

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO JA VARASTOINTI  
BIOPOHJAISESTA ENERGIANTUOTANNOSTA

Carbon capture and storage from bio-based energy  
production

Työn tarkastaja: Jouni Ritvanen

Työn ohjaaja: Jouni Ritvanen

Lappeenranta 13.04.2020

Mika Pulkkinen

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Mika Pulkinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Tutkijaopettaja Jouni Ritvanen

Kandidaatintyö 2020

34 sivua, 3 taulukkoa, 9 kuvaa, 3 yhtälöä

Hakusanat: Bio-CCS, BECCS, CCS, ilmastonmuutos, negatiiviset hiilidioksidipäästöt

Tämä tutkimus käsittelee hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia biopohjaisesta energiantuotannosta. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää ne erityiskysymykset, jotka pitää ottaa huomioon, kun hiilidioksidia otetaan talteen biopohjaisesta energiantuotannosta. Tutkimuksessa käytetään tieteellistä kirjallisuutta sekä luotettavaa tilastotietoa.

Hiilidioksidin talteenotolla tarkoitetaan hiilidioksidin ottamista talteen ilmakehästä tai ennen ilmakehään joutumista. Energiantuotannossa hiilidioksidi otetaan talteen savukaasuista liuottimilla, polttoainetta kaasuttamalla tai happipoltolla.

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi biopohjaisesta energiantuotannosta aiheuttaa negatiivisia hiilidioksidipäästöjä, joiden avulla voidaan vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Ilmastotavoitteeksi on asetettu maapallon keskilämpötilan nousun rajoittaminen 1,5 °C. Hiilidioksidin talteenotolla ja negatiivisilla päästöillä on tärkeä rooli tavoitteeseen pääsemiseksi.

Huomioitaviksi asioiksi hiilidioksidin talteenotolle biopohjaisesta energiantuotannosta nousi suuret kustannukset, biopolttoaineiden saatavuus sekä asema verrattuna talteenottoon fossiilipohjaisesta energiantuotannosta.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>2</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Negatiivisten päästöjen merkitys ilmastolle</b>	<b>6</b>
2.1 Hiilidioksidipäästöt .....	6
2.2 Ilmastotavoitteet .....	7
2.3 Hiilidioksidin talteenoton ja negatiivisten päästöjen tarve.....	8
<b>3 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi</b>	<b>10</b>
3.1 Hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa .....	10
3.2 Hiilidioksidin talteenotto polton jälkeen .....	12
3.3 Happipolttotekniikka .....	14
3.4 Hiilidioksidin varastointi .....	15
3.4.1 Geologiset muodostumat.....	16
<b>4 Bio-CCS tarkastelu</b>	<b>19</b>
4.1 Biomassa polttoaineena .....	19
4.1.1 Saatavuus .....	21
4.1.2 Kustannukset .....	22
4.2 Päästökauppa .....	24
4.3 Hiilidioksidin talteenoton kokonaiskustannukset.....	25
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>28</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>31</b>

## **SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

### **Yksiköt**

tCO <sub>2</sub>	Tonni hiilidioksidia (1000 kg)
GtCO <sub>2</sub>	Gigatonni hiilidioksidia (10 <sup>12</sup> kg)
MJ	Megajoule (10 <sup>6</sup> J)
PT	Petajoule (10 <sup>15</sup> J)
EJ	Eksajoule (10 <sup>18</sup> J)

### **Lyhenteet**

Bio-CCS	Bio-Energy with Carbon Capture and Storage
CCS	Carbon Capture and Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
EOR	Enhanced Oil Recovery
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane recovery
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
NET	Negative Emission Technologies
ppm	Parts per million

## 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on ehkä suurin uhka ihmiskunnalle tällä hetkellä, ja sitä aiheuttavat kasvaneet kasvihuonekaasupäästöt ilmakehässä. Maapallon keskilämpötila on noussut noin 1°C verrattuna esiteolliseen aikaan, ja siksi lähitulevaisuudessa on erittäin tärkeää minimoida keskilämpötilan nousu vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) on arvioinut, että ilmastoon liittyvät ongelmat ovat huomattavasti vakavampia, jos keskilämpötilan nousu ylittää 2 °C vuoteen 2100 mennessä. (Bongaarts 2019, 251-252)

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi eli CCS (Carbon Capture and Storage) on yksi tärkeimmistä keinoista vähentää ilman hiilidioksidipitoisuutta. Hiilidioksidin talteenotolle biopohjaisesta energiantuotannosta käytetään nimitystä Bio-CCS eli Bio-Energy with Carbon Capture and Storage. Tätä teknologiaa hyödyntämällä on mahdollista aikaansaada niin sanottuja negatiivisia hiilidioksidipäästöjä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella biopohjaiseen energiantuotantoon yhdistetyn hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin roolia muuttuvassa energiajärjestelmässä ja avata negatiivisten päästöjen merkitystä ilmastolle. Lisäksi selvitetään ne erityiskysymykset, mitä pitää ottaa huomioon, kun hiilidioksidi otetaan talteen biopohjaisesta energiantuotannosta. Vertailupohjana käytetään fossiilista CCS-teknologiaa. Tutkimuksessa käytetään hyödyksi tieteellisiä tutkimuksia ja alaan liittyvää kirjallisuutta.

Tutkimus koostuu kolmesta osasta. Ensimmäisessä osassa käydään läpi hiilidioksidipäästöjä ja ilmastotavoitteita. Lisäksi pohditaan hiilidioksidin talteenoton ja negatiivisten päästöjen merkitystä näihin tavoitteisiin pääsemiseksi. Toisessa osassa eritellään Bio-CCS-teknologiaa tarkemmin perehtymällä toimintaperiaatteeseen ja käytettyihin menetelmiin sekä niiden vaikutuksiin prosessissa. Osassa tarkastellaan myös hiilidioksidin varastointikeinoja. Kolmannessa osassa tarkastellaan asioita, jotka vaikuttavat Bio-CCS-teknologiaan, samalla vertaillen sitä fossiilisen CCS:n kanssa.

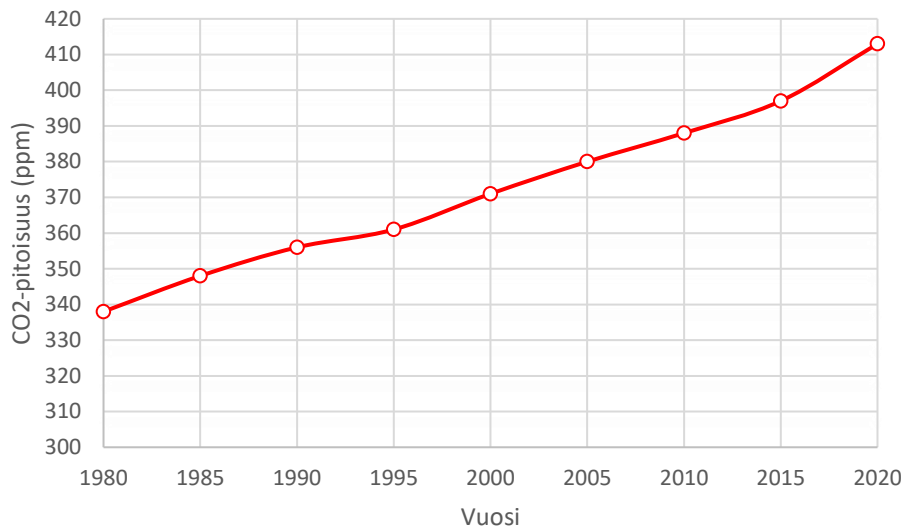
## 2 NEGATIIVISTEN PÄÄSTÖJEN MERKITYS ILMASTOLLE

NET (Negative Emission Technologies) eli negatiivisten päästöjen teknologiat ovat nousseet isoon rooliin vaativien ilmastotavoitteiden seurauksena. NET-teknologioilla pyritään vähentämään ilmakehässä olevia päästöjä niiden talteenotolla. Erilaisilla keinoilla pyritään varsinkin hiilidioksidin talteenottoon. Negatiivisia päästöjä tuottavia tapoja on useita. Metsitys ja uudelleenmetsitys ei varsinaisesti ole teknologia, mutta sillä voidaan sitoa hiilidioksidia hiilinieluihin. Ilmakehästä voidaan kemiallisesti ottaa talteen hiilidioksidia ja varastoida sitä. Biopohjaisen energian tuotantoon liittyvä hiilidioksidin talteenotto Bio-CCS tai BECCS, on kuitenkin lupaavin vaihtoehto negatiivisten päästöjen tuottamiseen. Siitä huolimatta nykypäivänä on olemassa vain kaksi isomman mittakaavan laitosta, jotka hyödyntävät tätä teknologiaa. Bio-CCS tarvitsee siis vielä paljon kehitystyötä, jotta sitä voidaan hyödyntää laajemmassa mittakaavassa. (Anderson 2016, 182-183)

