

Camilla Cleve

HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO JA HYÖDYNTÄMINEN MM KOTKAMILLS OY:N KOTKAN TEHTAILLA

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Energiatekniikan koulutus

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Camilla Cleve
Työn nimi	Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen MM Kotkamills Oy:n Kotkan Tehtailla
Toimeksiantaja	MM Kotkamills Oy
Vuosi	2024
Sivut	51 sivua, liitteitä 1 sivu
Työn ohjaaja(t)	Anne Gango Xamk; Harri Mielonen MM Kotkamills Oy

TIIVISTELMÄ

Ilmastonmuutoksesta on puhuttu jo pitkään ja sitä on yritetty hillitä tiedossa olevilla keinoilla, eli lähinnä pienentämällä ilmakehään pääsevän hiilidioksidin määrää. Tekniikan kehittymisen myötä keskusteluun on noussut keinot ottaa hiilidioksidi talteen jo ennen sen pääsyä ilmakehään. Suomi on sitoutunut EU:n ilmastotavoitteisiin. Teollisuus on Suomessa, kuten muissakin Euroopan maissa, suurin hiilidioksidipäästöjen lähde. Kehitystä ohjataan nyt suuntaan, jossa hiilidioksidi otettaisiin talteen suoraan savupiipusta ja joko varastoitaisiin tai hyödynnettäisiin tavalla, jossa se poistuu ilmakehästä lähes pysyvästi.

MM Kotkamills on yritys, joka ajattelee aidosti ympäristöä. Vaikka merkittävä osuus Kotkamillsin hiilidioksidipäästöistä on biopohjaista, on yrityksellä tahtotila selvittää mahdollisuuksiaan hiilidioksidin talteenotossa. Tämän työn tarkoituksena oli tuottaa teknis-taloudellinen selvitys juuri Kotkamillsin tarpeisiin soveltuvasta tekniikasta ottaa hiilidioksidia talteen. Tekniikan lisäksi työssä pyrittiin mahdollisimman tarkasti selvittämään talteenoton kustannuksia aina investoinnista ylläpitoon. Tarkoitus oli tuottaa hyvät lähtötiedot hiilidioksidin talteenottoon liittyvää päätöksentekoa varten.

Työssä onnistuttiin analysoimaan eri talteenottotekniikoiden soveltuvuutta sekä valmiusastetta kaupallista käyttöä varten. Aihe on kokonaisuudessaan erittäin ajankohtainen. Olemassa olevia tekniikoita kehitetään kiivaasti ja kokonaan uusia tekniikoita on odotettavissa, kun ymmärrys lisääntyy. Lopputulemana voidaan todeta, että tämän työn kustannusarviot sekä tekniikan soveltuvuus ovat relevantteja tässä hetkessä. Läpimurto kehitteillä olevan tekniikan osalta voi tehdä tällä hetkellä olemassa olevista tekniikoista sekä kalliita, että vanhanaikaisia nopeastikin. Lainsäädännön keskeneräisyys ja kannustinjärjestelmän puute lisää epävarmuutta hiilidioksidin talteenottoa harkitseville yrityksille.

Asiasanat: hiilidioksidin talteenotto, esiselvitys, CCU, arvoketju

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Camilla Cleve
Thesis title	Capture and utilization of carbon dioxide at MM Kotkamills Oy Kotka site
Commissioned by	MM Kotkamills Oy
Time	2024
Pages	51 pages, 1 page of appendix
Supervisor	Anne Gango Xamk, Harri Mielonen MM Kotkamills Oy

ABSTRACT

Climate change has been a hot topic for a long time and attempts have been made to mitigate it with the means available at the time - by reducing the amount of carbon dioxide released into the atmosphere. With the development of technology, the discussion has turned to ways to capture carbon dioxide before it enters the atmosphere. Finland is committed to the EU's climate targets. Industry in Finland, as in other European countries, is the largest source of carbon dioxide emissions. Development is now being directed towards capturing carbon dioxide directly from the chimney and either storing it or utilizing it in a way that removes it from the atmosphere almost permanently.

MM Kotkamills is a company that genuinely cares about the environment. Although a significant portion of Kotkamills' carbon dioxide emissions are bio-based, the company has a desire to explore its options for carbon dioxide capture. The purpose of this work was to produce a techno-economic study of the technology suitable for Kotkamills' needs to capture carbon dioxide. In addition to the technology, the aim of the work was to determine the costs of capture as accurately as possible, from investment to maintenance. The goal was to provide good information for decision-making related to carbon dioxide capture.

The work succeeded in analyzing the suitability and readiness level of different capture technologies for commercial use. The topic as a whole is very topical. Existing technologies are being developed rapidly and entirely new technologies are invented as understanding increases. As a result, it can be stated that the cost estimates and suitability of the technology in this work are relevant at this time. A breakthrough in technology development can quickly make existing technologies both expensive and outdated compared to the new ones. The pending legislation and the lack of incentive systems increase uncertainty for companies considering carbon dioxide capture.

Keywords: carbon capture, feasibility study, CCU, value chain

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	MM KOTKAMILLS OY	6
3	PÄÄSTÖISTÄ JA NIIDEN MERKITYKSESTÄ.....	7
3.1	Päästöoikeudet.....	9
3.2	Päästöoikeuksien taloudelliset vaikutukset.....	9
3.3	Päästöjen koostumus	11
4	HIILIDIOKSIDI	11
4.1	Hiilidioksidin olomuodot	12
4.2	Hiilidioksidin nesteytys.....	13
4.3	Hiilidioksidista synteettiseksi metaaniksi.....	15
5	HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO.....	17
5.1	Talteenottoteknologian valmiusaste TRL.....	20
5.2	Talteenoton yleiset tekniset vaatimukset	22
5.3	Talteenoton sähkön- ja lämmöntarpeesta.....	24
5.4	Polton jälkeinen talteenotto	26
6	KUSTANNUKSET.....	31
6.1	Osapaine	34
6.2	Talteenoton kustannukset.....	35
6.3	Paineistuksen kustannukset	36
6.4	Kuljetuskustannukset.....	38
6.5	Kannustimet ja investointikustannukset	40
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	43
	LÄHTEET	45
	LIITTEET	52

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hidastaminen ja pysäyttäminen on ollut päivän polttava puheenaihe jo pitkään, eikä suotta. Olemme voineet havaita Suomessakin sään ääri-ilmiöitä enenevässä määrin. Suomen ilmastopolitiikkaa ohjaa kansallisen ilmastolain lisäksi EU:n ilmastopolitiikka sekä kansainväliset ilmastositoumukset. Ilmastolakiin on kirjattu Suomen päästövähennystavoitteet ja tavoitteena onkin hiilineutraaliuden saavuttaminen vuoteen 2035 mennessä. (Suomen ympäristökeskus 2022.)

Tavoitteisiin pääsemisessä ja hiilineutraaliuden saavuttamisessa on merkittävässä roolissa teollisuuden päästöihin vaikuttaminen. Energiaviraston julkaisemiin vuoden 2020 tietoihin pohjautuen Tekniikka & Talous on listannut Suomen sata suurinta hiilidioksidin päästäjää. MM Kotkamills Oy:n Kotkan Tehtaat (myöh. Kotkamills) on tässä listauksessa 16. sijalla (Laatikainen 2022).

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa esiselvitys hiilidioksidin talteenottamiseksi Kotkamillsin Kotkan tehtaiden voimalaitoksella sijaitsevan soodakattilan sekä kombikattilan ja kaasuturbiinin savukaasuista. Soodakattilassa poltetaan sellunkeitosta saatua mustalipeää, joka on haihdutettu ja kuiva-ainepitoisuus on noin 75–80 %. Kombikattilassa poltetaan maakaasua sekä kaasuturbiinin savukaasut sen ollessa ajossa. Tässä työssä tutkitaan eri vaihtoehtoja hiilidioksidin talteenottoon, mutta pääpaino on tekniikoissa, jotka soveltuvat Kotkamillsin käyttöön ja ovat skaalattavissa kaupalliseen tuotantoon. Samalla selvitetään mahdollisuuksia vähentää maakaasun kulutusta. Maakaasun kulutuksen vähentäminen tapahtuisi tuottamalla talteenotetusta hiilidioksidista ja uusiutuvalla energialla tuotetusta vedystä synteettistä metaania. Kotkamills talteenottaisi ja nesteyttäisi hiilidioksidin kuljetusvalmiiksi, jonka jälkeen se toimitettaisiin ulkopuoliselle toimijalle metanointia varten.

Työssä tutkitaan, miten hiilidioksidi saadaan talteen savukaasuista: millä tekniikalla ja minkälaisella laitteistolla sekä miten laitteisto soveltuisi fyysisesti Kotkan tehtaille. Lisäksi selvitetään, mitä täytyy huomioida hiilidioksidin talteenoton integroinnissa olemassa olevaan prosessiin. Lopuksi tarkastellaan

valikoitujen tekniikoiden hintalappua, eli mitkä potentiaaliset kustannukset olisivat tekniikalle, joka soveltuu Kotkamillsin käyttöön. Kotkamillsin tase päättyy hiilidioksidin nesteyttämiseen, mutta koko arvoketjua tarkastellaan, sillä monet seikat vaikuttavat siihen, mitkä tekniikat kannattaa valita ja miten se vaikuttaa kustannuksiin. Liiketoimintamallina voidaan pitää hiilidioksidin talteenottamista ja nesteyttämistä ja sen myymistä ulkopuoliselle toimijalle, joka tuottaa hiilidioksidista vedyn avulla synteettistä metaania. Synteettinen metaani voidaan ostaa takaisin ja sillä korvata maakaasun käyttöä tehtaalla. Synteettistä metaania, joka tunnetaan myös E-metaanina, voidaan käyttää täysin samoissa kohteissa kuin maakaasua, joten se ei vaadi muutoksia olemassa oleviin laitteistoihin (Gasum 2024).

