelmässä hiilidioksidi sitoutuu biomassaan, jota käytetään polttoaineena, ja poltossa vapautuva hiilidioksidi otetaan talteen ja se varastoidaan esimerkiksi vanhoille öljykentille. Tällä teknologialla voidaan päästä negatiivisiin päästöihin, jos biomassassa sitoo hiilidioksidia ja poltossa syntyvä hiilidioksidi saadaan otettua talteen. Kuitenkin BECCS:ssä on omat riskinsä ja haittapuolensa. Suuren mittakaavan biomassakasvatukset voivat aiheuttaa riskin ekosysteemissä: Koska biomassan kasvatus vaatii paljon tilaa ja vettä, voivat nämä olla esteenä ruuan kasvatukselle ja puhtaan veden saannille tietyillä kehittyvillä ja kuivilla alueilla, joissa jo nyt on vastaavia ongelmia. Ruuan kasvatuksen tilan puute voi aiheuttaa myös ruuan hinnan nousua, ja ongelmat korostuisivat etenkin näillä kehittyvillä alueilla. (Consoli 2018; Davis *et al.* 2015.)

### 3 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO SUORAAN ILMAKEHÄSTÄ

Ensimmäisen kerran hiilidioksidin talteenotto tuli esille kryogeenisen ilman erotuksen yhteydessä 1950-luvulla. 1960-luvulla ajateltiin, että hiilidioksidia, jota saataisiin kaappaamalla ilmakehästä, käytettäisiin raaka-aineena hiilivetytöltoaineiden tuotannossa. Klaus Lackner tutki ajatusta suuren mittakaavan hiilidioksidin kaappaamisesta osana ilmastonmuutoksen hillintää 1990-luvulla ja tuli johtopäätökseen, että hiilidioksidin kaappaaminen ilmakehästä voisi olla ratkaisuna hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. (Keith *et al.* 2018; Lackner *et al.* 1999.)

DAC-teknologian kehitys lähti liikkeelle tutkimuksista absorboida hiilidioksidia vahvoihin emäsluoksiin, koska CCS-teknologiassa se oli yleisenä vaihtoehtona. Vuonna 2005 David Keithin tutkimusryhmä tutki hiilidioksidin talteenottomenetelmiä ja tuli siihen tulokseen, että hiilidioksidin talteenotto natriumhydroksidiin on lyhyessä ajassa toteutettavissa oleva vaihtoehto, vaikka erittäin korkea vaatimus lämpötilasta (noin 900°C) nostaa hintoja ja rajoittaa saatavilla olevia lämmönlähteitä (Keith *et al.* 2005).

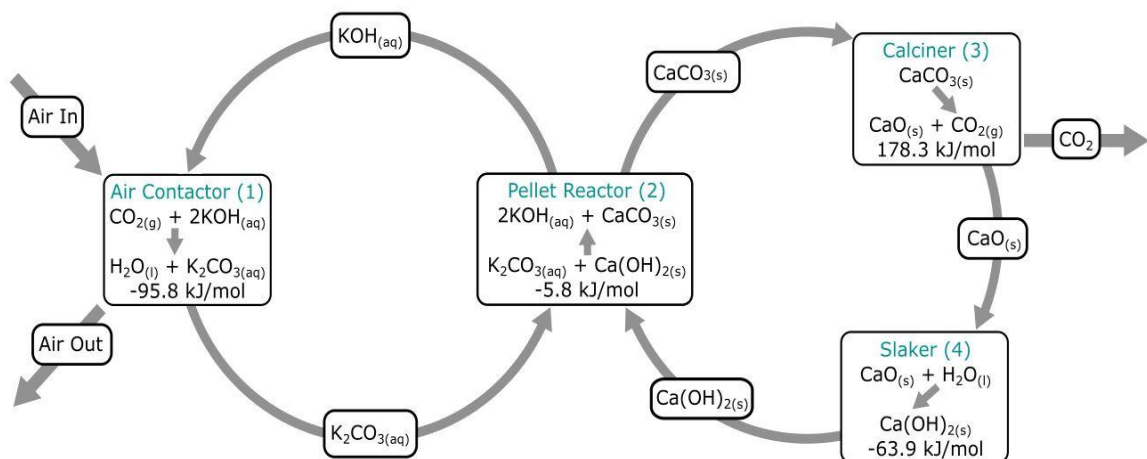
Vesipohjaisen talteenottomenetelmän rinnalle kehitettiin kiinteisiin sorbentteihin eli sitoviin aineisiin perustuva menetelmä Temperature Swing adsorption (TSA), jossa hiilidioksidi voidaan ottaa talteen paljon alhaisemmissa lämpötiloissa (80-100°C) kuin vesipohjaisessa talteenottomenetelmässä. Energiansäästö verrattaessa vesipohjaisiin systeemeihin on huomattava ja alentaa näin kustannuksia. Tämän lisäksi lämmönlähde ei aiheuta niin suuria ongelmia, ja lämpöä voidaan käyttää teollisuuslaitosten hukkalämpöjä tai energiasivuvirtoja. Moisture swing adsorption (MSA) on myös yksi teknologia, jota tutkitaan ja kehitetään muutamissa yrityksissä maailmalla. (Fasihi *et al.* 2019.)

Tavallisesti DAC-systeemit sisältävät kontaktialueen eli kontaktorin, kaustisointiyksikön ja elvytysmoduulin. Kontaktialueella ilma johdetaan kosketuksiin väliaineen kanssa joko luonnollisesti tai puhaltimien avulla. Kontaktorissa hiilidioksidi absorboituu tai

adsorboituu väliaineeseen ja hiilidioksidivapaa ilma lähtee pois. Väliaineen tulee olla prosessissa häviämätöntä, helposti käsiteltävissä olevaa ja reagoimatonta muiden ilmassa olevien kaasujen kanssa. Hiilidioksidi otetaan talteen siis kemiallisin prosessein. (Fasihi *et al.* 2019.)

### 3.1 Liuotinpohjainen systeemi

Erilaisten vahvojen emäksien potentiaalia DAC-järjestelmissä on tutkittu ja näiden joukossa on natriumhydroksidi (NaOH), kaliumhydroksidi (KOH) ja kalsiumhydroksidi ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (Broehm *et al.* 2015). Liuotinpohjaisessa systeemissä on kaksi toisiinsa kytkettyä kemiallista silmukkaa, jotka pystyvät toimimaan yhtäjaksoisesti. Kuvassa 3 on esitelty tavallinen kahden silmukan liuotinpohjainen hiilidioksidin talteenottomenetelmä. Kuvassa on nimettyä ja numeroituna neljä tärkeintä prosessia. (Keith *et al.* 2018.)

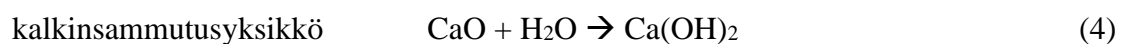
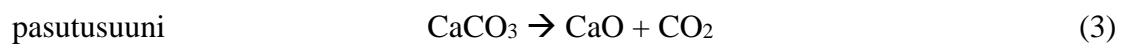
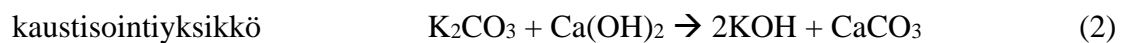


Kuva 3: Prosessin kemiallinen ja termodynaaminen kuvaus. (Keith *et al.* 2018.)