### 2.1 Hiilidioksidipäästöt

Maapallon energiankulutus on kasvanut valtavasti viime vuosina. Energiankulutuksen kasvu oli vuonna 2018 melkein kaksinkertainen verrattuna vuoden 2010 energiankulutuksen kasvuun. Tämän aiheutti talouden voimakas kasvu, sekä suuremmat lämmitys- ja viilentämistarpeet. Kaikkien polttoaineiden kysyntä kasvoi kyseisenä aikana, mutta maakaasun kysyntä kasvoi eniten ja myös uusiutuvien energianlähteiden kysyntä kasvoi moninkertaisesti. Suurin aiheuttaja energiankulutuksen kasvulle oli kasvanut sähköntarve. Kasvaneen energiankulutuksen seurauksena hiilidioksidipäästöt kasvoivat vuonna 2018 vuoteen 2017 verrattuna 1,7%. (IEA 2019)

Fossiilisten polttoaineiden, kuten öljyn, hiilen ja kaasun kasvanut käyttö 1700-luvulta lähtien, on johtanut merkittävään ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousuun. Vuoteen 2020 tultaessa ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on jo yli 410 ppm. Tämä huomataan kuvasta 1, jossa on esitetty ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu vuosina 1980-2020. (NOAA 2020)



**Kuva 1** Ilmakehän CO<sub>2</sub>-pitoisuus viime vuosikymmeninä. (NOAA 2020)

Vuonna 2018 hiilidioksidipäästöjen noususta kaksi kolmasosaa aiheutui energiantuotannosta. Pelkästään hiilen käyttö ylitti 10 Gt CO<sub>2</sub>, josta suurin osa Aasiassa. Päästöjen kasvusta 85 % tapahtui Kiinassa, Intiassa ja Yhdysvalloissa, kun taas Saksassa, Japanissa, Meksikossa, Ranskassa ja Iso-Britanniassa päästöt saatiin laskemaan. (IEA 2019)

Maailma tulee olemaan riippuvainen fossiilisista polttoaineista myös tulevaisuudessa. Kasvavaa sähköntarvetta ei voi korvata täysin uusiutuvilla energiamuodoilla. Maailman väestön arvioidaan lisääntyvän vuoteen 2050 mennessä 9 miljardiin. Tämän on puolestaan arvioitu kasvattavan energiankulutusta noin 50%. Hiilidioksidipäästöjä ja muita kasvihuonekaasuja ei voida vähentää pelkästään parantamalla energiatehokkuutta tai rakentamalla uutta uusiutuvaa energiantuotantoa. (Elizabeth 2017, 2-3)

## 2.2 Ilmastotavoitteet

Pariisin ilmastosopimus hyväksyttiin vuonna 2015 järjestetyssä YK:n ilmastokokouksessa. Sopimuksen pyrkimyksenä on pysäyttää ilmastonmuutos, ja se koskee vuoden 2020 jälkeistä aikaa. Suurimmaksi tavoitteeksi asetettiin maapallon keskilämpötilan nousun pitäminen alle 2 °C suhteessa esiteolliseen aikaan, mutta pyrkiminen rajoittaa nousu 1,5 °C vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi tavoitteena on saada

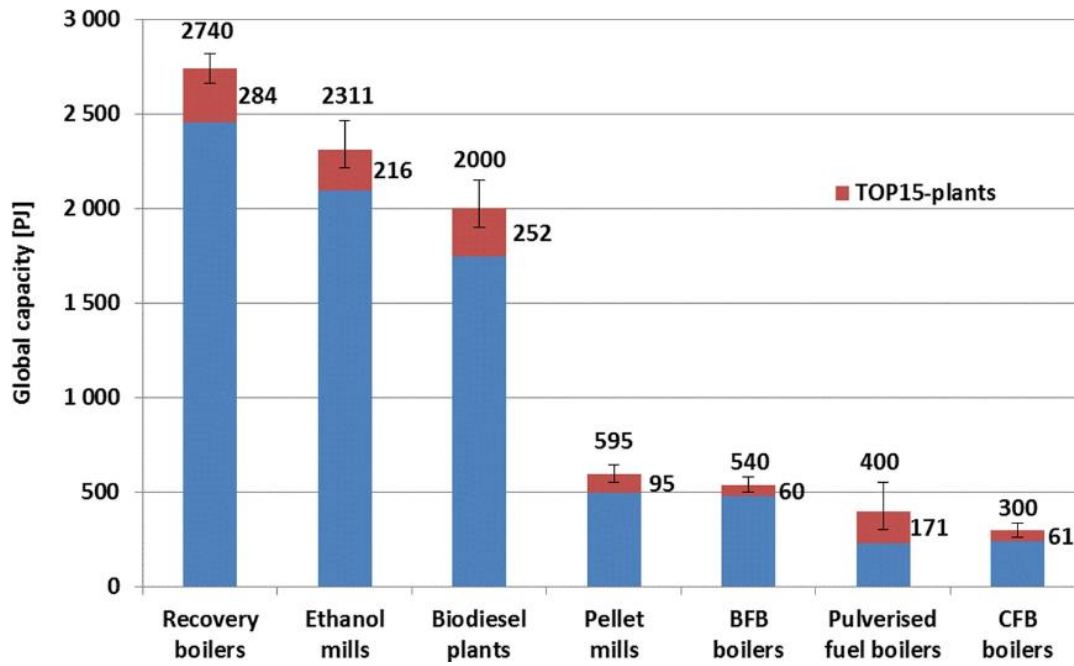
kasvihuonekaasupäästöt ja -nielut tasapainoon 2000-luvun loppuun mennessä. (Ympäristöministeriö 2018)

Pariisin ilmastopimuksen tavoitteisiin pääsemiseksi ja lämpötilan nousun estämiseksi yli 1,5 °C tarvitaan radikaaleja ratkaisuja. 2000-luvun ensimmäisellä puoliskolla on pyrittävä vähentämään merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä fossiilisten polttoaineiden korvaamisella uusiutuvilla vaihtoehdoilla. Negatiivisten päästöjen teknologioita on alettava hyödyntää enemmän ja niitä tulee kehittää jatkuvasti. Jos 2000-luvun loppupuoliskolla maailman energiajärjestelmä on lähes päästötön, voidaan keskittyä hiilidioksidipitoisuuden vähentämiseen ilmakehästä. Silloin negatiivisten päästöjen teknologiat ovat tärkeimmässä roolissa päästöjen sitomisessa. (Ympäristöministeriö 2018)

### **2.3 Hiilidioksidin talteenoton ja negatiivisten päästöjen tarve**

Hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla voidaan vähentää merkittävästi energiantuotannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Bio-CCS-teknologialla voidaan vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, eli luoda niin sanotusti negatiivisia hiilidioksidipäästöjä. CCS-teknologian käyttöönotto ei kuitenkaan pelkästään riitä vähentämään päästöjä 50-80 % vuoteen 2050 mennessä tai estämään lämpötilan nousun yli 1,5 °C. Tähän tarvittaisiin noin 1600 GtCO<sub>2</sub> negatiivisia päästöjä. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan hiilidioksidin talteenoton lisäksi kehitystä uusiutuvaan energiaan siirtymisessä ja energiatehokkuudessa. Rakentamalla lisää esimerkiksi biomassaa käyttäviä voimalaitoksia, saataisiin lisättyä uusiutuvan energian käyttöä sekä Bio-CCS-teknologialla negatiivisia hiilidioksidipäästöjä. Kuvassa 2 on esitetty maailmanlaajuinen biomassaa käyttävien voimalaitosten kapasiteetti. (Elizabeth 2017, 4-5)





**Kuva 2** Biomassaa käyttävien laitosten kapasiteetti petajouleina (PJ) maailmanlaajuisesti. (Kuparinen et. al. 2019, 1214)

Ensimmäistä kertaa vuosikymmeneen, vuonna 2018 nähtiin suuri panostus hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kehittämiseksi. Vuoden loppuun mennessä erilaisia projekteja tai muita hankkeita oli käynnissä jopa 43 kappaletta. (IEA 2019)

### 3 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO JA VARASTOINTI

Hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin kuuluu neljä vaihetta. Ensimmäiseksi hiilidioksidi otetaan talteen erilaisilla tekniikoilla. Sitten hiilidioksidi puristetaan tiiviiksi ja kuljetetaan sopivaan paikkaan. Siellä hiilidioksidi pumpataan pitkäaikaiseen varastointiin maaperän geologisiin säilöihin. Noin 90% päästöistä saadaan otettua talteen varastointia varten. Hiilidioksidin kuljettaminen ei ole uusi keksintö, vaan se on ollut olemassa jo vuosikymmeniä. (Elizabeth 2017, 8)