Opinnäytetyön tekemisen aikana työn tavoitteeksi lisättiin vielä, että lopputuotteen valmistuisi yksisivuinen esitys hiilidioksidin arvoketjusta Kotkamillsin näkökulmasta. Tiedon karttuessa tarkennettiin myös sitä, että työssä keskitytään ainoastaan teollisessa mittakaavassa saatavilla oleviin, kaupallisiin talteenototekniikoihin. Työssä on sivuttu kuitenkin muita tekniikoita, sillä monet tekniikat voivat nopeastikin kehittyä kaupallista käyttöä varten ja ne voivat olla myös tämän hetkisiä tekniikoita edullisempia.

2 MM KOTKAMILLS OY

MM Kotkamills Oy on itävaltalaisomisteinen (Mayr-Melnhof, MM) metsäteollisuusalan yritys. Emoyhtiön alaisuudessa toimii MM Kotkamills Boards Oy ja MM Kotkamills Absorbex Oy. MM Kotkamills Boards Oy valmistaa valkaistua, päällystettyä taivekartonkia ja muovitonta elintarvikekartonkia. MM Kotkamills Absorbex Oy valmistaa valkaisemattomasta sellusta laminaattipaperia pääasiassa rakennusteollisuuden käyttöön.

Kotkansaarella sijaitsevan varsinaisen tehtaan lisäksi kokonaisuuteen kuuluu Langinkosken vedenottamo Kymijoen varressa. Kotkamillsillä on ollut myös oma saha, mutta sen kohtalo sinetöitiin loppuvuonna 2023 muutosneuvotteluissa ja saha päätettiin lakkauttaa. Sahan lakkauttamisen myötä tehdasalueelle vapautui tilaa esimerkiksi hiilidioksidin talteenottoon liittyvälle laitteistolle.

Tehdas tuottaa paperin ja kartongin valmistuksessa tarvittavan selluloosan omalla sellutehtaallaan. Sellunkeitosta saatava mustalipeä poltetaan haihdutusprosessin jälkeen soodakattilassa, josta saadaan höyryä ja lämpöä. Soodakattilassa varapolttoaineena on maakaasu. Soodakattilan biopohjaiset hiilidioksidipäästöt ovat 100 – 200 kt/a. Soodakattilan hiilidioksidipäästöt voidaan luokitella biopohjaisiksi, sillä ne ovat puupohjaisia (Tilastokeskus 2023). Fossiilisten polttoaineiden poltosta syntyy tehtaalla toiset 100 – 200 kt/a hiilidioksidipäästöjä. Päästömäärät ovat kuitenkin täysin riippuvaisia lopputuotantotasoista ja esimerkiksi vuonna 2023 hiilidioksidipäästöt jäivät reilusti edellisvuotta pienemmiksi.

Tehtaalla on edellä mainittujen lisäksi maakaasulla toimiva kaasuturbiini, jolla tuotetaan sähköä. Kombikattilalla voidaan tarpeen mukaan hyödyntää kaasuturbiinin pakokaasut ja tuottaa lämpöä ja höyryä maakaasulla. Maakaasun kulutus on noin 1 TWh vuodessa. Suuren maakaasun kulutuksen vuoksi on mielekästä tarkastella mahdollisuutta ottaa hiilidioksidi talteen ja valmistaa siitä synteettistä metaania omaan käyttöön. Tämä työ on esiselvitys biopohjaisten hiilidioksidipäästöjen talteen ottamiseksi, mutta hanke vähentäisi myös fossiilisten päästöjen määrää, jos maakaasun tilalle saataisiin synteettistä, talteen otetusta hiilidioksidista valmistettua maakaasua.

3 PÄÄSTÖISTÄ JA NIIDEN MERKITYKSESTÄ

Teollisuuden päästöjä ohjataan EU-tasolla. Teollisuuden päästädirektiivi on tärkein säädös, jonka tarkoitus on ehkäistä ja vähentää suurten teollisuuslaitosten päästöjä EU:n alueella (Eurooppa-Neuvosto 2023). Päästädirektiivin lisäksi Suomea sitoo Pariisin ilmastopöimus. Pariisin sopimuksella tavoitellaan tilannetta, jossa ihmisen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt sekä niitä sitovat hiilinielut olisivat tasapainossa kuluvan vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla. Pariisin sopimuksen pääroolissa on päästövähennystavoitteet, mutta sillä ohjataan osapuolia päästöjen vähentämisen lisäksi mm. ilmastorahoituksen lisäämiseen sekä teknologian kehittämiseen. Sopimuksen osapuolia sitovat tavoitteet ovat kunnianhimoisia ja kiristyvät ajan myötä, jotta ilmaston lämpeneminen saataisiin pysäytettyä alle 1,5 asteeseen. Tähän 1,5 asteen tavoitteeseen on sitoutunut myös MM Group. (Ympäristöministeriö 2022.)

Tutkijat ovat jo kauan sitten havainneet ilmaston muuttuvan hiilidioksidin takia. Vaikka hiilidioksidin rooli ilmastonmuutoksessa on tunnustettu, on hiilidioksidi nähty ”vihollismolekyylinä”, joka pitäisi eristää tai piilottaa. Toisin sanoen ei ole tiedetty, miten hiilidioksidia voitaisiin ottaa talteen ja hyödyntää. Vielä vuonna 2007 julkaistussa hallitustenvälisen ilmastopaneelin raportissa hiilidioksidin uudelleenkäyttö ilmastonmuutoksen hillitsemiskeinona loisti poissaolollaan. Pian tämän jälkeen asenteet muuttuivat ja hiilidioksidia alettiin nähdä resursseina ja sen uudelleenkäyttöä alettiin tutkia. Asennemuutokseen vaikuttivat mm. sosiaalinen ja poliittinen paine sekä hiilidioksidipäästöille asetetut kustannukset. Hiilidioksidi alettiin nähdä nolla- tai miinushintaisena raaka-aineena. Samalla huomattiin, kuinka yrityksen imagoa voitiin parantaa ympäristötietoiseksi profiloitumalla. (Centi & Quadrelli 2011.)

Mielenkiintoinen huomio on se, että jo nyt kansainväliset, suuret yritykset kuten Microsoft, ostavat hiilidioksidipäästöjä varastoitavaksi maankuoren alle. Päästövaikutusten lisäksi tavoitteena on tietysti ilmastoystävällisen imagon rakentaminen. Talteen otetulle hiilidioksidille on markkinat hyödyntämisen osalta, mutta kauppaa tehdään myös hiilenpoisto CDR-krediitteinä, joilla yritykset voivat kompensoida hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi koko toimintansa ajalta. Kappaleessa 6 kerrotaan CDR-järjestelmästä lisää. Suomessa kunnat kompensoivat päästöjään päästökseen lähemmäs hiilineutraaliustavoitteitaan ja suurista yrityksistä esimerkiksi Hesburger ja LähiTapiola rahoitus käyttävät kompensatiopalveluita. (Finnwatch 2021.)

Hiilidioksidin talteenotosta yleisesti puhuttaessa käytetään kahta lyhennettä: CCU (Carbon Capture and Utilization) ja CCS (Carbon Capture and Storage). Ensimmäisellä tarkoitetaan hiilidioksidin talteenottoa ja hyödyntämistä ja jälkimmäinen pitää sisällään hiilidioksidin talteenoton ja varastoimisen pysyvästi, esimerkiksi maankuoreen. Kotkamillsin soodakattilan tuottaman hiilidioksidin talteenotossa ja hyödyntämisessä voidaan käyttää termejä Bio-CCU tai BECCU (Bioenergy Carbon Capture and Utilization), sillä soodakattilassa poltettava mustalipeä on biopohjaista. Biopohjaisen hiilidioksidin talteenotto onkin mielenkiintoinen aihe. Tuotteen katsotaan puuna ollessaan sitoneen saman määrän hiilidioksidia ilmakehästä kuin mitä siitä on poltettaessa vapautunut ilmakehään. Siinä missä monet yritykset tavoittelevat hiilineutraaliutta, eli hiilen

sidonta ja päästöt ovat tasapainossa, on biopohjaisen hiilidioksidin talteenotolla mahdollista saavuttaa hiilinegatiivisuus, eli toiminnalla vähennetään hiilidioksidin määrää ilmakehässä. (Bioenergia ry 2024.)