Ensimmäisessä silmukassa ilma tuodaan kontaktorille, jossa se koskettaa alkalitalteenottojärjestelmää. Carbon Engineering käyttää siis väliaineenaan kaliumhydroksidia, mutta myös natriumhydroksidi on ollut eri tutkimuksissa esillä. Ilma virtaa kontaktorille luonnollisesti tai tuulettimien avustuksella. Hiilidioksidimolekyylit

(CO<sub>2</sub>) reagoivat KOH kanssa muodostaen kaliumkarbonaattia (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) (kaava 1). Hiilidioksidivapaa ilma lähtee pois ja hiilidioksidi, joka on reagoanut ja sitoutunut kaliumhydroksidiin kuljetetaan elvytysmoduuliin. (Keith *et al.* 2018; Fasihi *et al.* 2019.)

Toisessa silmukassa K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sekoitetaan Ca(OH)<sub>2</sub> kanssa kaustisointiyksikössä (pellet reactor), jossa muodostuu kalsiumkarbonaatti (CaCO<sub>3</sub>) ja KOH on elvytetty (kaava 2). Kaliumhydroksidi kiertää takaisin kontaktorille ja on valmis absorboimaan uudelleen. Samaan aikaan CaCO<sub>3</sub> lämmitetään pasutusuunissa (calciner) noin 900 asteeseen ja tämä on prosessin energiarikkain vaihe. Kun kalsiumkarbonaattiin tuodaan lämpöä, niin siitä saadaan irrotettua CO<sub>2</sub>, joka otetaan talteen. Kalsiumoksidi (CaO) jatkaa kierrossa kohti kalkinsammutusyksikköä (slaker) (kaava 4), jossa kalsiumoksidi sekoitetaan veden (H<sub>2</sub>O) kanssa ja syntyy Ca(OH)<sub>2</sub>, joka lähtee kohti kaustisointia. (Keith *et al.* 2018; Fasihi *et al.* 2019.)



Jotta hiilidioksidi saataisiin erotettua kalsiumoksidista, tarvitaan huomattava määrä energiaa. Tämä johtaa suuriin energiantarpeisiin väliaineen elvytyksessä kalsiumkarbonaatista kalsiumoksidiksi. Kalsiumkarbonaatin kuivattaminen ja kalsinointi hiilidioksidin vapauttamiseksi vaativat energiaa ja tuottavat suurimman osan energiasakosta kalsiumhydroksidisysteemeissä. Tässä prosessissa suurin osa energiasta menee kalsiumkarbonaatin elvyttämiseen ja hiilidioksidin puristamiseen. Prosessi siis vaatii paljon energiaa, josta voi aiheutua hiilidioksidipäästöjä. Energiasakoksi (energy penalty) kutsutaan sitä energiaa, mikä tarvitsee prosessiin lisätä johtuen eri prosesseista, mitä laitos tarvitsee toimiakseen. Esimerkiksi CSS-teknologialla varustetusta laitoksesta ei saa tuotettua niin paljon sähköä, koska hiilidioksidin kaappauksen väliaineen

elvyttäminen vaatii paljon energiaa. (Harkin *et al.* 2010). Kalsiumkarbonaatin kalsinointi hiilidioksidista vaatii energiaa noin 179 kJ/mol. Lisäksi aineiden liukoisuus kalsiumhydroksidin vesiliuokseen on todella pieni, niin tämä rajoittaa hiilidioksidin sitoutumista siihen. Hiilidioksidin kaappaamisen tehokkuus, väliaineen elvyttämisen suuri energiasakko ja hiilidioksidin matala liukoisuus tulevat olemaan tulevaisuudessa tutkimuksen kohteina ja asioina, joita voi parantaa merkittävästi. (Murdock *et al.* 2016; Broehm *et al.* 2015.)

Kirjallisuudessa on myös esitelty paljon maakaasun käyttöä lämmönlähteenä. Poltettaessa maakaasua 90% hyötysuhteella ja prosessin vaatiman sähkötehon ollessa 2000 kWh per talteen otettu hiilidioksiditonni, syntyisi noin 0.44 tonnia hiilidioksidia, joka huonontaisi laitoksen hyötysuhdetta melkein puolella (energy penalty). Ympäristöystävällisempi vaihtoehto olisi tuottaa osa tai kaikki prosessin vaatimasta sähköstä uusiutuvilla energialähteillä, kuten esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimalla. Lämmön lisäksi sähköä tarvitaan myös kontaktorin puhaltimissa, pumpuissa aineiden siirtelyyn ja hiilidioksidin puristamiseen. (Fasihi *et al.* 2019.)

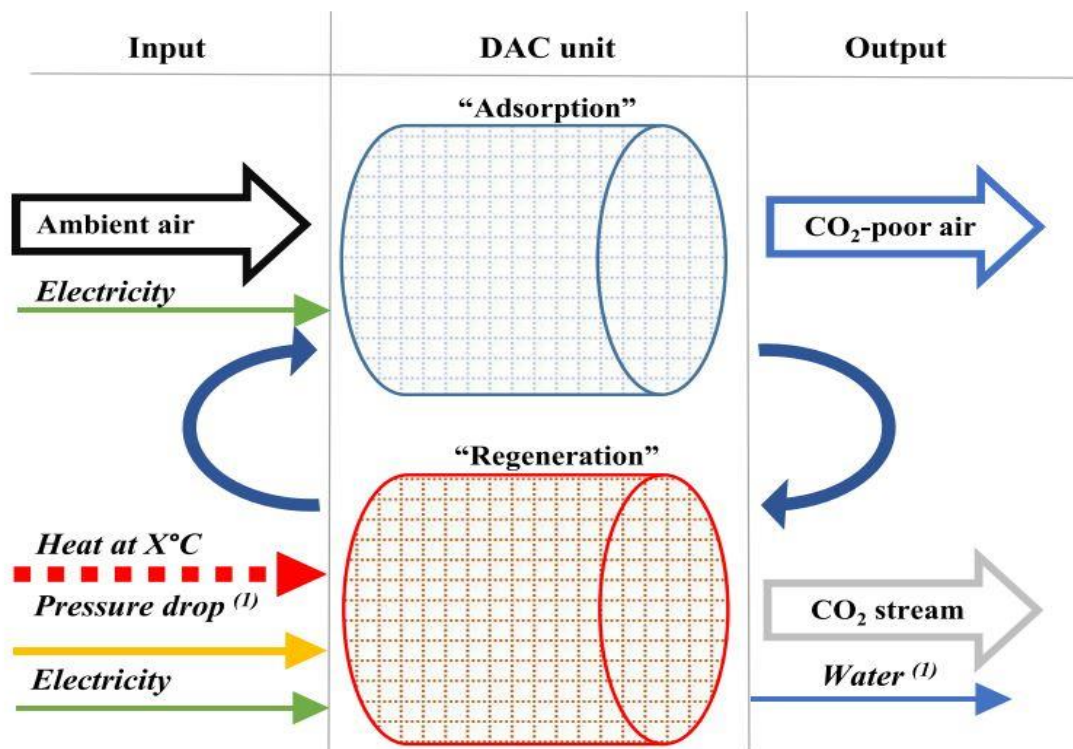
### **3.2 Kiinteän sorbentin systeemi**

Toinen tutkittu hiilidioksidin talteenottomenetelmä suoraan ilmakehästä perustuu kiinteisiin sorbentteihin. Suurin osa uusista tutkimuksista perustuu tähän menetelmään, koska hiilidioksidin irrottaminen väliaineesta ja väliaineen elvyttäminen ei ole sidottu samanlaisilla termodynaamisilla säännöillä kuin vesipohjaisissa systeemeissä.