Hiilidioksidi muodostuu voimalaitoksissa pääasiassa polttoaineen palamisen aikana. Tällöin hiiliatomi yhdistyy happimolekyylin kanssa. Reaktio on



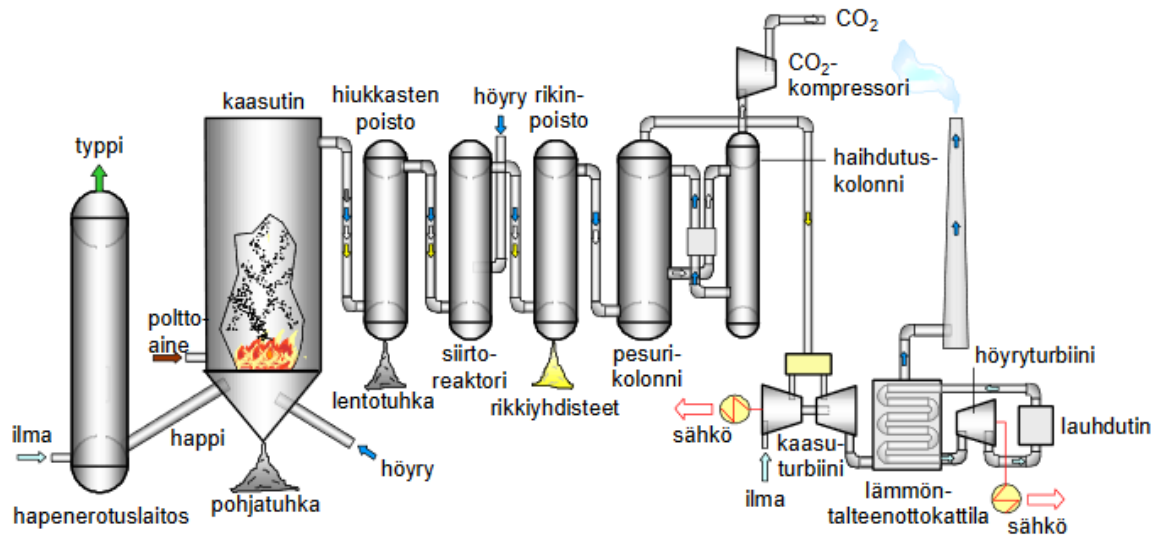
Hiilidioksidin talteenotto voidaan suorittaa kolmella eri tapaa: Pre-combustion, eli hiilidioksidi otetaan talteen ennen polttamista; oxy-fuel, eli happipolttotekniikalla; ja post-combustion, eli hiilidioksidi otetaan talteen polton jälkeen. Vielä ei olla kyetty osoittamaan, että yksikään näistä tavoista olisi toistaan parempi hinnan tai suorituskyvyn perusteella, mutta jokaisella on omat vahvuutensa sekä heikkoutensa. (Kuparinen 2019, 1220)

Hiilidioksidin talteenotto voimalaitoksessa tarvitsee tietyn määrän energiaa toimiakseen. Osa voimalaitoksen tuottamasta sähkötehosta menee talteenottolaitteiston toimintaan. Tästä aiheutuva hyötysuhteen aleneminen on yksi suurimmista ongelmista hiilidioksidin talteenotossa.

#### 3.1 Hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa

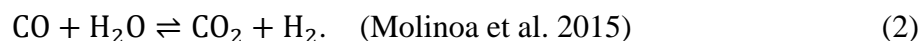
Ennen polttoa tapahtuva hiilidioksidin talteenotto vaatii sen, että biomassa kaasutetaan. Polttoaineen kaasutuksella tarkoitetaan prosessia, jossa kiinteä biomassa muutetaan polttokaasuseokseksi. Kaasuseoksen pääkomponentteja ovat hiilidioksidi, hiilimonoksidi ja vety. Saatu kaasuseos hyödynnetään kuvassa 3 esitettyssä IGCC-voimalaitoksessa (Integrated Gasification Combined Cycle), joka hyödyntää kiinteää kaasutettua polttoainetta. (Teir et al. 2011, 15-16)

Kaikki voimalaitokset, jotka hyödyntävät ennen polttoa tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottoa, ovat kombivoimalaitoksia. IGCC-laitos eroaa normaalista kombivoimalaitoksesta sillä, että kiinteä polttoaine on kaasutettava, jotta sitä voidaan käyttää turbiinissa. Kombivoimalaitokset soveltuvat hyvin hiilidioksidin talteenottoon, koska niillä saavutetaan korkea hyötysuhde sekä rakennusaste, eli sähkön osuus kokonaisenergiasta. (Kousa 2009, 9-10)



Kuva 3 IGCC-voimalaitos (Teir et al. 2011, 16)

Aluksi polttoaine kuivataan ja jauhetaan pölyksi. Hienojakoinen pöly paineistetaan ja syötetään kaasuttimeen vähäisen hapen kanssa. Biomassan sisältämät suuret makromolekyylit hajoavat pienemmiksi ja saadaan hiiltynyttä biomassaa, tervaa, tuhkaa ja kaasuseos. Muodostunut tuhka poistetaan kaasuttimen alakautta ja hiiltynyttä biomassaa voidaan käyttää esimerkiksi lannoituksessa. Kaasuseoksesta poistetaan tuhkapartikkelit ja se jäähdytetään. Tämän jälkeen kaasuseoksesta erotellaan hiilidioksidi. Koska tuotekaasu koostuu lähes kokonaan vedystä ja hiilidioksidista, saadaan hiilidioksidi eroteltua reaktiolla:



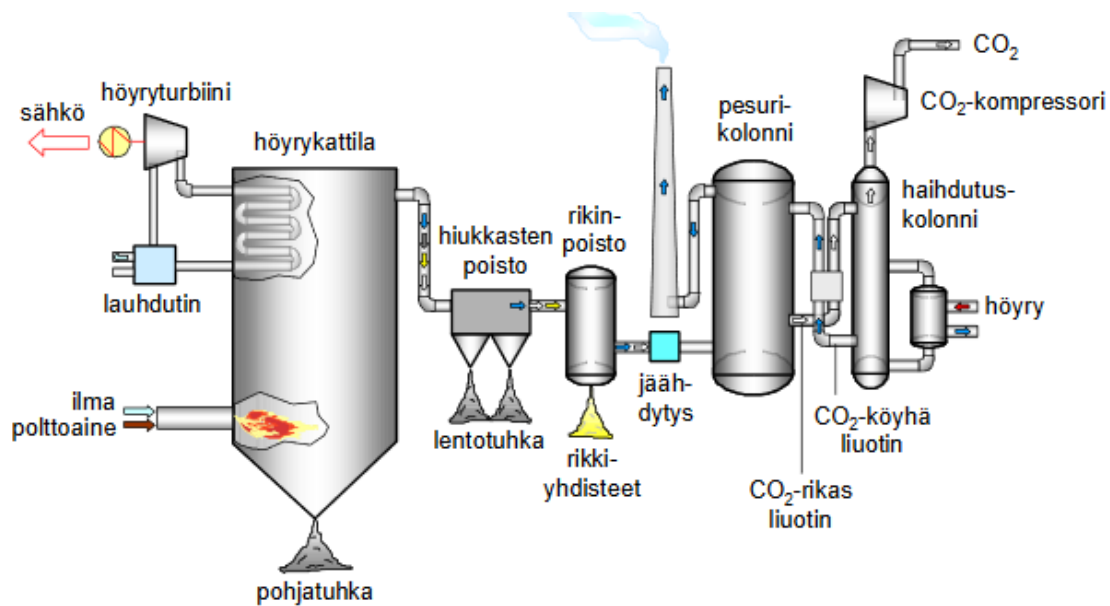
Hiilidioksidi erotellaan erilaisilla seosabsorptioon tai fysikaaliseen absorptioon perustuvilla liuottimilla. Kuivauksen jälkeen hiilidioksidi paineistetaan kompressorilla

varastointia varten. Hyvin vetyrikas tuotekaasu johdetaan kaasuturbiinille. (Teir et al. 2011, 16)

Ennen polttoa tapahtuvassa hiilidioksidin talteenotossa polttoaineen käsittelyvaiheet ovat kalliimpia ja monimutkaisempia, kuin polton jälkeen tapahtuvassa talteenotossa. Hiilidioksidin erottelu polttokaasusta on tosin edullisempaa. Tämä johtuu polttokaasun suuremmasta hiilidioksidipitoisuudesta (15-60 vol-%), sekä kaasun paineesta. Hiilidioksidin erottelua tuotekaasusta hyödynnetään myös vedyn valmistuksessa. Tekniikkaa voidaan lähinnä soveltaa vain uusiin voimalaitoksiin. IGCC-laitosten ongelmana ovat alhainen käytettävyys, suuret kustannukset ja vaativa tekniikka. (Teir et al. 2011, 16-17)