3.1 Päästöoikeudet

Koko EU:lle on määritelty oma päästökatto ja sen sisällä käydään päästökauppaa. Tarkoituksena on pitää lentoliikenteen ohella teollisuus- sekä energiantuotantolaitosten kasvihuonekaasupäästöt EU:n päästökaton määrittelemissä rajoissa. Suomessa päästöjen vähentämistä valvoo Energiavirasto. Päästökaupan piiriin Suomessa kuuluvat suuret, kokonaislämpötehoaan yli 20 MW:n teollisuuslaitokset sekä sitä pienemmät kaukolämpöä tuottavat laitokset. Kotkamills kuuluu päästökaupan piiriin ja päästökauppa onkin merkittävä kuluerä yhtiölle. Hiilidioksidipäästöjen vähentämistä on syytä tavoitella niin ympäristön kuin kustannustenkin vuoksi. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023.c)

Päästökauppakaudella 2021–2030 päästöoikeuksien liikkeelle lasku tapahtuu suurimmalta osin huutokaupan kautta. Suomen päästöoikeuksien osalta huutokaupanpitäjänä toimii Energiavirasto. Energiavirasto siis vastaa Suomen osuuden huutokaupasta EU:n yhteisellä huutokauppapaikalla ja vastaanottaa Suomelle saadut tulot sekä tilittää ne valtiolle. Päästökauppajärjestelmässä päästöoikeuksia jaetaan ilmaiseksi toimialoille, jotka ovat päästökauppadiirektiivissä erikseen määritelty. Ilmaisoikeuksilla pyritään ehkäisemään tuotannon siirtymistä EU:n ulkopuolelle, eli niin kutsuttua hiilivuotoa. Vuosittain jaettavien ilmaisoikeuksien määrä perustuu viranomaisen tekemään, edellisvuotta koskevaan, päästötodennukseen. Ilmaisoikeudet tulee yrityksen itse hakea ja se myönnetään kerrallaan viideksi vuodeksi. (Energiavirasto 2021a.)

3.2 Päästöoikeuksien taloudelliset vaikutukset

MM Kotkamills Boards Oy:lle on vuosina 2021 ja 2022 myönnetty ja jaettu keskimäärin noin 175 000 tCO₂ :n edestä ilmaisoikeuksia (Energiavirasto 2021b).

Vuonna 2022 päästökaupassa yhden ilmakehään päästetyn hiilidioksiditonnin keskihinnaksi muodostui 80,1 €/tCO₂ (taulukko 1). Vuonna 2021 keskihinta on

ollut 54,18 €/tCO₂. Keskihinnalla laskettuna ilmaisoikeuksien arvo yritykselle on ollut vuonna 2021 noin 9,5 miljoonaa euroa ja vuonna 2022 jo noin 14 miljoonaa euroa. Yhtenä visiona päästöoikeuksien kehityksessä on se, että ilmaisoikeudet poistettaisiin kokonaan. Siinä tapauksessa voidaan olettaa, että tilalle tulisi muita kannustimia, jotka päästöjen sijaan kannustaisivat ottamaan hiilidioksidin talteen ja joko hyödyntämään sen tai varastoimaan.

Taulukkoa tarkastelemalla voitaneen päätellä, että päästöoikeuksista tullaan jatkossakin maksamaan aina edellisvuotta enemmän. Ainakin jos päästökauppasysteemi säilyy entisenlaisena. Monissa lähteissä onkin arvioitu, että kun päästöoikeuden hinta lähestyy 100 €/tCO₂, niin yrityksille alkaa olla kannattavaa tehdä toimenpiteitä hiilidioksidin talteen ottamiseksi. Päästöoikeuksien ostaminen tulee siis olemaan kalliimpaa kuin hiilidioksidin talteenotto.

Taulukko 1. Päästökaupan hintakehitys 2013-2022 (Energiavirasto 2022)

vuosi	Suomen päästöoikeudet (miljoonaa kpl)	Suomen tulot (miljoonaa euroa)	Huutokauppojen selvityshintojen keskiarvo (euroa/T CO ₂)
2013	15,2	67,0	4,40
2014	10,8	63,5	5,91
2015	12,3	93,7	7,64
2016	13,5	71,2	5,25
2017	16,5	95,3	5,75
2018	16,3	251,8	15,68
2019	8,9	220,0	24,73
2020	9,0	220,6	24,33
2021	7,8	409	54,18
2022	6,4	511,1	80,10

Lakiin ehdotetaan sisällytettäväksi direktiivissä säädetyt muutokset maksutta jaettavien päästöoikeuksien myöntämisestä koskien. Laitosten maksutta jaettavien päästöoikeuksien määrää vähennettäisiin hiilirajamekanismia koskevan

asetuksen mukaisilla toimialoilla sekä maksutta jaettavien päästöoikeuksien myöntämisen ehtoja kiristettäisiin vuodesta 2026 alkaen siten, että jatkossa toiminnanharjoittajan tulisi osoittaa toteuttaneensa direktiivissä määritettyjä energiatehokkuuden parantamiseen tähtääviä toimia saadakseen maksutta myönnettävät päästöoikeudet täysimääräisesti. (Hallituksen esitys 71/2023 vp 2023.)

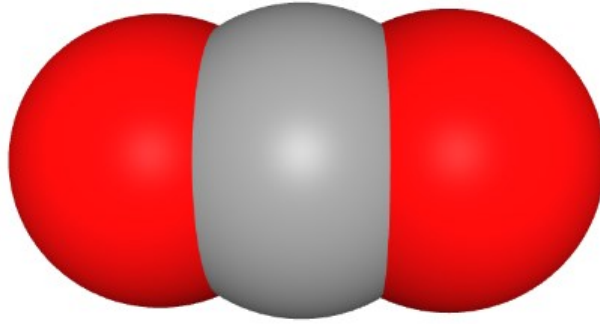
3.3 Päästöjen koostumus

Tyypillinen savukaasun koostumus soodakattilassa on 10–15 % hiilidioksidia, 70–75 % typpeä ja pienempiä osuuksia vettä, happea, hiilimonoksidia, eli häkää, sekä rikin ja typen oksideja (Chunshan et al. 2004, 315–322). Kotkamillsillä ei ole hiilidioksidin mittausta savukaasuista, vaan sen ilmakehään päästetty määrä lasketaan päästökertoimen avulla käytetyn polttoaineen määrästä.

Verrattuna soodakattilan savukaasuihin on maakaasua poltettaessa hiilidioksidin määrä savukaasuissa pienempi kuin lipeän poltossa, noin 8–10 %. Typpeä maakaasun polton savukaasuissa on niin ikään vähemmän kuin mustalipeän poltossa, noin 67–72 %. Veden määrä savukaasuissa on puolestaan soodakattilaan verrattuna runsaampi, noin 18–20 %. (Chunshan et al. 2004, 315–322.) Koska online-mittausta ei ole, on savukaasuja analysoitava tarkemmin ennen hiilidioksidin talteenottoon ryhtymistä. Savukaasujen koostumukseen vaikuttaa muun muassa ajotapa sekä palamisprosessiin liittyvät laitteet kuten ilmajärjestelmä sekä sähkösuodattimet.

4 HIILIDIOKSIDI

Hiilidioksidin kemiallinen kaava on CO_2 . Hiilidioksidimolekyylä muodostuu siis yhdestä hiiliatomista (C) ja kahdesta happiatomista (O) kuvan 1 mukaisesti. Hiilidioksidia esiintyy luonnossa hajuttomana ja värittömänä kaasuna ilmakehän lämpötiloissa ja paineissa. Kaasuna esiintyessään se on ilmaa raskaampaa. Hiilidioksidi ei ole räjähtävää eikä se ylläpidä palamista. Tästä huolimatta kuumentuessaan se voi aiheuttaa esimerkiksi säiliön räjähdysten lämpölaajenemisen myötä. (Työterveyslaitos 2022.)



Kuva 1. Hiilidioksidimolekyylin rakenne (National Center for Biotechnology Information 2024)

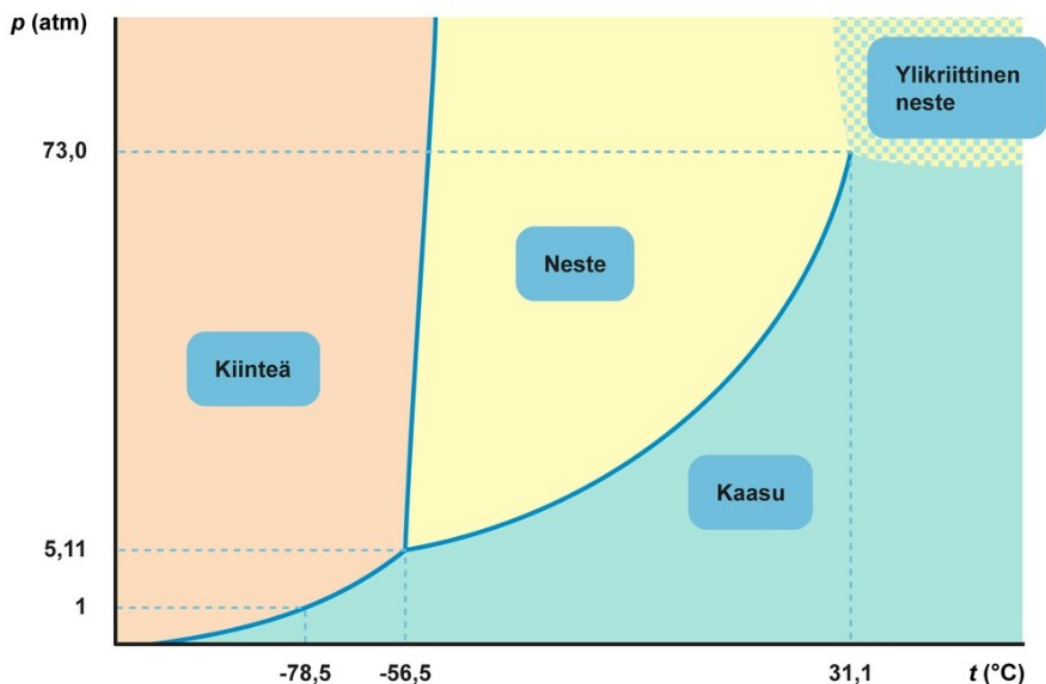
Hiilidioksidin muodostumista hiiltä sisältävien polttoaineiden poltossa voidaan havainnollistaa reaktioyhtälöllä 1. Reaktiona palaminen tarvitsee aina palavan materiaalin sekä lämmön lisäksi happea. Kun happi ja hiili reagoivat keskenään, syntyy hiilidioksidia.