Suurin osa kiinteisiin sorbentteihin perustuvista talteenottomenetelmistä käyttää yhtä moduulia, jossa adsorptio ja elvytys tapahtuvat eri aikana. Kuvassa 4 ensimmäisessä vaiheessa ilma virtaa moduulin läpi luonnollisesti tai tuulettimien avulla. Moduulissa on suodatin, joka kemiallisesti sitoo hiilidioksidin itseensä ja hiilidioksidivapaa ilma tulee ulos toisesta päästä. Vaihe loppuu, kun suodatin on kyllästetty hiilidioksidista, eli se ei voi sitoa itseensä enempää. Seuraavassa vaiheessa puhaltimet pysäytetään ja moduuli suljetaan, jotta ilma ei pääse sisälle. Tämän jälkeen ylimääräinen ilma poistetaan



moduulista tyhjiön avulla tai lisäämällä höyryä systeemiin. Tämän jälkeen systeemin elpyminen aloitetaan lämmittämällä se tiettyyn lämpötilaan, joka riippuu väliaineen koostumuksesta. Irrotettu hiilidioksidi kerätään talteen ja toimitetaan puhdistettavaksi, puristettavaksi tai hyötykäyttöön esimerkiksi synteettisten polttoaineiden raaka-aineeksi. Systeemin pitää vielä jäähtyä takaisin ympäristön lämpötilaan, jotta uusi kierros voi alkaa. (Fasihi *et al.* 2019.)

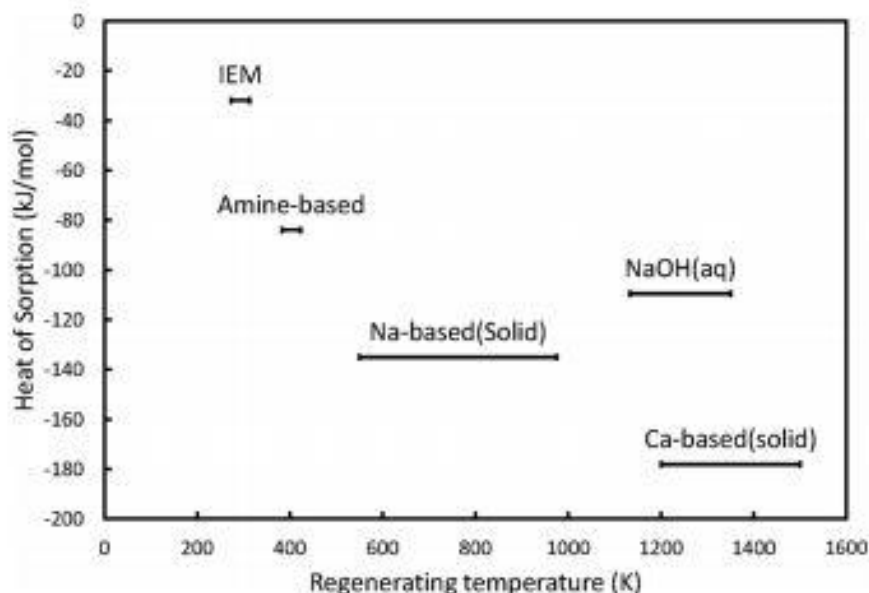


Kuva 4: Kiinteää sorbenttia käyttävän DAC-järjestelmän kuvaus. (Fasihi *et al.* 2019.)

Elvytys voi tapahtua lämmön, paineen tai kosteuden avulla. TSA eli temperature swing adsorption perustuu desorptio- ja adsorptiolämpötiloihin. Desorptio tapahtuu korkeammassa lämpötilassa ja adsorptio matalammassa. PSA eli pressure swing adsorption perustuu siihen, että paine lasketaan tiettyyn arvoon, jossa desorptio tapahtuu. Jos tämä laskee lähelle tyhjiön painetta, niin kyseessä on vacuum swing-adsorption eli VSA. Näitä erilaisia elvyttämismenetelmiä voi myös yhdistellä: Esimerkiksi TVSA, eli temperature vacuum swing adsorption, jossa hiilidioksidin irrottaminen väliaineesta

tapahtuu lämmön ja paineen yhteisestä vaikutuksesta, tai TCSA, eli temperature concentration swing adsorption, joka käyttää lämmitettyä reagoimatonta kaasupuhdistusta. Myös muita elvytysmahdollisuuksia on. (Broehm *et al.* 2015; Elfving 2015.)

Kiinteiden sorbenttien etu verrattuna nestepohjaisiin liuoksiin on niiden tarvitsema matala lämpötila. Erilaisia sorbentteja on kirjallisuudessa esitelty ja tutkittu, ja se tulee myös olemaan suurin tutkimuksen aihe kiintoaineisiin perustuvassa DAC-systeemissä. Alla olevassa kuvassa 5 on esitelty eri materiaalien kiinnittymisenergiaa ja elvyttämislämpötilaa. Kuvassa lämpötilat ovat kelvineinä. (Elfving 2015.)



Kuva 5: Eri materiaalien elvyttämislämpötiloja suhteessa tarvittavaan sorptioenergiaan. (Elfving 2015.)

Kiinteiden aineiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat hiilidioksidin sitomiskyky ja aika, jossa suodatin saadaan elvytettyä. Kiinteisiin materiaaleihin perustuvat järjestelmät ovat yleensä kaksivaiheisia, eli kun elvyttämisvaihe on päällä, niin hiilidioksidia ei saada otettua talteen ja tämän takia elpymisaika on kriittinen kokonaisprosessin käytönajan kannalta. Sorbenttien kyky adsorboida hiilidioksidia on myös riippuvainen jo adsorboidusta hiilidioksidimäärästä, eli adsorboiminen on aluksi paljon nopeampaa kuin

lähempänä tasapainotilaa, joka luo myös omat haasteensa optimoinnin suhteen. (Elfving 2015.)

Ilman hiilidioksidipitoisuus (noin 0,04%) on suhteellisen matala verrattuna savukaasujen hiilidioksidipitoisuuksiin (3-15%). Tämä aiheuttaa omat ongelmansa hiilidioksidin talteenotolle, etenkin väliaineelle, jonka pitäisi pystyä sitouttamaan hiilidioksidi. Amiinit ovat yksi suosituimmista tutkimuskohteista DAC-teknologiassa johtuen niiden kyvystä absorboida hiilidioksidia laimeilla pitoisuuksilla, mutta siihen liittyy silti epävarmuutena amiinisuodattimien elinkaaret, amiinien haihtuvuus, amiinin tai sen tukiaineen suorituskyvyn heikkeneminen ja kustannukset. (Teir *et al.* 2009, Broehm *et al.* 2015 Fasihi *et al.* 2019.)

Erilaisia materiaaleja, joita voidaan käyttää hiilidioksidin talteenottamiseen ja vapauttamiseen erilaisissa olosuhteissa, on tutkittu, mutta silti parhaita tai edes keskinkertaisia materiaaleja ei ole löydetty. Sorbenteiksi on lisäksi ehdotettu esimerkiksi zeoliitteja, natrium- ja kalsiumpohjaisia materiaaleja ja monia muita. Haasteena näissä materiaaliissa on kuitenkin se, että zeoliitit tarvitsevat erittäin kuivaa ilmaa, joten mahdollisesti ilma jouduttaisiin kuivaamaan ensin ja natrium- ja kalsiumpohjaiset materiaalit tarvitsevat kovemman lämmön kuin amiinipohjaiset sorbentit. (Broehm *et al.* 2015; Elfving 2015.)