### **3.2 Hiilidioksidin talteenotto polton jälkeen**

Hiilidioksidin talteenotto polton jälkeen tapahtuu hiilidioksidin erottelulla savukaasuista. Polttoaineena oleva biomassa voi olla kiinteää tai kaasutettua, koska itse polttoprosessi kattilassa on täysin sama kuin normaalissakin voimalaitoksessa. Post-combustion-tekniikka vaikuttaa vasta polton jälkeisiin savukaasuihin. Koko prosessi hiilidioksidin talteenotolle polton jälkeen on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4** Hiilidioksidin talteenotto polton jälkeen (Teir et al. 2011, 14)

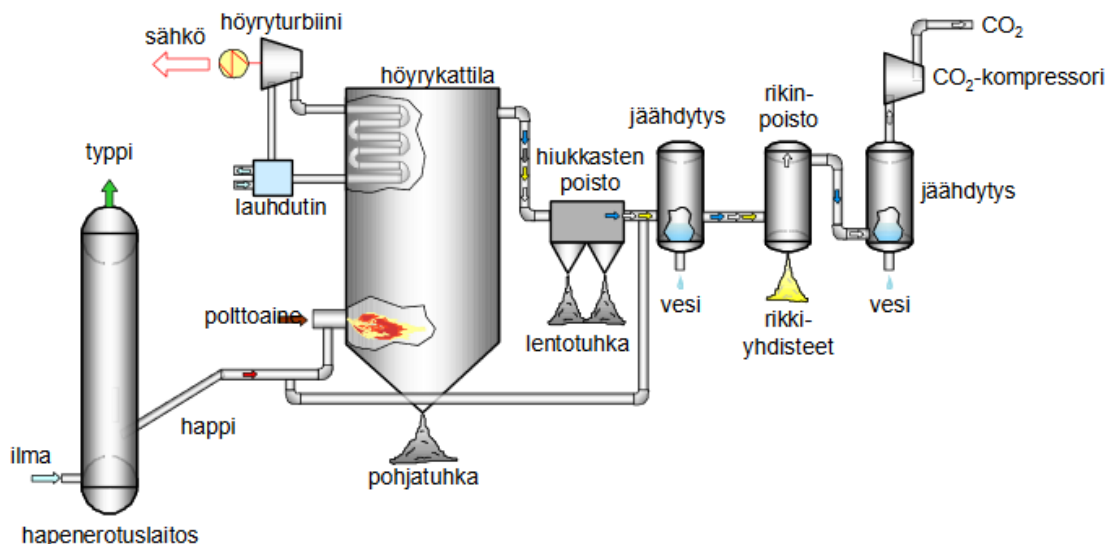
Prosessi alkaa biomassan tavallisella poltolla höyrykattilassa. Hiilidioksidi erotetaan matalapaineisesta savukaasuista, joissa hiilidioksidipitoisuus on noin 3-15 vol-%. Hiilidioksidin erotteluun käytetään kemiallisia liuottimia. Prosessiin sopivia liuottimia ovat muun muassa monoetanoliamiinit, metyylietanoliamiinit sekä dietanoliamiinit, jotka absorboivat hyvin hiilidioksidia. Ennen kuin aletaan erottelemään hiilidioksidia savukaasuista, on savukaasuista poistettava epäpuhtaudet. Savukaasu on jäähdytettävä ennen erottelua joko lämmönvaihtimella tai suoraan pesurikolonnissa. Tämän jälkeen liuotin absorboi hiilidioksidin pesurikolonnissa. Muodostunut neste vieään haihdutuskolonneiin, jossa liuottimen sisältämä hiilidioksidi erotetaan kaasumaiseksi joko painetta muuttamalla tai lämmittämällä. Ei-hiilidioksidipitoinen liuotin vieään takaisin pesurikolonneiin uudelleenkäyttöä varten. Liuotinta joudutaan tavallisesti vähän vaihtamaan joka kierrolla. (Teir et al. 2011, 13-14)

Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista polton jälkeen soveltuu suurimpaan osaan jo olemassa oleviin biomassaa käyttäviin voimalaitoksiin. Vaatimuksia tämä talteenottomenetelmä aiheuttaa hiilidioksidin osapaineelle. Koska hiilidioksidin osapaine on tyypillisesti kaasussa melko alhainen, käytetään kemiallisia liuottimia. Fysikaalisia liuottimia käytetään osapaineen ollessa todella korkea, eli yli 10 bar. Kemiallisten

liottimien hiilidioksidin absorptiokyky on suurempi kuin fysikaalisilla liuottimilla. Haittana kemiallisilla liuottimilla on niiden vaatima suuri regenerointienergia. Siihen tarvitaan todella suuri lämpömäärä ja se huonontaa voimalaitoksen hyötysuhdetta. Hyötysuhteen pienenemistä voidaan minimoida integroimalla höyryprosessia erotusprosessiin. (Teir et al. 2011, 14-15)

### 3.3 Happipolttotekniikka

Hiilidioksidin erotus polttoaineesta happipolton avulla tapahtuu kierrätetyn savukaasun ja lähes puhtaan hapen seoksessa. Polttoilman tyyppi saadaan näin ollen pois savukaasuista. Savukaasun hiilidioksidipitoisuus on tällöin hyvin korkea, noin 80-95 vol-%. Hiilidioksidin erottaminen on helpompaa ja energiatehokkaampaa, kun sen pitoisuus savukaasussa on korkea. Koska polttoainetta poltetaan tulipesässä lähes puhtaan hapen kanssa, kohoavat palamislämpötilat suuremmiksi kuin ilmalla. Savukaasut kierrätetään uudestaan kattilaan, jotta lämpötilan nousua voidaan ehkäistä. (Teir et al. 2011, 17)



**Kuva 5** Happipolttotekniikkaa käyttävä voimalaitos (Teir et al. 2011, 18)

Happipolttota käyttävään laitokseen kuuluu kolme pääelementtiä, jotka on esitetty kuvassa 5. Happitehdas, itse voimalaitos ja hiilidioksidin käsittely-yksikkö. Savukaasut koostuvat suurella happipitoisuudella poltettaessa pääasiassa hiilidioksidista ja vesihöyrystä.

Polttoaineesta peräisin olevat savukaasut kuten SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O ja NO poistetaan vesihöyryn ja jäännöshapen tavoin hiilidioksidin käsittely-yksikössä. Hiilidioksidi lopulta kompressoidaan varastointia ja kuljettamista varten. Palamisreaktio, jossa vesihöyryä muodostuu, on



Happipolttotekniikan käyttö on kallista, koska happitehdas on kallis investointi. Hapen erottaminen ilmasta vaatii myös paljon energiaa. On arvioitu, että happitehdas ja hiilidioksidin käsittely-yksikkö vievät yhteensä noin 7-12 % laitoksen sähköntuotannon hyötysuhteesta. Biomassalla toimiva CHP-laitos toimii happipolttotekniikkaan paremmin kuin lauhdelaitos, koska hiilidioksidin erotusprosessissa syntyvä matala lämpö voidaan hyödyntää paremmin. Toinen ongelma on tuotantomäärät. Happitehtaiden hapentuottomäärät eivät vielä nykyään riitä isokokaisen voimalaitoksen toiminnan ylläpitämiseen. Happilaitosten käyttö taloudellisesti ei ole vielä kovin järkevää. (Mattila 2014, 19)