Siitä huolimatta, että hiilidioksidia ei ole luokiteltu ympäristölle vaaralliseksi, on se yksi merkittävimmistä ilmastonmuutosta kiihdyttävistä kasvihuonekaasuista. Vaikka hiilidioksidia esiintyy ilmakehässä luonnostaan, on ihminen toiminnallaan lisännyt sen määrää ilmakehässä. Hiilidioksidia syntyy palamistuotteena, kun hiilipitoisia polttoaineita poltetaan ja tästä syystä tehtaat ovatkin merkittävimpiä hiilidioksidin päästölähteitä niin Suomessa kuin kansainvälisestikin. Toisaalta myös metsiä raivaamalla on aiheutettu metsäkatoa. Metsää kaadettaessa sen hyötyvaikutus häviää, sillä puut sitovat hiilidioksidia itseensä suoraan ilmakehästä. (Euroopan komissio 2023.)

4.1 Hiilidioksidin olomuodot

Hiilidioksidia ja vettä esiintyy luonnostaan maapallolla ja niiden faasidiagrammit ovat samankaltaiset. Eroavaisuuksia kuitenkin löytyy. Siinä missä vesi on normaalissa ilmakehän paineessa nesteenä, ei hiilidioksidi saavuta nesteen olomuotoa normaalipaineessa (kuva 2). (LabXchange 2022.)

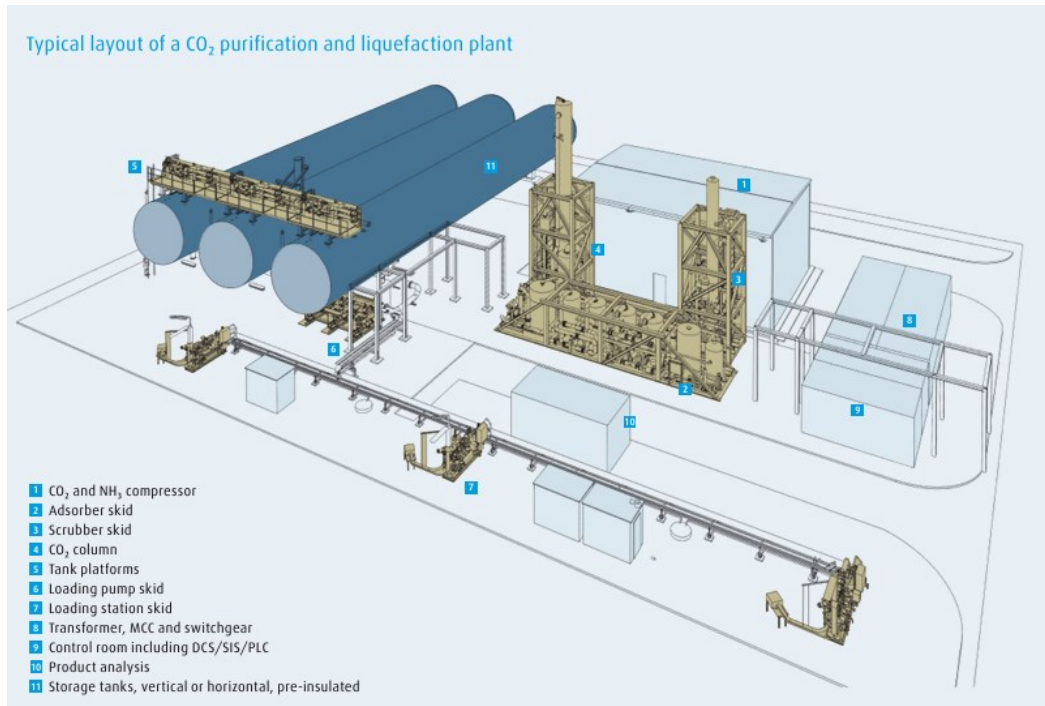


Kuva 2. Hiilidioksidin faasidiagrammi paineen ja lämpötilan funktiona (Vierinen 2020)

Kuvan 2 diagrammissa paine on esitetty yksikössä atm, eli ilmakehän normaali-paineessa, joka on 1,01325 baaria (VTT 2023). Faasidiagrammista nähdään, että hiilidioksidin kolmoispiste, eli piste, jossa aine voi olla kaikissa kolmessa olomuodossa samanaikaisesti on paineessa 5,11 atm, eli 5,18 baaria ja lämpötilassa $-56,5$ °C. Diagrammista voidaan tulkita, että hiilidioksidi on nestemäistä, kun sen paine on 5,18–73,97 baaria sekä lämpötila $(-56,5)$ – $(+31,1)$ °C. Talteenoton jälkeen hiilidioksidi on siis joko paineistettava tai jäähdytettävä tai molempia, jotta se saadaan nestemäiseen muotoon jatkojalostusta varten.

4.2 Hiilidioksidin nesteytys

Savukaasuista talteen otettu hiilidioksidi on nesteytettävä jatkojalostusta varten. Säilytys sekä kuljetus on helpompaa, kun hiilidioksidi on nestefaasissa. Kuljetus on myös edullisempaa nestefaasissa. Kaasufaasissa operoiminen on myös mahdollista riippuen jatkokäytöstä ja -käyttäjistä, mutta nesteyttäminen on laskettava potentiaaliseksi kulueräksi, sillä se tapahtuu tehdasalueella. Koska hiilidioksidi nesteytetään tehdasalueella, on sen tilantarve huomioitava. Hiilidioksidin nesteytysaseman komponentit esitellään kuvassa 3. Yhdestä litrasta nestemäistä hiilidioksidia saadaan noin 440 litraa kaasumaista hiilidioksidia (Työterveyslaitos 2022).



Kuva 3. Hiilidioksidin nesteytysaseman tyypillinen layout (Linde Engineering 2019)

Hiilidioksidin nesteytyksen voi ostaa palveluna, jolloin koko prosessista vastaa ulkopuolinen toimittaja. Toimittajasta riippuen prosessissa voidaan huomioida esimerkiksi lämmön talteenotto niin, että prosessista tulee taloudellinen ja energiatehokas. Nesteytysasemaan liittyvät hiilidioksidisäiliöt voivat olla kuivasta poiketen myös pystyasennossa, jolloin tilantarve on tietysti pienempi.

Aker Carbon Capture (myöhemmin Aker) tarjoaa palveluita hiilidioksidin talteen ottamiseksi. Akerilla on meneillään projekti Hollannissa, jossa Twencen waste-to-energy -jätteenpolttolaitoksella otetaan talteen 100 ktCO₂ vuosittain. Nesteytetty hiilidioksidi toimitetaan puutarhaviljelyyn, eli kasvihuoneisiin kasvua kiihdyttämään. Kuvassa 4 näkyvät hiilidioksidin talteenotto- ja nesteytyslaitokset teollisessa mittakaavassa, kapasiteetilla 100 ktCO₂/a. (European Commission 2021.)



Kuva 4. Twencen ja Akerin yhteistyöhanke Hollannissa. Etualalla hiilidioksidin nesteytysasema sekä kolme säiliötä nesteytettylle hiilidioksidille. Talteenottolaitos Just Catch 100™ osittain rakennustelineillä verhoiltuna. (Aker Carbon Capture 2024)

Nesteytysaseman sijainti tehdasalueella määräytyy muun muassa valitun kuljetustavan perusteella. Putkikuljetus edellyttää verkostoon liittymistä ja kuljetus maanteitse edellyttää nesteytysasemalle kulkua raskailla ajoneuvoilla. Esimerkkinä Nordic Ren-Gasin hanke Kotkassa, jossa on suunniteltu otettavaksi korkeintaan 97 000 tonnia hiilidioksidia talteen Kotkan Energian Korkeakoskella sijaitsevan jätteenpolttolaitoksen savukaasuista. Talteenotettu hiilidioksidi kuljetettaisiin raskailla ajoneuvolla Kotkan Mussaloon, jossa se edelleen jalostettaisiin synteettiseksi metaaniksi. Mussaloon on Korkeakoskelta maanteitse matkaa hieman alle 20 kilometriä. Hankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa on arvioitu hiilidioksidia kuljettavan raskaan liikenteen määräksi noin 8–12 raskasta ajoneuvoa vuorokaudessa yhdensuuntaisena liikenteenä. (Afrý 2023, 25, 35.)