DAC-teknologia, joka käyttää sorbentteja materiaaleja, tarvitsee silti energiaa melko paljon. Tämän hetken arvioissa kokonaisenergian kulutukseksi on arvoitu noin 1000-2000 kWh ja jopa yli tämän olevia energiamääriä per kaapattu hiilidioksiditonni. Käyttämällä sorbentteina amiineja on lämmöntarve kuitenkin usein paljon alhaisempi (100°C) kuin mikä on vesipohjaisissa järjestelmissä (900°C), mikä voi olla helpompi tuottaa esimerkiksi höyryllä tai käyttämällä hukkalämpöä. Muutamilla sorbenteilla tarvitaan kuitenkin korkeampia lämpötiloja. Zeoliitit ja natriumpohjaiset materiaalit

tarvitsevat yli 300 astetta, piidioksidi yli 200 astetta ja kalsiumpohjaiset materiaalit tarvitsevat jopa 900 astetta. (Elfving 2015.)

### 3.3 Muut systeemit

Hiilidioksidin kaappaamiseen on ehdotettu myös hyvin radikaaleja menetelmiä. Moni näistä tutkimuksista on vain teoriapohjalla ja vähän tutkittuja, ja siksi niihin ei oteta tässä tutkimuksessa enempää kantaa. Eisamanin tutkimusryhmä on esimerkiksi tutkinut sähkökemiallista hiilidioksidin kaappaamista suoraan ilmakehästä. Tutkimuksessa keskityttiin elektrokemialliseen lähestymistapaan elvytysvaiheessa oleville kaliumkarbonaatti- ja vetykarbonaattisovelluksille. Järjestelmässä on bipolaarinen kalvoelektrodialyyysi, joka erottaa karbonaatin tai bikarbonaatin hapoksi ja emäkseksi lisäämällä jännitettä ioniselektiivisiin anioninvaihtokalvoihin ja vedenerotuskalvoihin. Hiilidioksidi on sidottuna joko karbonaattiin tai vetykarbonaattiin riippuen käytetystä väliaineesta. Sitoutunut hiilidioksidi kulkeutuu happojärjestelmään, joka muuntaa karbonaatin tai vetykarbonaatin hiilidioksidikaasuksi. (Eisaman *et al.* 2011.)

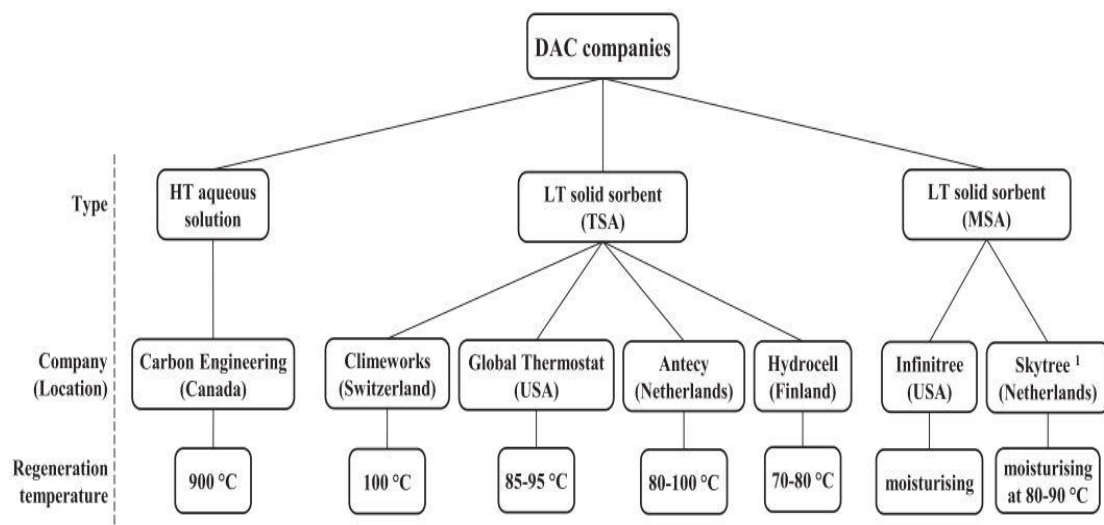
Robert A. Freitas Jr. on tutkinut molekulaariseen nanoteknologiaan perustuvaa teknologiaa. Molekulaarisen nanoteknologian etuina ovat korkea laatu, edulliset kustannukset ja muuntautumiskykyinen valmistusjärjestelmä. Hiilidioksidi kaapataan suodattimeen, joka olisi valmistettu molekulaarisella nanoteknologialla, jonka hiilidioksidin sitomiskyky olisi maksimoitu. Systeemiin vaadittava energia tuotettaisiin aurinkopaneeleilla ja hiilidioksidin erottamiseen tarvittava energiamäärä 100 barin paineessa olisi noin 1200 kJ/kg, mikä tekisi noin 330 kWh kaapattua hiilidioksiditonna kohden. Hiilidioksidin kaappauskustannuksiksi on arvioitu vain 18,3  $\$/t_{CO_2}$ . Nanoteknologia on vasta alhaisessa kehityksen vaiheessa, mutta toteutuessaan se voisi tarjota todella kilpailukykyisiä menetelmiä ja jopa mullistaa hiilidioksidin kaappaamisen. Ei ole kuitenkaan näkyvissä, että teknologia tulisi käyttöön lähitulevaisuudessa. (Freitas Jr 2016.)

Myös hiilidioksidimolekyylien kiteyttäminen käyttämällä guaniinisorbenttia matalassa lämpötilassa (80-120°C) on ehdotettu. Tämä laskisi kustannuksia verrattuna vesipohjaiseen hiilidioksidin talteenottoon, mutta tarkempia laskelmia ei ole esitetty. (Seipp *et al.* 2016.)

Lupaavista tutkimustuloksista huolimatta aiheet tarvitsevat lisätutkimusta ja mahdolliset pilottilaitokset voivat tulla tarpeeseen, jotta teknologiaa saataisiin paremmin arvioitua. Monet tutkimuksista perustuvat jo olemassa olevan teknologian parantamiseen. Väliaineita koitetaan parantaa, sähkön kulutusta laskea ja hintaa saada alaspäin.

### **3.4 Pilottihankkeet ja yritykset**

Maailmalla on muutamia yrityksiä DAC-teknologian saralla, jotka ovat aktiivisena kehittämässä teknologiaansa tai kaupallistamassa sitä. Kuvassa 6 on esiteltynä eri yrityksiä, jotka ovat aktiivisena mukana hiilidioksidin kaappaamisella DAC-teknologialla. Kuvassa käy ilmi myös käytetty teknologia. Vesipohjainen systeemi (HT) ja kiinteä sorbentti (LT), lisäksi kiinteä sorbentit ovat jaoteltuja käytettävän tekniikan eli TSA ja MSA välillä. Lisäksi kuvassa on kerrottuna tarvittava elvytyslämpötila. (Fasihi *et al.* 2019)

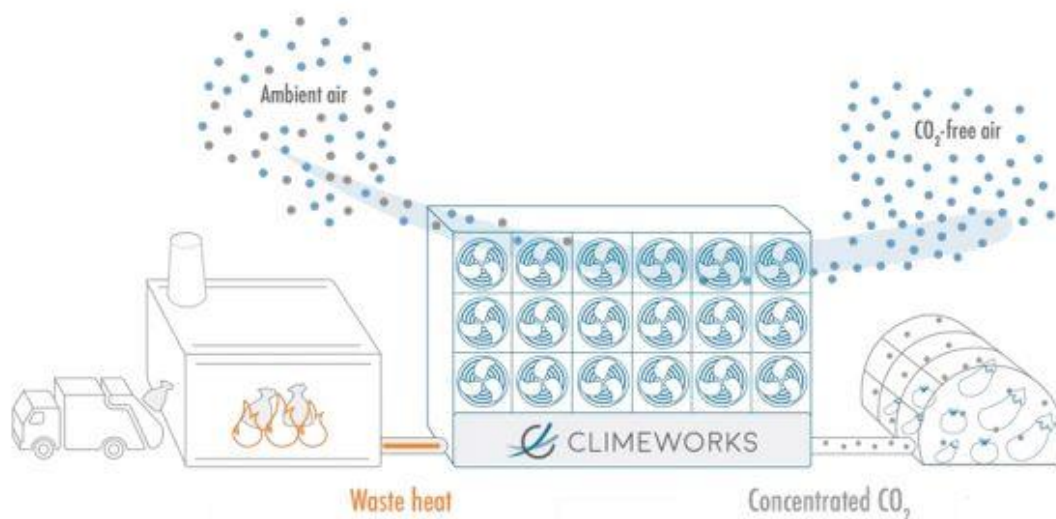


Kuva 6: Eri DAC-yritysten käyttämiä teknologioita ja vaadittava elvyttämislämpötila. (Fasihi *et al.* 2019)