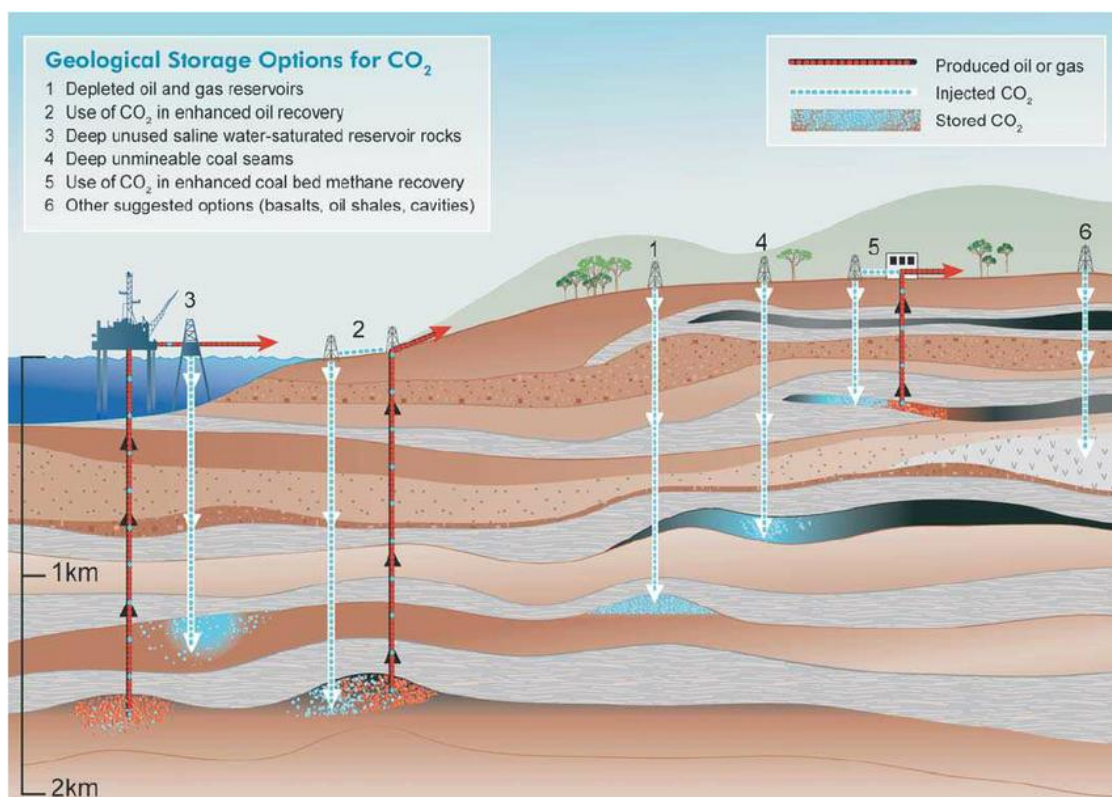
Happipolton tekniikasta on paljon tietoa ja happipolttotekniikka hiilidioksidin talteenottoon on yksinkertaisempaa kuin muilla tekniikoilla. Tekniikkaa voidaan käyttää uusissa laitoksissa, sekä joissain tapauksissa jo olemassa olevissa laitoksissa. Sähköntuotannon hyötysuhdetta voidaan parantaa tulevaisuudessa kehittämällä hapentuotantoprosesseista energiatehokkaampia ja vielä runsashappisempia. (Teir et al. 2009, 19)

### **3.4 Hiilidioksidin varastointi**

Talteen otettu ja kompressoitu hiilidioksidi varastoidaan CCS-direktiivin mukaisesti paikkaan, jossa se ei pääse vuotamaan ilmakehään. On olemassa muutamia varastointimahdollisuuksia, joiden kapasiteetti on riittävä. Näitä ovat geologiset muodostumat, kuten suolaiset pohjavesikerrostumat, öljy- ja kaasukentät, sedimenttikivikerrokset tai kivihiilikerrostumat. On olemassa myös muita varastointimahdollisuuksia, kuten varastointi mereen. (Teir et al. 2011, 41)

### 3.4.1 Geologiset muodostumat

GCS (Geological Carbon Storage) eli geologinen hiilidioksidin varastointi, on hyvin lupaava keino varastoida hiilidioksidia pitkäksi ajoiksi. Tekniikka hiilidioksidin varastointiin geologisiin muodostumiin on tuttua öljy- ja maakaasuteollisuudesta. Hiilidioksidin varastointi ja pumppaaminen öljy- tai kaasukenttiin helpottaa tuotantoa, mikä omalta osaltaan vähentää varastoinnin kustannuksia. Kuvassa 6 on esitettyinä vaihtoehdot hiilidioksidin geologiseen varastointiin. (Teir et al. 2011, 42-43)



**Kuva 6** Hiilidioksidin geologinen varastointi. 1) Öljy- ja maakaasukentät. 2) Tehostettu öljyntuotanto (EOR). 3) Suolaiset pohjavesikerrostumat. 4) Ei-hyödynnettävät hiiliesiintymät. 5) Tehostettu metaanin talteenotto (ECBM). 6) Muut vaihtoehdot, kuten onkalot. (Teir et al. 2011, 42)

Varastoitavan hiilidioksidin paine on todella korkea (>80 bar), joten hiilidioksidi käyttäytyy samalla tavalla kuin höyry. Se tunkeutuu helposti jokaiseen rakoön ja onkaloon. Hiilidioksidi pumpataan öljy- ja kaasukenttiin tai suolavesikerrostumiin vähintään 800 metrin syvyyteen. Tällöin monet kemialliset ja fysikaaliset tekijät pitävät



hiilidioksidin pumpatussa syvyydessä. Näitä tekijöitä on yhteensä neljä kappaletta. (Teir et al. 2011, 43)

Parhaimpana keinona on varastoidun hiilidioksidikerrostuman yläpuolella oleva kivi- tai sedimenttikerros. Se muodostaa läpäisemättömän kerroksen ja ikään kuin säiliön, joten hiilidioksidi ei pääse nousemaan pinnalle. Tätä kutsutaan rakenteelliseksi loukuksi. (Teir et al. 2011, 43-44)

Varastointiin injektoitu hiilidioksidi voi reagoida säiliön seinämien kanssa syrjäytettyään säiliössä olevan nesteen. Kun hiilidioksidin pumppaaminen loppuu, neste palaa takaisin huokosiin. Hiilidioksidi jää veden paineen ansiosta loukkuun. Tämän takia hiilidioksidin paine on oltava korkea, jotta se tunkeutuisi huokosiin. (Teir et al. 2011, 44-45)

Suuri osa hiilidioksidista tulee kuitenkin ajan myötä liukenemaan öljyyn tai veteen. Muodostunut tiheämpi neste uppoaa ja jää loukkuun varastointikerrostuman pohjalle. Viimeinen keino on mineraalinen loukku. Riippuen kivilajista, hiilidioksidi voi alkaa reagoida seinämien kanssa. Tässä todella hitaassa prosessissa muodostuu pysyviä mineraaleja, jotka estävät hiilidioksidin karkaamista ilmakehään. (Shabani et al. 2018, 58-59)

Varastoinnin näkökulmasta tärkeimpiä ominaisuuksia kivilajeille ovat huokoisuus ja läpäisevyys. Huokoisuus tarkoittaa kivilajin tyhjää huokoistilaa ja sitä, kuinka hyvin neste virtaa sen läpi. Huokoisuutta mitataan läpäisevyydellä. Huokoisen tilan muoto, niiden kytkeytyminen yhteen ja koko, ovat tärkeitä tekijöitä mitattaessa läpäisevyyttä. Jotta hiilidioksidia voidaan varastoida pysyvästi, täytyy geologisilla muodostumilla olla korkea huokoisuus. Seinämien ja sulkukerroksen huokoisuus täytyy puolestaan olla vähäinen. (IPCC 2005)

Öljy- ja maakaasuesiintymät ovat tärkein hiilidioksidin varastoinnin kohde. Öljy ja kaasu ovat ensinnäkin todella pysyviä maaperässä, eivätkä ne ole karanneet sieltä miljooniin vuosiin. Toisekseen öljy- ja maakaasuesiintymät ovat todella tarkoin tutkittu ja niiden rakenne on hyvin selvillä. On myös kehitetty tietokonemallinnuksia ennustamaan hiilidioksidin käyttäytymistä injektoitaessa esiintymiin. Öljyntuotanto myös hyötyy hiilidioksidin injektioimisesta esiintymiin. Tällä saavutetaan taloudellinen hyöty niin

öljyntuotannon kannalta kuin koko hiilidioksidin talteenotto prosessin kannalta. EOR (Enhanced oil recovery), eli tehostettua öljyntuotantoa hyödyntämällä voidaan tehostaa öljyntuotantoa jopa 7-23 %. (IPCC 2005; Seyyedi et al. 2018, 779)

## 4 BIO-CCS TARKASTELU

Kuten aikaisemmin todettu, Bio-CCS-teknologiassa on keskeisessä roolissa biopolttoaineet ja hiilidioksidin talteenotossa syntyvät negatiiviset päästöt. Tässä osiossa tarkastellaan biopolttoaineiden erilaisia ominaisuuksia, kuten saatavuutta, käyttömahdollisuuksia sekä kustannuksia. Selvitetään myös päästökaupan vaikutusta Bio-CCS-teknologiaan ja kaikki kustannukset, mitä teknologian käyttäminen tuo tullessaan. Vertailupohjana käytetään hiilidioksidin talteenottoa fossiilipohjaisesta energiantuotannosta.

### 4.1 Biomassa polttoaineena

Biopolttoaineet ja biomassa tarkoittavat eloperäistä ja fotosynteesiä käyttävää kasvimassaa. Biomassa koostuu hiilestä, hapesta ja vedystä. Näiden lisäksi biomassa voi sisältää tyypeä ja pieniä määriä erilaisia mineraaleja. Biomassa mielletään yleensä pelkästään uusiutuvaksi energiaksi. Esimerkiksi turve voidaan luokitella biopolttoaineeksi, vaikka se luokitellaan uusiutumattomaksi energianlähteeksi. Tässä tutkielmassa perehdytään vain uusiutuvaan energiaan.