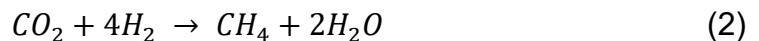
4.3 Hiilidioksidista synteettiseksi metaaniksi

Vaikka opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, miten hiilidioksidi saadaan Kotkamillsillä talteen, on kokonaisuuden ymmärtämiseksi hyvä avata, miten hiilidioksidista saadaan metaania. Jotta jatkojalostus olisi järkevää prosessin

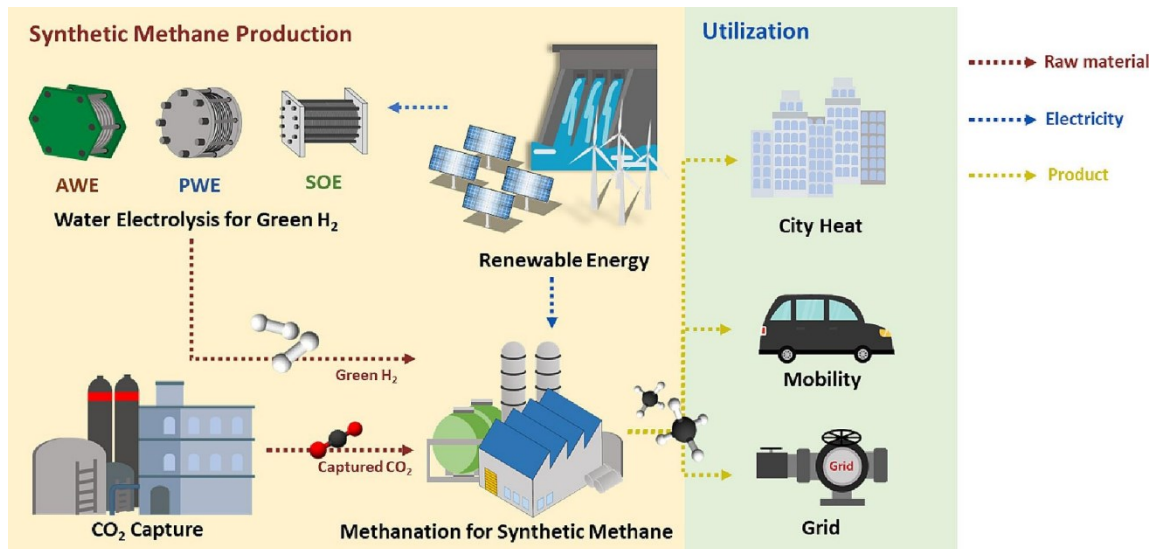
ja ilmastonmuutoksen kannalta, on hiilidioksidin lisäksi tarvittavan vedyn ol-
tava uusiutuvilla energialähteillä tuotettua. Kotkamillsin oman sahan viime
vuonna tapahtunut lakkauttaminen antaa potentiaalisen metanointilaitoksen si-
joittamiseen omalle tontille. Metanointilaitoksia ei Kotkan alueella vielä ole,
mutta halukkaita tulijoita on, joten tämä vaihtoehto on hyvä pitää mielessä in-
vestointia harkitessa.

Metanointilaitoksen fyysistä tilantarvetta selvittäessä vertailukelpoinen
kohde on Meri-Porin Tahkoluodon voimalaitos, jonne on suunnitteilla meta-
nointilaitos. Rejlers Finland Oy:n vuonna 2021 julkaisemasta esiselvityksestä
ilmenee, että määrällä 1,86 t/h hiilidioksidia tuotettaisiin 9,32 MW synteettistä
metaania (5 baarin paineessa ja metaanipitoisuuden ollessa 96 %). Tämän
kokoluokan metanointilaitokselle on esiselvityksessä tilantarpeeksi esitetty
5000 m². (Rejlers Finland Oy 2021, 21–24.)

Metaanin valmistus, eli metanointi, voidaan ajatella eräänlaisena vedyn jalos-
tusprosessina, jossa hyödynnetään jätettä, eli hiilidioksidia, joka muutoin pää-
tyisi suoraan ilmakehään. Hiilidioksidin ja vedyn reaktiona saadaan metaania
sekä vettä reaktioyhtälön 2 mukaisesti. Vedyn energiatiheys on 12,7 MJ/m³,
kun puolestaan metaanin energiatiheys on 40,0 MJ/m³ (Müller et al. 2013,
240–248). Vedyn osalta kannattaa huomioida sen kyky varastoida energiaa.
Suomessa on hyvä tuulivoimapotentiaali, joka toisaalta tarkoittaa myös sitä,
että tarvitaan tapoja varastoida energiaa niinä aikoina, kun sähköä tuotetaan
yli oman tarpeen. Esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimalla elektrolyysin avulla tuo-
tettu vety on päästötöntä.



Sabatier-reaktiossa tarvitaan neljä osaa vetyä yhtä osaa hiilidioksidia kohti.
Syntyneeseen metaaniin suhteutettuna vettä tulee kaksinkertainen määrä.
Metanointi voidaan toteuttaa korkeassa lämpötilassa ja paineessa tavanomai-
sessa metanointireaktorissa metallikatalyytin avulla tai alhaisemmassa lämpö-
tilassa ja ilmakehän paineessa biologisella katalyytillä (Rejlers Finland Oy
2021). Kuvassa 5 havainnollistettuna hiilidioksidin kiertokulku synteettiseksi
metaaniksi.

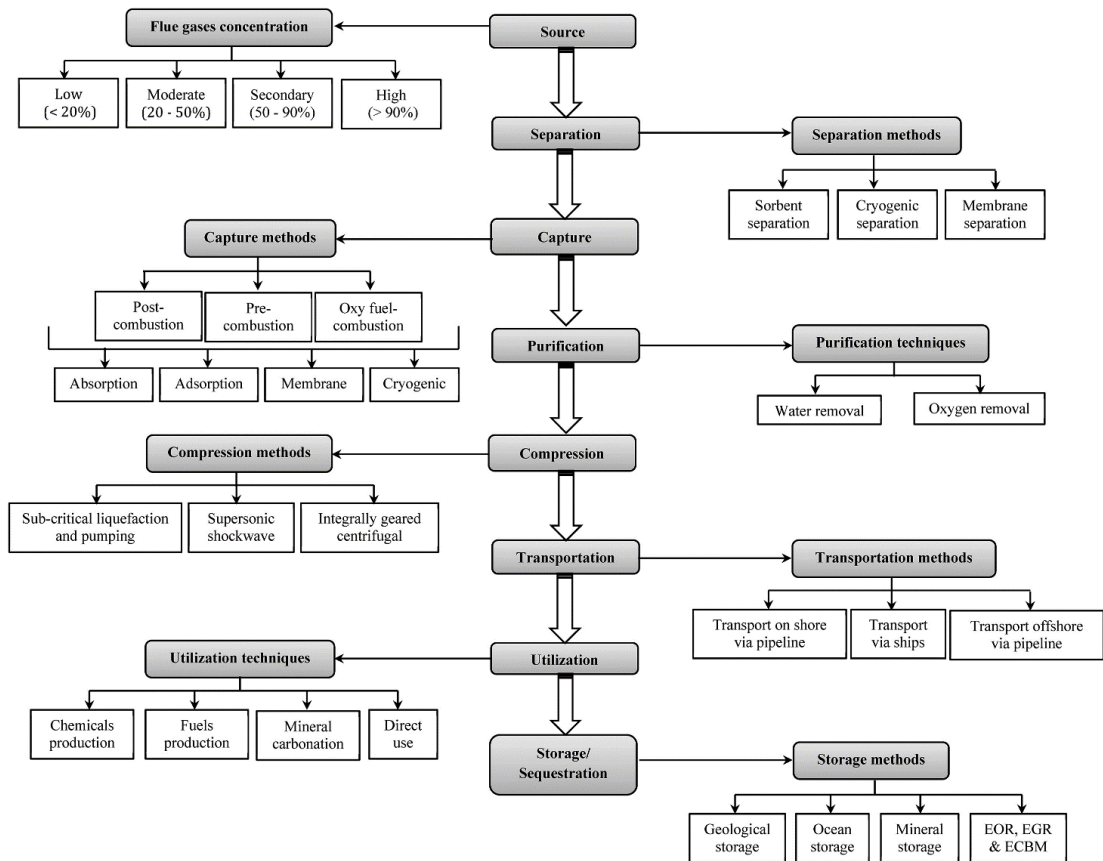


Kuva 5. Synteettisen metaanin valmistus (Changgwon et al. 2023)

Synteettisen metaanin valmistusta hiilidioksidista käsittelevässä opinnäytetyössä on laskettu metaanin saantia ja vaadittua hiilidioksidimäärää eri elektrolyysitehoilla. Menemättä yksityiskohtiin sen tarkemmin, voidaan todeta, että esimerkiksi 10 MW:n elektrolyysiteholla saadaan yhdellä hiilidioksiditonnilta tunnissa 350 – 400 kg synteettistä metaania. (Ylén 2021, 15.)