Carbon Engineering on kanadalainen vuonna 2009 perustettu yritys, ja se on ainoa noteerattava yritys, joka käyttää vesipohjaista korkean lämpötilan järjestelmää. Yrityksellä on 2015 valmistunut pilotti- ja testauslaitos, joka ottaa hiilidioksidia talteen tonnin päivässä. Vuonna 2017 pilottilaitokseen lisättiin mahdollisuus jatkojalostaa hiilidioksidista polttoainetta ja sitä syntyy noin tynnyri päivässä. Carbon Engineeringin tavoitteena on saada tuote kaupallistettua ja vakuutettua ihmiset siitä, että hiilidioksidin poisto ilmakehästä on tarpeellista. Tällä hetkellä tehdään viimeisiä tutkimuksia ennen kaupallistamisen aloittamista ja ensimmäiset ison mittakaavan laitokset pitäisi saada näillä näkymin tarjolle vuonna 2021. (Carbon engineering 2019.)

Climeworks on myös perustettu vuonna 2009 ja se käyttää kiinteää sorbenttia väliaineenaan. Climeworksin laitokset ovat modulaarisia, skaalautuvia ja ne toimivat autonomisesti vuorokauden ympäri. Climeworksin pilottilaitos on pieni, omatoiminen ja liikuteltavissa oleva yksikkö, joka ottaa talteen hiilidioksidia 8 kg päivässä. Vuonna 2014 Climeworks, yhteistyössä Audin ja Sunfiren kanssa, julkaisi pilottilaitoksen, joka kaappaa hiilidioksidia ilmakehästä ja tekee siitä dieseliä. Vuonna 2017 ensimmäinen kaupallinen hiilidioksidin talteenottolaitos tuli valmiiksi ja tämä Climeworksin Sveitsissä sijaitseva laitos ottaa talteen 900 tonnia hiilidioksidia vuodessa. Sorbentin

lämmittämiseen tarvitseman energian se saa jätteiden hyötykäyttölaitokselta hukkalämpönä ja hiilidioksidin se toimittaa läheiselle kasvihuoneelle, joka käyttää sitä lannoitteena kasviksille. Alla olevassa Kuvassa 7 on kuvattu ensimmäisen DAC-teknologiaa käyttävän kaupallisen laitoksen havainnekuva. Samana vuonna myös Islantiin avattiin hiilidioksidin talteenottolaitos, jossa on myös hiilidioksidin varastoiminen 700 metrin syvyyteen kallioperään. Climeworksin tavoitteena on vuonna 2025 kaapata prosentin verran vuotuisesti ihmisen toiminnalla tuotetuista hiilidioksidipäästöistä. (Climeworks 2019; Climeworks 2017.)



Kuva 7: Kuvaus Climeworksin ensimmäisestä kaupallisesta DAC-laitoksesta. (Climeworks 2017.)

Global Thermostat on perustettu vuonna 2010. Sen teknologia perustuu kiinteisiin sorbentteihin, joiden elvytyslämpötila on 85-100 °C ja hiilidioksidi on 98 prosenttisesti puhdasta. Lämpö prosessiin pyritään saamaan ilmaiseksi tai alhaisilla kustannuksilla hyödyntäen esimerkiksi hukkalämpöjä. Laitosten rakenne on modulaarinen, ja yksi moduuli saa kaapattua hiilidioksidia 40 000 tonnia vuodessa. Teknologia sopii myös pistemäisille kohteille hiilidioksidin kaappaamisen ilmakehästä lisäksi. Pilottilaitos on yrityksellä ollut toiminnassa jo vuodesta 2010 lähtien. (Global thermostat 2019.)

Suomalainen yritys Soletair tekee vedystä ja hiilidioksidista polttoainetta. Heidän teknologiassaan hiilidioksidi kerätään talteen ilmakehästä käyttämällä TVSA-menetelmää eli temperature-vacuum swing adsorption, jossa sorbentin (amiini) elvyttäminen tapahtuu paineenpudotuksen ja lämpötilan avulla. Tällä menetelmällä päästään alhaisempiin lämpötiloihin. Vaadittava energia tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä, pääasiassa aurinkopaneeleilla, ja vety erotetaan elektrolyysin avulla vedestä. Soletair rakensi pilottilaitoksen vuonna 2017 Lappeenrantaan ja sen hiilidioksidintalteenotto-kyky on 3,8 kg päivässä, mikä tekee vuodessa noin 1,4 tonnia. (Vázquez *et al.* 2018.)

Pilottilaitoksia on maailmalla monia ja vielä enemmän laitoksia on testausvaiheessa. Uudella tekniikalla on tärkeää saada testauslaitokset toimintakuntoisiksi ja todistettua, että tekniikka on kannattavaa. Hyödyksi saatu ja oikein käytetty data tulevat pudottamaan merkittävästi kustannuksia kaupallistamisvaiheessa. Kun tekniikasta on saatu karsittua ylimääräiset pois ja se on todettu toimivaksi.



## 4 KUSTANNUKSET

Suurimassa osassa DAC-tekniikan tutkimuksia tekniikka ja sen kehittäminen ovat olleet pääasiallinen tutkimuksen kohde ja kustannuksia ei ole huomioitu niin paljoa. Uuden tekniikkaan kustannuksiin liittyy aina luonnostaan epävarmuuksia. Kustannuksia arvioidaan erilaisin työkaluin, ja usein lopullinen hinta on korkeampi kuin on ensin ajateltu. Laitteistoissa on myös epävarmuustekijöitä. Huolto- ja kunnossapitokustannukset voivat olla isommat kuin on ajateltu. Laitteiden elinkaari, esimerkiksi amiinisuodattimien, ei ole niin pitkä kuin laskennassa on käytetty. Myös tutkimustuloksissa kustannuksia voi olla pienennetty, jotta tulokset näyttäisivät paremmilta. Lisäksi tekniikan kehittyessä usein myös hintoihin tulee päivityksiä. (Fasihi *et al.* 2019.)

Liutinpohjaisten järjestelmien suurimpana kehittäjänä on ollut David Keith, joka tutki aihetta jo 2000-luvun alusta. Vuonna 2005 hän arvioi, että hiilidioksidin talteenoton kustannukset olisi alle 500  $\$/t_{CO_2}$  (Keith *et al.* 2005). Vuonna 2012 Holmes ja Keith pääsivät hintaan 343  $\$/t_{CO_2}$  muuttamalla kontaktorin suunnittelua (Holmes and Keith 2012). Vuonna 2011 American Physical Society:n (APS) tutkimuksessa vesipohjaisen hiilidioksidin talteenoton realistiseksi kustannukseksi saatiin 550  $\$/t_{CO_2}$ . Tutkimuksessa esiteltiin myös optimistinen hinta, joka on 430 $\$/t_{CO_2}$ . Tutkimuksessa pääoma- ja käyttökustannukset olivat eritelty ja tietoa yksittäisistä kustannuksista oli hyvin. Monet tutkimukset, joissa kustannuksia on yritetty pienentää, on otettu joko kantaa tai verrattu tähän APS:n tutkimukseen (Socolow *et al.* 2011). Vuonna 2013 Mazzotti muutti kontaktorin suunnittelua ja sai pudotettua lopullista hintaa hieman alaspäin. Vuonna 2014 Zeman muutti myös kontaktoria ja laski kustannukset ja energiavaatimukset uudelleen saaden tarvikkeiden investointikustannuksia pudotettua 2,4%, ja vuosittainen opex eli operatiivisen toiminnan kulut putosivat neljästä prosentista kolmeen prosenttiin. (Fasihi *et al.* 2019.)