Ehkä tunnetuin biomassaan luokiteltava polttoaine on metsäpolttoaine eli puu. Puusta tuotetaan puuhaketta ja erilaisia puupellettejä ja -brikettejä. Metsäbiomassaan kuuluu myös puunjalostusteollisuuden jäteliemet ja sivutuotteet, kuten sahanpuru ja puunkuori. Biomassaa on lisäksi selluntuotannossa muodostuva mustalipeä. On olemassa myös erilaisia kasviperäisiä polttoaineita, kuten viljakasveja, olkia sekä kasviöljyjä. Harvinaiset eläinperäiset polttoaineet luokitellaan myös biomassaan. Näitä ovat esimerkiksi eläinrasvat. (Alakangas et al. 2016, 54)

Biomassalla on muutamia ongelmia verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, kuten hankinta, kuljetus ja lainsäädännöt. Biomassaa käyttävät voimalaitokset ovat yleensä paljon pienitehoisempia kuin esimerkiksi kivihililaitokset. Hiilidioksidin talteenoton taloudellinen kannattavuus paranee voimalaitoksen tehon suurenemisen myötä, joten biomassaa käyttävien laitosten täytyisi olla nykyistä suurempia ollakseen kannattavia. Hiilidioksidin talteenottomenetelmistä happipoltto tarvitsee suuritehoisen voimalaitoksen ollakseen kannattava. Koska voimalaitosten täytyy olla suurempitehoisia, ongelmia voi

esiintyä polttoaineen saatavuudessa. Poltettavaa biomassaa täytyy kuljettaa paljon ja sitä pitää olla paljon saatavilla. Suurta polttoaineen tarvetta ei helpota ainakaan biomassan lämpöarvo. Se on paljon pienempi kuin fossiilisilla polttoaineilla. Tämä voidaan todeta taulukosta 1. Biomassassa on lisäksi suurempi määrä haihtuvia yhdisteitä ja tuhkaa, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia suunnittelussa ja rakentamisessa. Biomassa on tyypillisesti fossiilisia polttoaineita kosteampaa. (Alakangas et al. 2016, 54-55)

**Taulukko 1** Eri polttoaineiden lämpöarvoja (Alakangas et al. 2016, 257-260)

Polttoaine	Lämpöarvo			
	MJ/kg	MJ/m <sup>3</sup>	kWh/kg	kWh/m <sup>3</sup>
<b>Maakaasu (metaani)</b>	50	36	14	10
<b>Biokaasu</b>	19	22	5	6
<b>Puupelletti</b>	17	11000	4,7	3000
<b>Hake</b>	7,6	3000	2,1	844
<b>Jyrsinturve</b>	8	2664	2,2	730
<b>Palaturve</b>	12,9	4700	3,6	1300
<b>Kivihili (ruskahiili)</b>	28,5	25650	7,9	7100
<b>Kivihili (antrasiitti)</b>	35,3	45890	9,8	12740
<b>Kevyt PÖ</b>	42,7	42700	11,9	11900
<b>Raskas PÖ</b>	40,6	40600	11,3	11300

Biomassa voi olla laadultaan melko huonoa. Puuhake ja metsänkorjuujäte voivat olla hyvin sekavaa massaa polttoainepartikkelien koon ja kosteuden puolesta. Nykyään leijupetikattilat alkavat olla yleisiä ja niissä on alettu käyttämään laadultaan huonompaa polttoainetta. Näiden leijupetikattiloiden yhteydessä voidaan soveltaa polton jälkeistä hiilidioksidin talteenottoa. Happipolttotekniikkaan todella huonolaatuinen polttoaine ei sovellu, joten se rajoittaa osaltaan käytettävän polttoaineen valintaa. (Mattila 2014, 7)

#### 4.1.1 Saatavuus

Biomassan suurimmat lähteet ovat metsät. Metsät ja puut olivat vuonna 2012 85% kaikesta biomassan käytöstä (Ralph 2014). Metsät sitovat itseensä todella paljon energiaa maailmanlaajuisesti. Biomassan saatavuutta energiamäärinä on eroteltu taulukossa 2. Keskeisimpiä metsästä saatavia biopolttoaineita ovat metsähake ja puupelletit. Pellettien tuotantolaitoksia on maailmalla useita. Itsestään jo Suomessa pellettejä tuotetaan yli kymmenessä tuotantolaitoksessa. Arvioiden mukaan pellettituotantolaitoksien kapasiteetista olisi tällä hetkellä käytössä vain noin 65-75%, eli lisäämisen varaa on tulevaisuudessa. Metsähake ei ole niin tiiviissä muodossa kuin pelletit, joten sitä tarvitaan enemmän saman energiamäärän tuottamiseen. Metsähakkeen riittävyys ei kuitenkaan ole ongelma, koska esimerkiksi Suomessa metsät kasvavat vuosittain enemmän kuin niitä käytetään. Biopolttoaineiden saatavuudella on suuri potentiaali tulevaisuudessa verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Metsää kasvaa koko ajan lisää, mutta fossiilisten polttoaineiden varannot eivät uusiudu. On arvioitu, että kivihiilivarantoja olisi jäljellä noin kahden sadan vuoden tarpeisiin. Sekä öljyä että maakaasua riittäisi molempia vielä noin 50 vuotta. (Happonen 2013; Ritchie et. al. 2020)

**Taulukko 2** Biomassan maailmanlaajuinen saatavuus vuosina 2012 ja 2035. Arvot eksajouleina (EJ).  
(World bioenergy 2016)

<b>Pääsektori</b>	<b>Sivusektori</b>	<b>2012</b>	<b>2035 - väli</b>	<b>2035 - keskiarvo</b>
Maatalous	Päätuotteet - sadot	3,5	26-34	30
	Sivutuotteet - lanta	2,1	30-38	34
	<b>Koko maatalous</b>	<b>5,6</b>	<b>56-72</b>	<b>64</b>
Metsät		48,9	72-84	78
Orgaaninen jäte		1,7	6-10	8
<b>Yhteensä</b>		<b>56,2</b>	<b>134-166</b>	<b>150</b>

Polttoaineen kuljetus on myös isossa osassa ajatellen sen saatavuutta. Polttoainevarantojen sijainti määrittää kuljetuksen tarpeen ja kuinka kallista se on. Biomassaa on paljon saatavilla Suomessa ja muutenkin pohjoismaissa, joten kuljetusmatkat eivät ole kovin pitkiä. Suomessa sitä vastoin ei ole saatavilla ollenkaan omaa kivihiiltä, vaan se on tuotava ulkomailta (Happonen 2013). Sen sijaan Saksa ja Kiina omaavat suuret kivihiilivarannot, ja heillä biomassan kuljetus vaatii enemmän työtä. Polttoaineen kuljetuksella tulee olemaan iso rooli hiilidioksidipäästöihin ja kustannuksiin, kun hiilidioksidipäästöjä vähennetään ja siirrytään enemmän biomassan käyttöön.

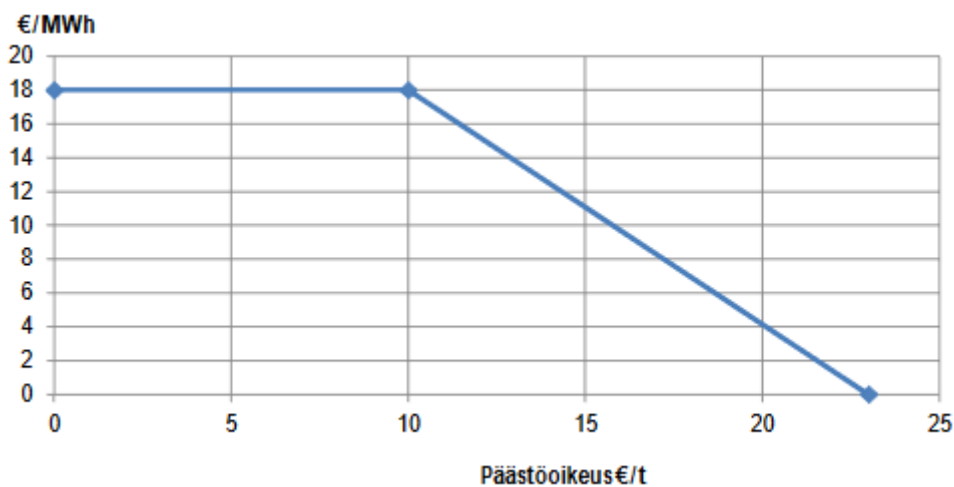
#### 4.1.2 Kustannukset

Hiilidioksidin talteenoton kannattavuuteen vaikuttaa vahvasti voimalaitoksissa käytetyn polttoaineen kustannukset. Polttoaineen käytön kustannukset muodostuvat voimalaitoksissa seuraavasti:

- polttoaineen investointikustannukset
- käytön kiinteät kustannukset
- käytön muuttuvat kustannukset
- polttoaineen hinta (fossiilinen tai biomassa)
- lämmöntuotannon verotus (biomassa veroton)
- CO<sub>2</sub>-päästöoikeudet
- sähkön tuotantotuki.