5 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO

Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen on monivaiheinen prosessi. Jokaisella vaiheella ja sen onnistumisella on oma merkityksensä koko prosessin kannalta. Kotkamillsin tarpeiden mukaisesti voidaan talteenottoa ajatella seitsemänvaiheisena prosessina (kuva 6). Prosessissa tarvitaan siis hiilidioksidin lähde, erotus, talteenotto, puhdistus, paineistus, kuljetus sekä hyödyntäminen. Toisaalta voidaan ajatella, että parhaassa skenaariossa talteen otettu hiilidioksidi voitaisiin hyödyntää suoraan tehdasalueella, jolloin hiilidioksidia ei tarvitsi kuljettaa paikasta toiseen.



Kuva 6. Systemaattinen lähestymistapa CCUS-prosessille (Maniarasu et al. 2023)

Hiilidioksidin talteenottoa varten on jatkuvasti kehitteillä uusia tekniikoita. Toisaalta jo toimivaksi todettuja tapoja kehitetään laboratoriomittakaavasta kaupalliseen/teolliseen mittakaavaan soveltuviksi. Tällä hetkellä olemassa olevat tekniikat jaotellaan lähteestä riippuen kolmeen tai neljään luokkaan. VTT jaottelee tekniikat neljään luokkaan seuraavasti: ennen polttoa tapahtuva talteenotto, polton jälkeen tapahtuva talteenotto, happipoltto sekä polttoaineeseen sisältyvän hiilidioksidin talteenotto (Kajolinna 2022). Talteenottotekniikoista happipoltto sekä polton jälkeen tapahtuva talteenotto ovat ne, jotka soveltuvat jo olemassa oleviin laitoksiin. Happipoltosta kerrotaan lisää talteenottoteknologioiden valmiusasteen yhteydessä. Koska tämän työn tarkoituksena oli selvittää mikä hiilidioksidin talteenottotekniikka soveltuisi tällä hetkellä Kotkamillsin käyttöön, on työssä keskitytty polton jälkeen tapahtuvaan talteenottoon. Polton jälkeen tapahtuva talteenotto on jo nyt kaupallisesti saatavilla ja teolliseen mittakaavaan soveltuva.

Hiilidioksidin talteenottamiseen savukaasuista on olemassa runsaasti vaihtoehtoja. Osa on jo kaupalliseen tarkoitukseen sopivia, osa vasta kehitteillä ja

kaikkea siltä väliltä. Moni tekniikka toimii laboratoriomittakaavassa, mutta skaalaus voimalaitosmittakaavaan puuttuu ja niin ollen näyttöä kaupallisesta toimivuudesta ei ole. Polton jälkeisessä talteenotossa voidaan käyttää adsorptiota, absorptiota tai kalvoerotusta. (Keskitalo 2013, 56.)

Adsorptio on fysikaalinen prosessi, jossa talteen otettava aine kiinnittyy kiinteään pintaan. Adsorptiomenetelmät eivät ole vielä kaupallisesti valmiita esimerkiksi voimalaitosmittakaavan savukaasujen käsittelyyn. Lisäksi adsorptio vaatisi savukaasuilta korkeaa hiilidioksidipitoisuutta, kuten happipoltossa on, sen matalahkon adsorptiokapasiteetin vuoksi. (Wang et al. 2011, 1610.)

Absorptio voidaan jakaa kahteen alalajiin; fysikaalinen absorptio ja kemiallinen absorptio. Fysikaalinen absorptio perustuu niin kutsuttuun Henryn lakiin ja siinä erotettava aine absorboituu fysikaaliseen liuottimeen. Fysikaaliset liuottimet kuten adsorptiokin vaativat yli 15 % hiilidioksidipitoisuutta savukaasuvirrassa, jotta ne olisivat taloudellisesti järkeviä käyttää. Kemiallinen absorptio on soveltuvien alle 15 % savukaasuvirran hiilidioksidipitoisuuksiin. Kemiallisella absorptiolla erotettu hiilidioksidi on suhteellisen puhdasta. (Wang et al. 2011, 1611.) Ominaisuuksiensa ansiosta kemiallinen absorptio on tällä hetkellä kaupallisessa käytössä olevista erotustekniikoista Kotkamillsin käyttöön soveltuvien. Se toimii matalan hiilidioksidipitoisuuden savukaasuvirrassa sekä tuotekaasu on valmiiksi melko puhdasta jatkokäyttöä ajatellen.

Membraanierotus, eli kalvoerotus, on erotustekniikka, jossa membraani on puoliläpäisevä kalvo kaasun ja nestemäisen liuottimen välissä. Kalvona on useimmiten ohut polymeerikalvo. Tässä tekniikassa tarvitaan energiaa, jotta savukaasut läpäisisivät suodattavan kalvon. Ajavana voimana toimii membraanikalvon eri puolilla olevien komponenttien paine-ero. (Wang et al. 2011, 1611.) Membraanierotus on Kotkamillsin kannalta mielenkiintoinen siksi, että LUT-yliopisto on tehnyt tutkimusta, jossa metsäteollisuuden sivuvirroista tai biomassaperäisiä jätteitä hyödyntäen on valmistettu selluloosamembraania, jota on käytetty onnistuneesti ainakin vedenpuhdistuksessa (Kallioinen 2021).

Edellä luetelluissa prosesseissa voidaan käyttää joko kemiallisia tai fysikaalisia liuottimia, joilla hiilidioksidi saadaan erotettua savukaasuista. Kehitteillä on

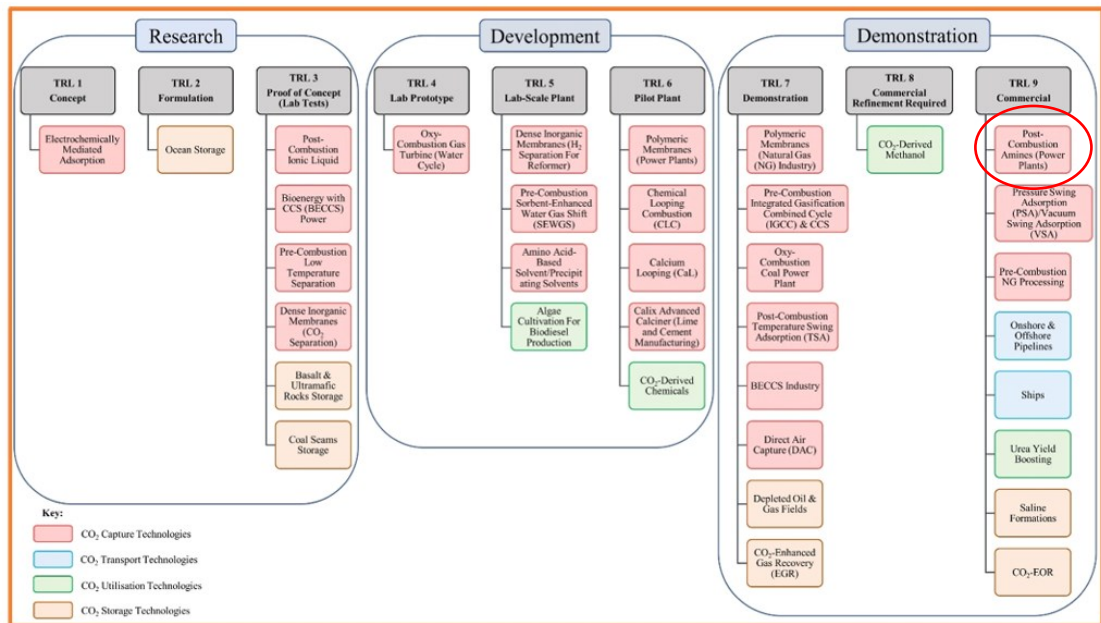
myös prosesseja, joissa yhdistetään kaksi tekniikkaa ja pyritään hyödyntämään kummankin tekniikan parhaat puolet. Hybridimenetelmästä puhutaan, kun prosessissa käytetään vähintään kahta tavanomaista erotustekniikkaa. Tutkituin hybridimenetelmä on kemiallisen absorption sekä kalvoerotuksen yhdistelmä. (Yu et al. 2023, 2–3.)

Erotustekniikoita on lisäksi kryogeenisia, eli alhaisen lämpötilan tekniikoita sekä biologisia, jossa hyödynnetään esimerkiksi mikrolevää. Viimeksi mainitut tekniikat ovat kuitenkin soveltumattomia Kotkamillsin käyttöön, eivätkä siksi vaadi lähempää tarkastelua.

5.1 Talteenottoteknologian valmiusaste TRL

Teknologioiden kehitysasteen mittarina, mukaan lukien hiilidioksidin talteenottotekniikat, käytetään globaalisti TRL-luokitusta (Technology Readiness Level). Luokittelu on alun perin kehitetty avaruus- ja sotilasteknologioiden hallintaan. Sitä ovat käyttäneet ja kehittäneet mm. Kansallinen avaruushallinto NASA ja Euroopan avaruusjärjestöt DLR, CNES ja ESA sekä Yhdysvaltojen puolustusministeriö. Myöhemmin luokittelu on standardisoitu ja otettu käyttöön muillakin tekniikan aloilla (Suomen standardisoimisliitto 2024).