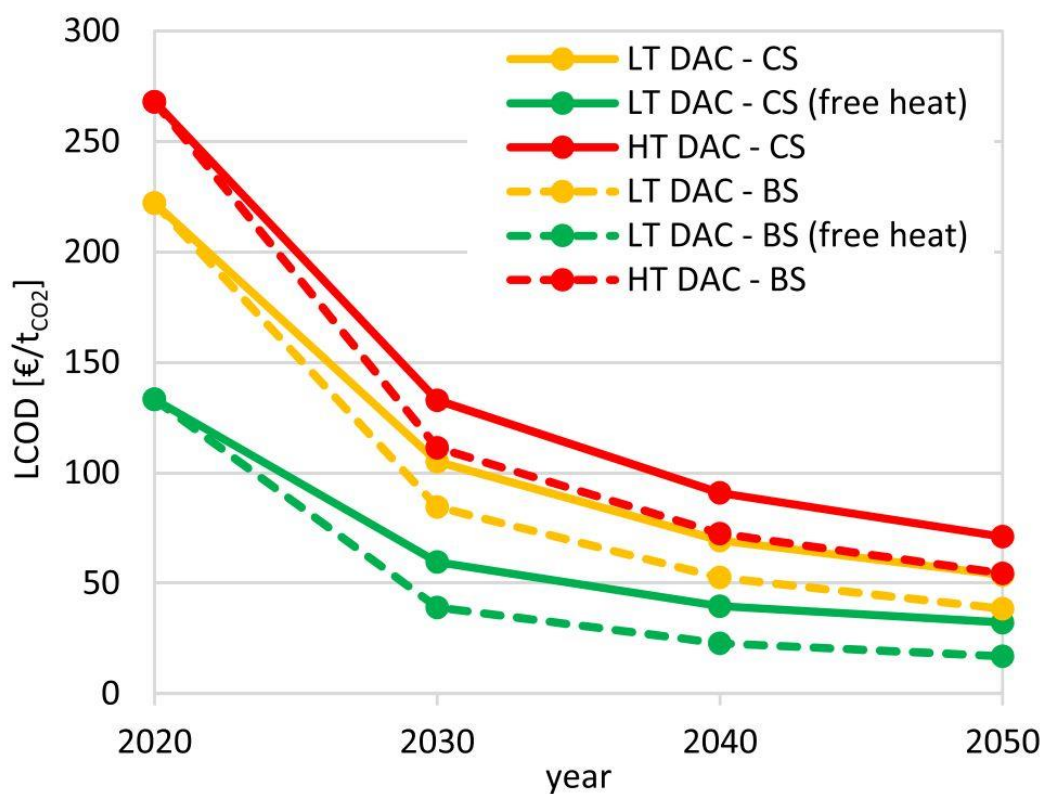
Carbon Engineering kertoi artikkelissaan vuonna 2018 päässeensä kustannuksissa välille 94-232  $\$/t_{CO_2}$ . Kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi se, että tuotetaan energia

pelkästään kaasulla vai sähköllä. Kustannukset kaasulla tuotettuna kasvavat, koska laitos tarvitsee polttouunin lämpöenergian lisäksi sähköä, jolloin kaasulla täytyisi tehdä myös sähköä turbiinin avulla ja tästä syystä pääomakustannukset nousevat merkittävästi. Verrattuna APS:n tutkimukseen, hintaa on saatu pudotettua suunnittelulla ja erilaisilla materiaalivaihtoehdoilla. Kontaktorin uudelleen suunnittelulla hintaa on myös saatu merkittävästi alaspäin. Toisena isona vaikuttavana tekijänä on se, että kalsinaattorin energiatarvetta on saatu pienentyä APS:n 8,1 GJ/t<sub>co2</sub> Carbon Engineeringin 5,25 GJ/t<sub>co2</sub>. Myös hiilidioksidin kaappauskyky on parantunut 50 prosentista 74,5 prosenttiin. (Keith *et al.* 2018; Fasihi *et al.* 2019.)

Kiinteitä sorbentteja koskevissa tutkimuksissa pääpainona on ollut teknologia, ja kustannuslaskelmia ei löydy kuin muutamista. Climeworks väittää, että suuressa mittakaavassa päästäisiin alle 100 \$/t<sub>co2</sub>, mutta mitään tarkempia laskelmia väitteen tueksi ei löydy (Climeworks 2019). Climeworksin ensimmäisen kaupallisen hiilidioksidin talteenottojärjestelmän kustannukset ovat noin 600 \$/t<sub>co2</sub>. Tästä huolimatta suuressa mittakaavassa päästään alhaisempiin kustannuksiin, ja National Academy of Science (NSA) on arvioinut, että kustannukset olisivat 88-228 \$/t<sub>co2</sub> kiinteille sorbenteille (NSA, 2019). Global Thermostat arvioi, että 100 \$/t<sub>co2</sub> on mahdollista, jos elvyttämisvaiheen tarvitsema energia eli lämpö saadaan halvalla tai ilmaiseksi hukkalämpönä. (Global Thermostat 2019)

Erilaisten kirjallisuudesta löytyvien kustannusarvioiden vertaileminen ei ole vertailukelpoisia teknologisten kuvausten avoimuuden puutteen vuoksi. Eri teknologiat käyttävät erilaisia määriä energiaa ja sen hinta on erilainen riippuen tutkimuksessa käytetyistä hinta-arvioista. Kuitenkin tutkijat ovat yhtä mieltä siitä, että DAC-teknologiassa on tapahtunut ja tulee tapahtumaan pitkän aikavälin kehitystä. Vesipohjainen systeemi on kaikista eri DAC-teknologioista kehittynein, ja se on kehittynyt teknologisesti paljon viime vuosina. Pitkällä aikavälillä jatkuva kehitys tulee laskemaan pääoma- ja käyttökustannuksia alaspäin. Broehm *et al.* (2015) arvioi, että lyhyen aikavälin kulut tulevat olemaan luokkaa 100-550 \$/t<sub>co2</sub>. Hintahaitari käsittää optimistiset ja pessimistiset hinta-arviot, ja realistinen hinta tulisi olemaan noin 200 \$/t<sub>co2</sub>.

Pitkällä aikavälillä hinnaksi on arvioitu 40-140  $\$/t_{CO_2}$ , josta realistinen hinta pyörii noin 100  $\$/t_{CO_2}$  luokassa. Alla olevassa kuvassa 8 on arvioituna DAC-tekniikan hintakehitystä vuodesta 2020 vuoteen 2050. Tekniikat on jaettu kiinteisiin sorbentteihin (LT) ja vesipohjaiseen systeemiin (HT). Lisäksi on esitetty konservatiivinen skenaario (CS) ja tavallinen skenaario (BS). (Broehm *et al.* 2015; Fasihi *et al.* 2019.)



Kuva 8: Skenaarioita eri DAC-tekniikoiden hinnan kehittämisestä 2050-luvulle asti. (Fasihi *et al.* 2019.)