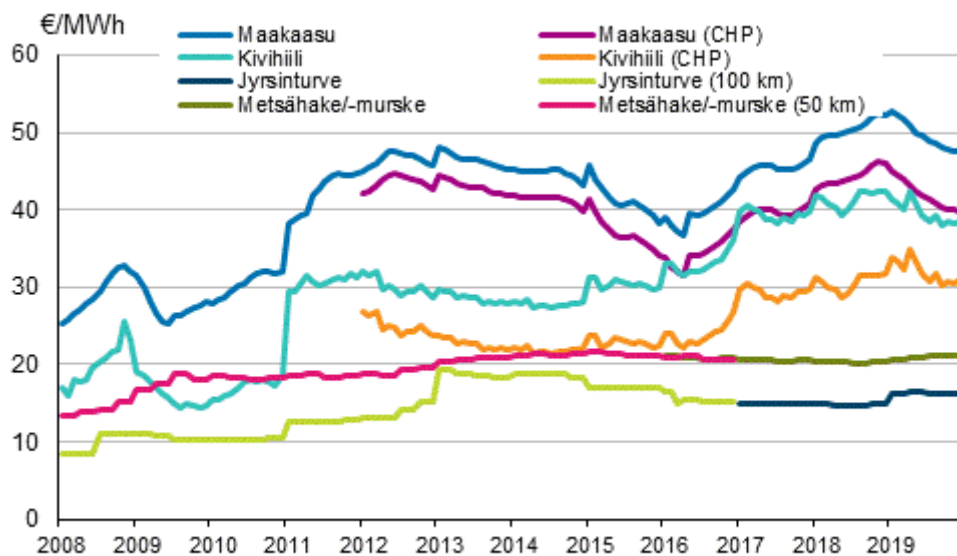
Biomassan käytön kustannuksia verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin lisää muun muassa käyttö- ja kunnossapitokustannukset, kattilan lämmönsiirtopintojen likaantuminen ja tuhkan hävitys tai jälkikäyttö. Biomassan tuhkapitoisuus voi olla yli 10 %, jolloin tuhka toimitetaan kaatopaikalle. Tästä aiheutuu lisäkustannuksia kuljetuksen myötä. (Flyktman et al. 2011, 43)

Biomassaa käyttäville voimalaitoksille maksetaan sähkön tuotantotukea. Sähkön tuotantotuki riippuu päästöoikeuden hinnasta. Tämä antaa biomassalle taloudellista etua fossiilisiin polttoaineisiin nähden. Kuvassa 7 on kuvattu sähköntuotannon muuttuvaa tukea metsähakkeelle. (Flyktman et al. 2011, 48)



**Kuva 7** Tuotantotuki metsähakkeella tuotetulle sähkölle vuonna 2011. (Flyktman et. al. 2011, 48)

Fossiilisten polttoaineiden ja biomassan hintaan vaikuttaa suuresti muuttunut verotus. Kivihiilen verotus kasvaa lähes vuosi vuodelta, kun taas biomassalle annetaan vuosi vuodelta enemmän tukia. Kuvasta 8 huomataan, että metsähake ja kivihiili CHP-tuotannossa ovat olleet lähes samanhintaisia vuosina 2013-2015. Kivihiilellä tuotettu sähkö on tällöin ollut kannattavampaa lämpöarvoerojen takia, vaikka metsähake on myös saanut tuotantotukea (Flyktman et al. 2011, 49). Nykypäivään tultaessa hintaero on kasvanut suuremmaksi johtuen kivihiilen verotuksesta. Biomassa alkaa siis olla kannattavampaa tulevaisuudessa kuin esimerkiksi kivihiili.



**Kuva 8** Voimalaitoksissa käytettävien polttoaineiden hintakehitys. (Tilastokeskus 2020)

## 4.2 Päästökauppa

Euroopan unionin harjoittama päästökauppa aloitettiin vuonna 2005. Päästökauppadirektiivin mukaan jokainen EU:n jäsenvaltio saa jakaa ilmaiseksi tietyn määrän kasvihuonekaasujen päästöoikeuksia teollisuudelle. Jos nämä kansallisen jakosuunnitelman mukaiset kasvihuonekaasujen päästöoikeudet eivät riitä jollekin toimijalle, täytyy toimijan ostaa itse päästöoikeuksia. EU:n päästökauppajärjestelmä on maailman suurin ja kattaa noin 45% hiilidioksidipäästöistä. (Teir et al. 2011, 89)

Päästökaupan tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. EU:n tavoite oli vähentää päästöjä 20% vuodesta 1990 vuoteen 2020 mennessä. Myös uusiutuvalla energialla tuotetun energian osuus kokonaisenergiasta haluttiin nousevan 20%. Tavoitteisiin päästään vähentämällä päästöoikeuksien määrää. (Flyktman et. al. 2011, 16)

Päästöoikeuden hinta on nykyään noin 25 €/tCO<sub>2</sub> (Gasum 2019). Tämä ilmenee kuvasta 9. Päästöoikeuden hinta on laskenut vuodesta 2005 noin 5 €/tCO<sub>2</sub>, mutta hinta on kuitenkin tällä hetkellä nousemassa. Bio-CCS:n kannalta tämä on hyvä asia, koska biomassaa käyttävien voimalaitosten ei tarvitse ostaa päästöoikeuksia. Fossiilisten polttoaineiden käyttäminen tulee tulevaisuudessa koko ajan kalliimmaksi. Bio-CCS-



laitoksen oltava kannattava, tulee päästöoikeuden hinnan olla kuitenkin noin 70 €/tCO<sub>2</sub>. Tulevaisuudessa päästöoikeuden hinta voisi vaikuttaa suoraan hiilidioksidipäästöjen määrään olettaen, että kasvava päästöoikeuden hinta kasvattaisi Bio-CCS:n käyttöä ja näin ollen vähentäisi hiilidioksidipäästöjä. (Teir et al. 2011, 89-90)



**Kuva 9** Päästöoikeuden hintakehitys. Vaaka-akselilla vuosi, pystyakselilla hinta [€/tCO<sub>2</sub>] (Markets Insider 2020)

EU:n mukaan toiminnanharjoittajan on mahdollista vähentää laitoksen hiilidioksidipäästöistä kaikki fossiilisista polttoaineista peräisin oleva hiilidioksidimäärä, joka otetaan talteen. Biomassaa käyttävissä laitoksissa ei siis voida hyödyntää samaa periaatetta. Bio-CCS-laitokset eivät voi hyötyä päästökaupasta negatiivisten päästöjen myötä, koska vain fossiilisista polttoaineista peräisin olevan hiilidioksidin massa voidaan vähentää päästöissä. Ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi ja Bio-CCS:n lisäämiseksi olisi suotuisaa, että negatiiviset päästötkin huomioitaisiin päästökaupassa. (Teir et. al. 2011, 90)

### 4.3 Hiilidioksidin talteenoton kokonaiskustannukset

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kustannukset vaihtelevat todella paljon. Kustannukset riippuvat monista tekijöistä, kuten toimintayksikön sijainnista sekä ympäristöstä. Investointikustannukset ovat myös nousseet viime aikoina paljon johtuen työvoima- ja materiaalikustannusten noususta. Suurin kustannustekijä prosentuaalisesti

on itse hiilidioksidin talteenotto, kun taas kuljetus ja varastointi vaikuttavat kustannuksiin vähäisesti. Kun vertaillaan Bio-CCS- ja CCS-teknologiaa keskenään, suurimmat erot johtuvat polttoainekustannuksista, tuotetun energian määrästä ja päästöistä. Hiilidioksidin talteenottomenetelmät sekä kuljetus voidaan jättää huomioimatta vertailussa, koska samat tekniikat pätevät molempiin laitoksiin. (Teir et al. 2011, 63)

Varsinainen hiilidioksidin talteenotto on kallein vaihe koko CCS-ketjussa (Teir et al. 2011, 64). Talteenoton menetelmiin tarvitaan paljon energiaa, mikä suurentaa laitoksen omakäyttötehoa. Kustannusarvioita on monia, koska tarkkoja kustannusarvioita ei tunneta. Hiilidioksidin talteenottoa hyödyntäviä laitoksia on vielä todella vähän kaupallisessa käytössä. Tästä huolimatta taulukossa 3 on esitetty kustannusarviot eri talteenottomenetelmille niin Bio-CCS:n kuin fossiilisia polttoaineita hyödyntävän CCS:n osalta.