TRL on yhdeksänportainen asteikko (kuva 7), jossa alimmalla portaalla voi olla esimerkiksi periaatteellinen esitys uudesta tekniikasta. Useita kehitysvaiheita tarvitaan uuden tekniikan potentiaalin arvioimiseksi. Ylimmällä portaalla TRL-mallissa on tekniikka, joka on jo kaupallisesti hyödynnettävissä oleva. On huomioitava, että TRL-asteet eivät kuvaa teknologian laatua, vaan sen kypsyyssastetta. Teknologian laatu syntyy prosessissa käytettyjen tuotteiden ja mekanismien laadusta.



Kuva 7. CCUS-tekniikoiden TRL-asteikko (Mulk et al. 2023)

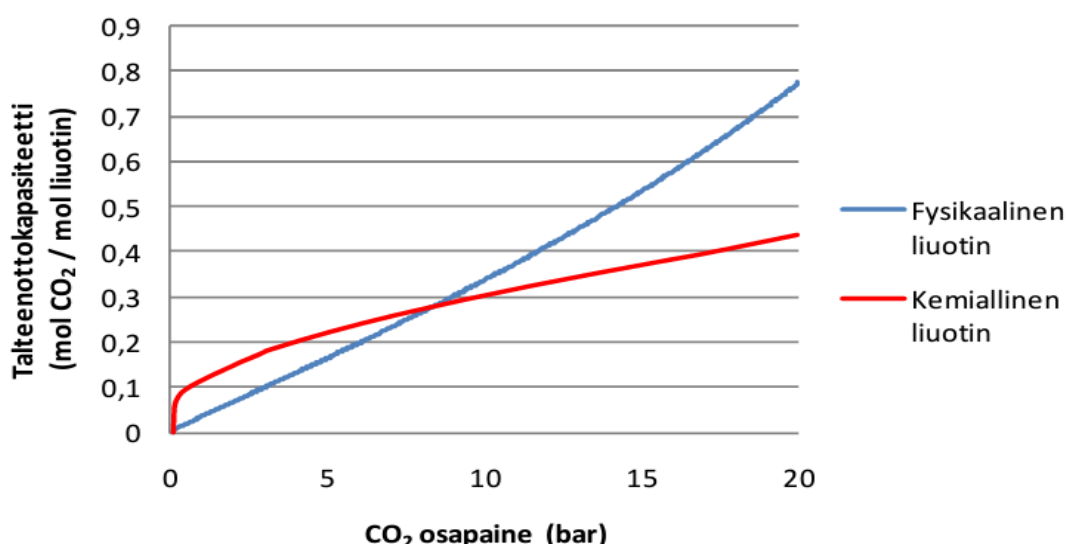
Ilmaston lämpenemisen ollessa globaali ongelma, on varmaa, että jokaisessa maapallon kolkassa kehitellään kuumeisesti teknologiaa, jonka avulla saavutettaisiin läpimurto. Tässä työssä on keskitytty polton jälkeiseen talteenottoon amiiniliuottimen avulla, sen korkean TRL-luokituksen takia. Kuvassa 7 kyseinen tekniikka on ympyröity punaisella ja sen luokitus on 9. Korkeimmasta valmiusasteluokituksesta huolimatta kannattaa pitää mielessä, että monet muutkin tekniikat voivat saavuttaa saman TRL-luokituksen nopeastikin, jos vain kehitysaskeleita saavutetaan. Happipolttotekniikassa polttoaineelle syötetään lähes puhdasta happea poltto varten. Mukana on myös kierrätettyjä savukaasuja. Tällä tekniikalla savukaasut saadaan työttömiksi ja savukaasun hiilidioksidipitoisuus korkeaksi (n. 80–95 vol-%, kuiva). Korkean hiilidioksidipitoisuuden ansiosta erotusprosessi on helpompi ja energiatehokkaampi.

Happipolton kaupallistumisesta hidastaa tekniikan keskeneräisyys polttoon tarvittavan hapen valmistuksessa. Mikäli hapen valmistuksessa tehdään läpimurto ja siitä saadaan taloudellisesti kannattavampaa, kiilaa happipolttotodennäköisesti polton jälkeisen talteenoton edelle kannattavuudessa. (Teir et al. 2011, 17–18.) On huomionarvoista, että kun hiilidioksidista tehdään vedyn avulla synteettistä metaania, tarvitaan vettä, josta vety erotetaan sähkön avulla, eli elektrolyysissä. Kun vedestä H₂O on erotettu vety H₂, jää jäljelle

happi O, joka parhaassa tapauksessa voitaisiin hyödyntää vaikkapa happipoltossa. Happipoltossa voidaan käyttää samoja erotusmenetelmiä kuin polton jälkeisessä talteenotossa. Happipoltossa saavutettava korkea savukaasun hiilidioksidipitoisuus mahdollistaa edellisessä luvussa esiteltyjen adsorptioerotuksen ja fysikaalisen liuottimen lisäksi myös kryogeenisen erotuksen, joka perustuu hiilidioksidin erottamiseen savukaasuista haihduttamalla (Wang et al. 2011, 1611).

5.2 Talteenoton yleiset tekniset vaatimukset

Kun tavoitellaan hiilidioksidin talteenottoa jälkiasennuksena, on muuttujia melko paljon. Useissa eri lähteissä on esiintynyt maininta Aspen Plus® -sovelluksen hyödyntämisestä. Sovelluksella voi simuloida hiilidioksidin talteenottoa. Aspentech:n tarjoamaa sovellusta varten on kerätty yli 40 vuoden ajan palautetta johtavilta kemian alan yhtiöiltä ja heillä on laaja tietokanta aineiden ominaisuuksista. Yhtiön mukaan sovelluksella voi tehdä talous-, turvallisuus-, energia- sekä päästömallinnuksia, joiden avulla voi arvioida prosessin tehokkuutta sekä suorituskykyä kestäväen kehityksen näkökulmasta. (Aspentech 2024.) Kuvassa 8 esitellään Aspen Plus -simulaatioesimerkki liuottimen absorptiokapasiteetin muutoksesta suhteessa hiilidioksidin osapaineeseen.



Kuva 8. Aspen Plus -sovelluksella tehty simulaatio osapaineen vaikutuksesta liuottimen absorptiokapasiteettiin (Teir et al. 2011)

Koska hiilidioksidin talteenottoa ei ole vielä integroitu juurikaan metsäteollisuuden, voisi mallintamisella pienentää riskejä ja löytää mahdolliset sudenkuopat. Aker on vastikään (27.2.2024) tiedottanut yhteistyöstä CO280 Soluti-

ons:n ja johtavan amerikkalaisen sellu- ja paperitehtaan kanssa. Aker on toimittanut tehtaalle siirrettävän testausyksikkönsä MTU (Mobile Test Unit) ja sen tulosten perusteella tehtaalle skaalataan useita moduuleja, jotka kukin pystyvät ottamaan talteen 400 ktCO₂. Talteenotolla pyritään saavuttamaan hiilinegatiivisuus ja tarjoamaan markkinaa päästöjen kompensatiolle. (Aker Carbon Capture 2024) Akerin lisäksi VTT:llä on saatavilla pilotointijärjestelmä, jota voidaan käyttää testaukseen ja demonstroiintiin esimerkiksi investointipäätöstä valmisteltaessa. VTT:n pilotointijärjestelmään kuuluu useita liikuteltavia kontteja eri toiminnoilla. Kontteja voi operoida itsenäisesti tai integroida haluttuihin yhdistelmiin kuten esimerkiksi hiilidioksidin talteenotto, prosessointi ja lopuksi metanointi. Pilotointijärjestelmän metanointiyksikkö tuottaa synteettistä maakaasua yhden normikuution tunnissa. (VTT 2024.)

Simuloimalla tai pienessä mittakaavassa testaamalla voidaan siis minimoida investointiin liittyviä riskejä. Koska hiilidioksidin talteenotto kaupallisessa mittakaavassa on suhteellisen uutta tekniikkaa, saatavilla ei ole tietoa siitä mikä missäkin ympäristössä toimii ja mikä ei, vaan yritykset haluavat pitää tiedot toistaiseksi itsellään. Gibbins ym. ovat esitelleet artikkelissaan Techno-Economic Assessment of CO₂ Capture Retrofit to Existing Power Plants kuusi seikkaa, jotka tulee huomioitavaksi lähes aina, kun talteenottotekniikkaa sovitetaan olemassa olevaan laitokseen. Huomioitavat seikat on mukailtu Kotkamillsin tarpeisiin seuraavasti:

- 1) Tila talteenotetun hiilidioksidin varastoinnille, etäisyys voi olla muutama sata metriä talteenotto paikasta
- 2) Riittävä tila talteenottoon tarvittavalle laitteistolle tehdasalueella
- 3) Savukaasun puhdistus ennen hiilidioksidin erotusta (olemassa olevan prosessin ja vaadittavan laitteiston yhteensovittaminen)
- 4) Prosessin jäähdytystarve (savukaasut jäähdytetään noin 40°C lämpötilaan) ja mahdollinen lämmön talteenotto
- 5) Lisääntynyt sähkön ja lämmön tarve talteenotto prosessia varten (sähkö hiilidioksidin paineistamiseen/nesteytykseen ja lämpö liuottimen regenerointiin)

- 6) Uusi toimintamalli, jossa huomioidaan talteenoton jälkeinen pienentynyt sähköntuotto, lisääntynyt höyrynkulutus ym.