## 5 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Puhuttaessa DAC:n kehityksestä tähän päivään, on tekniikan puolesta ja vastaan ollut erilaisia mielipiteitä. Kuitenkin, jos huomioi, että tekniikka on keksitty vasta noin kaksi vuosikymmentä sitten, niin tutkimusten määrä ja kiinnostus teknologiaa kohtaan on noussut valtavasti. 2000-2010-luvulla aiheesta tehtiin noin 25 julkaisua ja seuraavana vuosikymmenenä aiheesta oli tullut 100 julkaisua vuosikymmenen puoleenväliin mennessä. Kiinnostus DAC-tekniikkaan kasvaa siis nopeasti ja lisääntyvä määrä tutkijoita kehittelevät materiaaleja ja prosesseja tähän teknologiaan. Lisäksi monet startup-yritykset Carbon Engineeringin ja Climeworksin takana vievät tekniikkaa jo laboratoriotasolta pilottihankkeisiin, mikä on kehityksen kannalta välttämätöntä. (Murdock *et al.* 2016.)

Hiilidioksidipitoisuuden ollessa ilmakehässä pientä (noin 400 ppm), niin tehokkaat ja taloudelliset hiilidioksidinkaappausmenetelmät vaativat myös tehokkaita väliaineita. Väliaineen pitää pystyä sitomaan suuria määriä hiilidioksidia itseensä. Lisäksi niiden täytyy etenkin kiinteillä sorbenteilla olla nopeasti elvytettävissä, koska tällöin laitos ei ota hiilidioksidia talteen. Väliaineen tulee omata hyvä sietokyky muita ilman komponentteja vastaan, jotta se sitoisi vain hiilidioksidia. Myös kustannusten tulee olla alhaisia.

Tällä hetkellä monet suurimmat DAC-teknologian yritykset, kuten Climeworks, Garbon Engineering ja Global Thermostat kaupallistavat teknologiaansa ja laitoksia. Näiden perässä tulee monia startup-yrityksiä, jotka kehittelevät omaa teknologiaa ja vievät sitä pilotointi ja testausvaiheeseen. Climeworksin tavoite on vuonna 2025 kaapata prosentin verran hiilidioksidia. (Climeworks 2019; Garbon Engineering 2019; Global Thermostat 2019.)

Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä tulee tulevaisuudessa kehittymään entistä nopeampaan tahtiin. Kiinnostus tekniikkaa kohtaa kasvaa, kun kustannukset laskevat. DAC-teknologia tulee kohtaamaan tulevaisuudessa myös monia erilaisia haasteita. Energiankulutus on merkittävää ja vaihtoehtoina ovat joko fossiilisten polttoaineiden

poltto tai täysi sähköistys. Polttamalla maakaasua voidaan merkittävästi pienentää sähkön kulutusta, mutta toisaalta taas laitos tuottaa itsessään myös hiilidioksidipäästöjä, jolloin laitoksen tehokkuus laskee. Jos vertaa DAC-tekniikan ja CCS-tekniikan kustannuksia, niin niissä on huima ero. Arvioit CCS-tekniikan hinnasta ovat tällä hetkellä 20-110  $\$/t_{CO_2}$ , ja silti maailmalla on vain muutama suuren mittakaavan CCS-laitos. Kuitenkin ilmastonmuutoksen ajamat pakotteet hiilidioksidin vähentämisestä tulevat nostamaan negatiivisten päästöjen tekniikkaa tulevina vuosina.

DAC-tekniikassa on muutama iso ongelma. Yhden suomalaisen päästökeskiarvo on noin 8,7 tonnia vuodessa (2014) (The World Bank 2019). Kun tätä vertaa esimerkiksi Intian arvoon, joka on 1,7 tonnia vuodessa (2014) (The World Bank 2019), on havaittavissa suuria ongelmia. Intia on yksi maailman väkirikkaimmista maista ja se kehittyy koko ajan: sähkö ja muut mukavuudet alkavat olla kaikille saatavilla. Intian ihmiskohtainen päästökeskiarvo tulee nousemaan todella paljon seuraavien vuosien aikana, ja sillä on maailmanlaajuinen merkitys ilmastolle. Tällä hetkellä DAC-tekniikan kustannusten arvioidaan olevan 100-550  $\$/t_{CO_2}$ . Tämä tekee yhdelle suomalaiselle hinnaksi 800-4000 € vuodessa. Lisäksi DAC:n yksi ongelma on suuri energian kulutus. Keskimääräinen suomalainen kuluttaa vuodessa noin 15,4 MWh energiaa ja DAC-tekniikalla oleva hiilidioksidin poistaminen kuluttaa noin 1,5 MW/ $t_{CO_2}$ . Kärjistetyksi sähkön kulutus nousisi yli puolella, jos ihmisen toiminnan johdosta syntynyt hiilidioksidi haluttaisiin poistaa Suomesta.

## 6 YHTEENVETO

Ilmastonmuutos on todellinen uhka ihmiskunnalle ja se on tunnustettu erilaisissa tutkijapiireissä sekä valtiotasolla. Ilmastonmuutokseen on herätty viime vuosina entistä enemmän, ja todennäköisesti liian myöhään pysyäksemme Pariisin ilmastopimuksessa sopimaan 1,5 asteen lämpötilan nousua verrattaessa esiteolliseen aikaan. Ilmaan päästetään päästöjä vuosi vuodelta vain enemmän, koska kehittyvillä valtioilla ei ole rahaa panostaa uusiutuviin energialähteisiin vielä. Suurin osa maailman valtioista ei ole Suomen kaltaisia hyvinvointivaltioita, vaan kehittyviä maita. Teollistuminen näissä maissa tapahtuu samalla tavalla kuin aikanaan meillä eli ilman uusiutuvia energialähteitä. Erona vain on se, että ihmisiä, jotka tarvitsevat sähköä ja lämmintä käyttövetä, on moninkertaisesti. Tämän takia tulemme tarvitsemaan teknologiaa, joka poistaa hiilidioksidia ilmasta. Ongelmana on myös sektorit, kuten lento-, laiva- ja autoliikenne, joita on vaikea lähitulevaisuudessa muuttaa päästöttömiksi.

DAC-teknologia on yksi vaihtoehto hiilidioksidin talteenotolle ilmakehästä. Sen etu on se, että sitä ei ole sidottu paikkaan, kuten esimerkiksi voimalaitosten viereen, vaan se voidaan sijoittaa minne tahansa. Tekniikka on vasta kehityksensä alkuvaiheessa ja kohdannut monia ongelmia muun muassa energiakäytön osalta. Kuitenkin muutama yritys vie teknologiaa koko ajan eteenpäin ja seuraavilla vuosikymmenillä pitäisi valmistua monia kaupallisia laitoksia.

DAC-teknologian kehitys tulee tapahtumaan seuraavana vuosina parempien materiaalien, ja uusien teknisten ratkaisuiden kautta. Samalla kun tapahtuu teknologiallista kehitystä, myös kustannukset tulevat laskemaan. Sähkön kulutusta pystytään optimoimaan, ja mahdollisesti prosessin vaatima lämpö tuottamaan myös ilman hiilidioksidipäästöjä, jolloin sähkönkulutus olisi matalampi.

Hiilidioksidin kaappaamista ilmakehästä tarvitaan, jotta saamme hiilidioksidipäästöjä laskuun. Se ei tule kuitenkaan yksin pelastamaan ilmastoa, vaan yhdessä muiden negatiivisten päästöjen teknologioiden ja uusiutuvan energian kautta on mahdollisuus

päästä toivottuun tulokseen ja ilman keskilämpötilan laskuun. Tällä hetkellä hiilidioksidin kaappaaminen on vielä liian kallista, mutta tulevaisuudessa, jos hinta putoaa alle 100  $\$/t_{CO_2}$ , voi kysyntä kaupallisille laitoksille nousta. Suurin mahdollisuus olisi nanoteknologialla, mutta se on vielä kaukana.