**Taulukko 3** Kustannusarviot eri Bio-CCS- ja CCS- menetelmillä talteenotettua hiilidioksiditonnia kohden. (Budinis et. al. 2018; Fuss et. al. 2018)

Tuotantomuoto	Kustannusarvio [\$/tCO <sub>2</sub> ]
<b>Bio-CCS</b>	<b>35-400</b>
Biomassan poltto	87-287
Biomassan poltto happipolttotekniikalla	15-78
Biomassan kaasutus	5-35
Mustalipeän poltto selluntuotannossa	25-75
Mustalipeän kaasutus selluntuotannossa	25-60
<b>CCS</b>	<b>20-115</b>
Kivihiilen poltto	40-60
Maakaasun poltto	70-90

Tämänhetkisistä biomassaa käyttävistä voimalaitoksista suurin osa on hyvin pieniä, joten hiilidioksidin talteenoton soveltaminen niihin olisi kalliimpaa kuin fossiilisia polttoaineita käyttäville voimalaitoksille. Tämä huomataan taulukosta 3, josta näkyy suuri ero Bio-CCS:n ja fossiilisen CCS:n välillä. Bio-CCS-laitosten hyötysuhde myös painuu paljon pienemmäksi kuin fossiilisia polttoaineita käyttävän laitoksen.

## 5 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ne asiat, jotka vaikuttavat Bio-CCS:n käyttöönottoon käyttäen apuna tieteellistä kirjallisuutta ja tutkimusta. Tavoitetta pohjustettiin tarkastelemalla hiilidioksidipäästöjä ja ilmastotavoitteita. Lisäksi vertailtiin biopohjaisen ja fossiilisen energiantuotannon eroja hiilidioksidin talteenoton kannalta.

Ilmastonmuutoksen vastaisessa taistelussa negatiivisten päästöjen merkitys on todella suuri. Negatiivisten päästöjen tuottamiseksi teknologioita on monia, mutta lupaavin on ehdottomasti Bio-CCS. Sitä on kehitelty paljon ja sen kehitys tulee jatkumaan myös tulevaisuudessa. Bio-CCS ei ole vielä valmis kaupallistumiseen, mutta se on nuori konsepti, jolla on potentiaali menestyä.

Erityiskysymyksinä Bio-CCS-teknologialle nousi sen kustannukset, polttoaineen saatavuus ja asema verrattuna fossiiliseen CCS-teknologiaan. Kuinka kustannuksia saataisiin vähennettyä? Miten polttoaineen saatavuus turvattaisiin, kun rakennetaan suuria voimalaitoksia. Onko mahdollista parantaa biopohjaisen hiilidioksidin talteenoton asemaa esimerkiksi poliittisilla päätöksillä? Bio-CCS tarvitsee monen tahon panostusta, jotta se voitaisiin ottaa käyttöön laajalla mittakaavalla hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi.

Haasteita Bio-CCS:lle tuo sen huono kannattavuus, biomassan suuri tarve ja lisääntyvät polttoainekuljetukset. Voimalaitosten kokoa on saatava suuremmaksi ja kehitettävä tapoja, joilla hyötysuhdetta saataisiin parannettua. Laitokset olisi sijoitettava paikalle, jossa polttoaineen saatavuus ei aiheuta ongelmia. Bio-CCS-laitokset ovat vielä nykyään huomattavasti kalliimpia kuin CCS-laitokset johtuen polttoaineesta. Bio-CCS tarvitsee taloudellista apua päästäkseen alkuun kaupallisessa toiminnassa. Päästökauppajärjestelmä ei nykyiseltään huomioi negatiivisia päästöjä, mikä olisi tärkeää Bio-CCS-laitokselle.

Sekä biomassaa että fossiilisia polttoaineita käytävillä laitoksilla, talteenotto olisi helpommin toteutettavissa. Talteenotto prosessi voitaisiin lisätä sekapolttainetta polttavan laitoksen yhteyteen, jolloin hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää hieman halvemmalla tavalla kuin suoraan Bio-CCS:llä.

Teoriassa hiilidioksidin talteenotolla biopohjaisesta energiantuotannosta saavutettaisiin ilmastotavoitteet, eli lämpötilan nousun pysäyttäminen 1,5°C:n vuoteen 2050 mennessä. Tämä vaatisi kaikkien biopohjaisten energia- ja tuotantolaitosten valjastamista Bio-CCS-tekniikalla. Tavoite on kuitenkin aika epärealistinen, jos hiilidioksidin talteenottoon luotetaan liikaa. Bio-CCS tarvitsee vielä aikaa kehittyäkseen ja löytääkseen paikan kaupallisessa energiantuotannossa. Vaikka Bio-CCS on todella tärkeä ilmastolle negatiivisten päästöjen myötä, on sen myös oltava taloudellisesti kannattavaa toimintaa.



## LÄHDELUETTELO

Alakangas, E., Hurskainen, M., Lahtikainen-Luntama, J., Korhonen, J. (2016). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, s. 54-280. ISBN 978-951-38-8418-5

Anderson, K., Peters, G. (2016). The trouble with negative emissions, s. 182-183. doi: 10.1126/science.aah4567

Budinis, S., Samuel, K., Mac, N., Brandon, N., Hawkes, A. (2018). An assessment of CCS costs, barriers and potential, s.60-70. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003>

Bongaarts, J. (2019). Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Global Warming of 1.5°C Switzerland: IPCC, 2018. Population and Development Review, 45(1), s. 251-252. <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1111/padr.12234>

Elizabeth A. Kocs (2017). The global carbon nation: Status of CO2 capture, storage and utilization. EPJ Web Conf. Volume 148. s. 2-16. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714800002>

Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S., Sipilä, K. (2011). Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa, VTT, s.16-48. ISSN 1455-0865

Fuss, S., Lamb, W., Callaghan, M. et al. (2018). Negative emissions-Part 2: Costs, potentials and side effects, s.3-15. doi: 10.1088/1748-9326/aabf9f

Gasum (2019). Päästökaupan viikkokatsaus 25 [verkkajulkaisu]. [https://www.gasum.com/globalassets/energiamarkkinaraportit/2019/paastokaupan\\_viikkoraportti\\_2019\\_25\\_28654.pdf](https://www.gasum.com/globalassets/energiamarkkinaraportit/2019/paastokaupan_viikkoraportti_2019_25_28654.pdf)

Happonen, K. (2013). Riittääkö biomassaa energiantuotantoon? Helen [verkkajulkaisu]. <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2013/riittaako-biomassaa-energiantuotantoon>

IEA (2019). Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report 2019, IEA, Paris [verkkojulkaisu].  
<https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>

IPCC, Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H.C., Loos, M. & Meyer, L.A. (eds.). (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, UK. s. 63-374. ISBN-13 978-0-521-86643-9

Kousa, M. & Lappeenrannan teknillinen yliopisto (2009). Ennen polttoa tapahtuva hiilidioksidin talteenotto. s.9-10 [opinnäytetyö]. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/46539>

Kuparinen, K., Vakkilainen, E. & Tynjälä, T. (2019). Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 24(7), s. 1213-1230. doi: 10.1007/s11027-018-9833-9

Markets Insider (2020). CO<sub>2</sub> european emission allowances [verkkojulkaisu].  
<https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-european-emission-allowances>

Mattila, V. & Lappeenrannan teknillinen yliopisto, T. t. (2014). Biomassan happipoltto leijukattilassa. s.7-19 [opinnäytetyö]. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/96566>

Molino, A., Chianese, S., Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. s. 3. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>

NOAA Climate.gov (2020). Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide [verkkojulkaisu].  
<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

Ralph, S. (2014). Bioenergy options for a cleaner environment: In developed and developing countries. Elsevier, UK. s.1-198. ISBN: 9780080443515

Ritchie H., Roser M. (2020). Fossil Fuels. Our World in Data [verkkojulkaisu].  
<https://ourworldindata.org/fossil-fuels>



Seyyedi, M., Sohrabi, M., Sisson, A. & Ireland, S. (2018). Quantification of oil recovery efficiency, CO<sub>2</sub> storage potential, and fluid-rock interactions by CWI in heterogeneous sandstone oil reservoirs. *Journal of Molecular Liquids*, 249, s. 779-788. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.070>

Shabani, B. & Vilcáez, J. (2018). A fast and robust TOUGH2 module to simulate geological CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers. *Computers and Geosciences*, 111, s. 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.012>

Tilastokeskus (2019). Energian hinnat. 4. vuosineljännes 2019, Liitekuvio 3. Voimalaitospolttoaineiden hinnat lämmöntuotannossa. ISSN 1799-7984

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A., Aatos, S. (2009). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS), teknologiakatsaus. s.9. ISSN 1235-0605

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A., Aatos, S. (2011a). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS), teknologiakatsaus. VTT WORKING PAPERS 161. s.12-90. ISSN 1459-7683

Ympäristöministeriö (2018). Pariisin ilmastopimus [verkkajulkaisu]. [https://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset\\_ilmastoneuvottelut/Pariisin\\_ilmastopimus](https://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastopimus)