## LÄHDELUETTELO

- Broehm, M., Strefler, J., and Bauer, N. (2015). Techno-Economic Review of Direct Air Capture Systems for Large Scale Mitigation of Atmospheric CO<sub>2</sub>. *SSRN Electronic Journal*, 1–28. DOI: 10.2139/ssrn.2665702 [Verkkoaineisto].  
Saatavilla: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2665702](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2665702)
- Carbon Engineerin, 2019. Carbon engineerin creates cleanfuel out of air. [Verkkosivu].  
[Viitattu 27.10.2019]. Saatavissa: <https://carbonengineering.com>
- Climate Action Tracker, 2019. Temperatures. [verkkosivu]. [viitattu 12.10.2019].  
Saatavilla: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>
- Climeworks, 2019. Our Technology. [Verkkosivu]. [Viitattu 26.10.2019]. Saatavilla:  
<http://www.climeworks.com/our-technology/>
- Climeworks, 2017. World-first Climeworks plant: Capturin CO<sub>2</sub> from air to boost growing vegetables. Press Release. [Verkkoaineisto]. Saatavilla PDF:  
[climeworks.com/wp-content/uploads/2017/05/02\\_PR-Climeworks-DAC-Plant-Case-Study.pdf](http://www.climeworks.com/wp-content/uploads/2017/05/02_PR-Climeworks-DAC-Plant-Case-Study.pdf)
- Consoli, C. (2018). Bioenergy and carbon capture and storage, 1–14. [Verkkoainesto].  
Saatavilla PDF: [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective\\_FINAL\\_PDF.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_PDF.pdf)
- Davis, S.J., Creutzig, F., Fuss, S., Change, C., Minx, J.C., and Change, C. (2015). Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions, (December). DOI: 10.1038/NCLIMATE2870 [Verkkoaineisto] Saatavilla PDF:  
[https://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/Smith\\_2015\\_Biophysical%20and%20economic%20limits%20to%20negative%20CO2%20emissions.NatureCC.pdf](https://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/Smith_2015_Biophysical%20and%20economic%20limits%20to%20negative%20CO2%20emissions.NatureCC.pdf)
- Eisaman, M., Alvarado, L., Larnier, D., Wang, P., Garg, B., and Littau, K. (2011). CO<sub>2</sub> separation using bipolar membrane electro dialysis. *Energy Environ. Sci.*, 4. DOI:



10.1039/C0EE00303D [E-artikkeli]. Saatavilla: <https://pubs-rsc-org.ezproxy.cc.lut.fi/en/content/articlelanding/2011/EE/C0EE00303D#!divAbstract>

Elfving, J. (2015). Characterization of Amine-Based CO<sub>2</sub> Adsorbent for Direct Air Capture. Diplomityö. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, LUT kemiantekniikka. Lapeentanta. 81 s.

European Environment Agency (2018). Greenhouse gas emissions from transport. Statistics, 1–13. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.10.2019]. Saatavilla: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-11>

Fasihi, M., Efimova, O., and Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0959652619307772?via%3Dihub>

Freitas Jr, R.A. (2016). The Nanofactory Solution to Global Climate Change : Atmospheric Carbon Capture. IMM Report No. 45, December. Institute for Molecular Manufacturing, Palo Alto, Usa. [Verkkoaineisto] Saatavilla: <http://www.imm.org/reports/>

Global Thermostat, 2019. Global Thermostat and ExxonMobil to Advance Breakthrough Atmospheric Carbon Capture Technology. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.10.2019]. Saatavilla: <https://globalthermostat.com/>

Harkin, T., Hoadley, A., and Hooper, B. (2010). Reducing the energy penalty of CO<sub>2</sub> capture and compression using pinch analysis. *Journal of Cleaner Production*, 18 (9), 857–866. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.011>

Holmes, G. and Keith, D.W. (2012). An air-liquid contactor for large-scale capture of

CO<sub>2</sub> from air. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370 (1974), 4380–4403. [Verkkoaineisto].  
Saatavilla: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2012.0137>

Ilmatieteenlaitos, 2019. IPCC tukee ilmastopoliittista päätöksentekoa.. [verkkosivu].  
[Viitattu 15.10.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/ipcc-ilmastopaneeli>

IPCC, 2019. The Intergovernmental Panel on Climate Change. [Verkkosivu]. [Viitattu  
16.10.2019]. Saatavissa: <https://www.ipcc.ch/>

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of  
global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse  
gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the  
threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty  
[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A.  
Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y.  
Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield  
(eds.)]. In Press. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC, 2014. Climate Change 2014: synthesis Report. Contribution of Working Groups I,  
II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on  
Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)].  
IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. [Verkkoaineisto]. Saatavilla:  
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Keith, D.W., Ha-duong, M., and Stolaroff, J.K. (2005). CLIMATE STRATEGY WITH  
CO<sub>2</sub> CAPTURE FROM THE AIR. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: [https://link-  
springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/article/10.1007%2Fs10584-005-9026-x](https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/article/10.1007%2Fs10584-005-9026-x)

Keith, D.W., Holmes, G., St. Angelo, D., and Heidel, K. (2018). A Process for  
Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere. *Joule*, 2 (8), 1573–1594. [Verkkoaineisto].  
Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

Lackner, K.S., Ziock, H.-J., and Grimes, P. (1999). Carbon Dioxide Extraction From Air: Is It An Option? 24th Annual Technical Conference on COal Utilization & Fuel Systems, 836. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://www.osti.gov/biblio/770509-carbon-dioxide-extraction-from-air-option>

Lindsey, R. and Dlugokencky, E. (2017). Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide, 1–5. [Verkkosivu]. [Viitattu 18.10.2019]. Saatavissa: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

Murdock, C.R., Didas, S.A., and Jones, C.W. (2016). Direct Capture of CO<sub>2</sub> from Ambient Air. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.6b00173>

National Aeronautics and Space Administration. Goddard institute for space Studies, 2019 GISS sSurface Temperature Analysis (v4). [Verkkosivu]. [Viitattu 1.11.2019]. Saatavissa: [https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v4/](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/)

National Academies of Sciences, Engineering, and M. 2019. N. and Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, D.T.N.A.P. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://www.nap.edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>

Seipp, C.A., Williams, N.J., Kidder, M.K., and Custelcean, R. (2016). CO<sub>2</sub> Capture from Ambient Air via Crystallization with a Guanidine Sorbent, 0165, 1–14. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.cc.lut.fi/doi/full/10.1002/anie.201610916>

Socolow, R., Desmond, M., Aines, R., Blackstock, J., Bolland, O., Kaarsberg, T., Lewis, N., Mazzotti, M., Pfeffer, A., Sawyer, K., Sirola, J., Smit, B., and Wilcox,

J. (2011). Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with Chemicals. American Physical Society - Panel on Public Affairs, 91. [Verkkoaineisto]. Saatavilla PDF: <https://www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf>

Teir, S., Tsupari, E., Koljonen, T., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Arasto, A., Tourunen, A., Kärki, J., and Nieminen, M. (2009). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. [verkkoaineisto]. Saatavilla PDF: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). Adoption of the Paris Agreement—Proposal by the President. Paris, France.

Vázquez, F.V., Koponen, J., Ruuskanen, V., Bajamundi, C., Kosonen, A., Simell, P., Ahola, J., Frilund, C., Elfving, J., Reinikainen, M., Heikkinen, N., Kauppinen, J., and Piermartini, P. (2018). Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air : SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 28 (June), 235–246. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.09.026>