(Gibbins et al. 2011, 1837–1838.)

Ruotsalaisessa tapaustutkimuksessa on esitetty yleisiä mitoituskriteereitä amiinipohjaisen hiilidioksidin absorptioprosessin suunnitteluun. Koska kyseessä on yhdestä lähteestä otettu tieto, on epävarmuustekijät huomioitava. Taulukossa 2 esitetyt tiedot ovat kuitenkin suuruusluokaltaan selkeästi linjassa muissa lähteissä esitettyjen tietojen kanssa.

Taulukko 2. Yleisiä CO₂-absorptioprosessin mitoituskriteereitä (Ósk Garðarsdóttir et al. 2018)
General design criteria of the CO₂-absorption process.

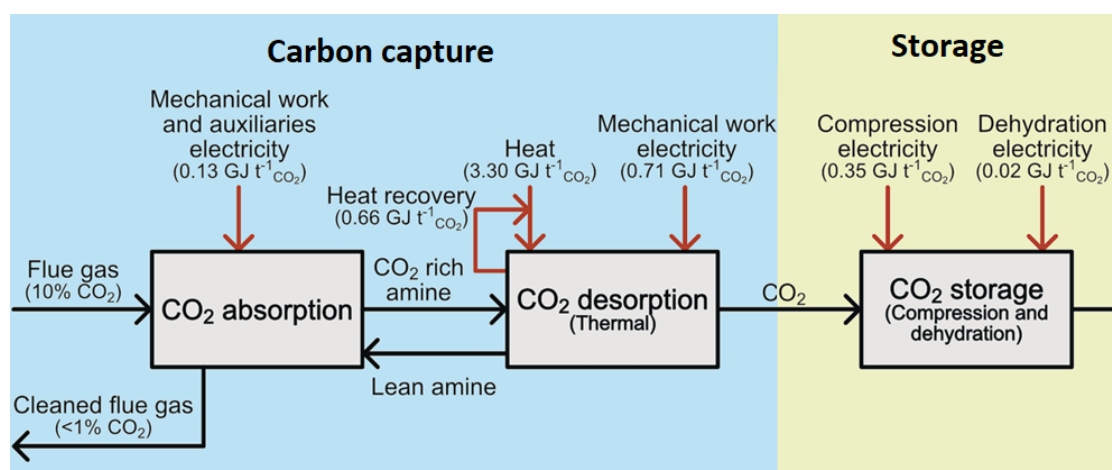
Column flooding limit	80%
Absorber pressure	1 bar
Absorber section packing height	25 m
Washing section packing height	4 m
Absorber total height	41 m
Stripper pressure	2 bar
Stripper packing height	12 m
Stripper total height	17 m
Solvent concentration	30 wt%
Direct contact cooler discharge temperature	40 °C
Lean cooler discharge temperature	40 °C
Absorber intercooler temperature	40 °C
Rich-lean heat exchanger lower terminal ΔT	10 °C
CO ₂ product cooling condenser temperature	20 °C
Compressor intercooler temperature	20 °C
CO ₂ product pressure after compression	110 bar
MEA concentration in CO ₂ -lean flue gas	< 1 ppm
CO ₂ -capture rate from treated flue gas stream	90%

5.3 Talteenoton sähkön- ja lämmöntarpeesta

Hiilidioksidin talteenotto-prosessissa tarvitaan sähköä ja lämpöä. Suurin osa lämmöntarpeesta kuluu liuottimen regenerointiin. Lämpöenergiana käytetään yleensä voimalaitoksen matalapainehöyryä. Sähköä tarvitaan talteen otetun hiilidioksidin paineistamiseen sekä pumppuihin ja puhaltimiin. Tarvittavan lämpöenergian määrään vaikuttavat höyryn määrä ja laatu sekä valitun liuottimen ominaisuudet ja sen määrä kierrossa. Liuottimen regeneroinnin jäljiltä lauhtu-

nut höyry on kylläistä vettä, jonka voi syöttää takaisin prosessivesilinjaan, mieluiten pisteeseen, jonka lämpötila on valmiiksi lähellä lauhteen lämpötilaa. (Keskitalo 2013, 86.)

Liuottimen regenerointiin tarvittava energia olisi taloudellisinta ottaa savukaasujen lämmöstä, sillä savukaasut on jäähdytettävä 40°C :een ennen kuin siitä voidaan erottaa hiilidioksidi. Kotkamillsin soodakattilan savukaasujen lämpötila on noin 170°C sähkösuotimen jälkeen. Kombikattilan savukaasujen lämpötila on huomattavasti matalampi, noin 70°C . Kotkamillsillä ei ole tällä hetkellä lämmön talteenottoa savukaasuista, joten siihen kannattaisi ryhtyä viimeistään hiilidioksidin talteenoton yhteydessä. Kuvassa 9 on annettu amiiniliuottimeen perustuvan absorption, polton jälkeisen talteenoton vaatimat energiamäärät, kun savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on 10 %.



Kuva 9. Talteenoton ja nesteyttämisen lämmön- ja sähkönkulutus (Sieborg et al. 2024) mukailten.

Kuvan 9 mukaisesti itse erotusprosessissa energiaa tarvitaan hiilidioksidin erotukseen absorptiolla (CO_2 absorption), regenerointiin lämmön avulla (CO_2 desorption, thermal) sekä erotuksen jälkeen paineistukseen ja kuivatukseen (CO_2 storage), jolla saadaan hiilidioksidi nestemäiseksi. Lämmön talteenotto on tässä huomioitu.

Yhteenlaskettuna prosessin sähköenergian tarve on $1,21 \text{ GJ/tCO}_2$. Hinnoitte-lun laskemiseksi sähköenergian tarve täytyy muuntaa yksikköön MWh, jolloin saadaan sähkötarpeeksi noin $0,34 \text{ MWh/tCO}_2$. Tästä voidaan laskea, että 100 ktCO_2 kapasiteetilla sähkötarve on noin $33\,500 \text{ MWh/a}$. Jos sähkön hin-tana käytetään Nordpoolin vuoden 2023 toteutuneen spot-hinnan keskiarvoa

56,61 €/MWh saadaan prosessin vuosittaiseksi sähkötarpeen hinnaksi noin 1,9 miljoonaa euroa.

Prosessin lämpöenergian tarve on 3,3 GJ/tCO₂ ja yksikköön MWh muunnetuna lämmöntarve on noin 91 500 MWh/a. Kun huomioidaan lämmön talteenotto kuvassa 9 esitetyllä tavalla, on lämpöenergian tarve noin 73 000 MWh/a. Kotkamills ei halua tähän työssä julkaistavan tuottamansa matalapainehöyryn hintaa, mutta laskuissa hintana pyydettiin käyttämään 60 €/MWh. Näin lasketuna lämpöenergian hinnaksi tulisi 4,4 miljoonaa euroa vuosittain. Lämmön talteenoton antama säästö olisi vuosi tasolla noin 1,1 miljoonaa euroa, toki lämmönvaihtimesta aiheutuu myös investointi- sekä ylläpitokustannuksia. Tällä laskelmalla oli tarkoitus osoittaa lämmön talteenoton vaikutus ylläpitokustannuksiin. Kappaleen pääasiallisena tarkoituksena oli selvittää talteenotto-prosessin vaatima lisääntynyt sähkö- ja lämpöenergian tarve, joka tulee huomioida integroitaessa hiilidioksidin talteenottolaitteistoa olemassa olevaan prosessiin. Nykyisen sähköverkon kapasiteetti näyttäisi riittävän laskelmien mukaisen hiilidioksidin talteenotto-prosessin tarpeisiin.

5.4 Polton jälkeinen talteenotto

Polton jälkeen tapahtuva talteenotto PCC (Post Combustion Capture) on tekniikka, jossa talteenotto tapahtuu käytännössä suoraan savupiipusta. Tämä tekniikka soveltuu jo olemassa oleviin teollisuuden laitoksiin sillä siinä itse prosessiin ei tarvitse kajota, vaan savukaasut johdetaan omaan kiertoonsa talteenotto-prosessia varten. Tämän niin kutsutun piipunpää-tekniikan sisällä on useita eri tekniikoita, joilla hiilidioksidi saadaan talteen. Kaikilla omat hyvät ja huonot puolensa. (Kajolinna 2022.)

Polton jälkeinen talteenotto vaatii vähiten muutoksia olemassa olevaan prosessiin ja se soveltuu matalan osapaineen savukaasuille. Biomassaa polttavissa voimalaitoksissa hiilidioksidin osapaine on luokkaa 10,1–12,2 KPa. (Kearns et al. 2021) Osapaineesta ja sen merkityksestä kerrotaan tarkemmin kustannusten yhteydessä. Jos hiilidioksidin osapaine on matala, on ainoa kaupallinen ja teollisessa mittakaavassa oleva erotustekniikka kemiallinen liuotin. Liuottimen miinuspuolena on sen regeneroinnin vaatima suuri lämpömäärä. Lämpöenergian vaatimus puolestaan huonontaa merkittävästi voimalaitoksen

hyötysuhdetta. Voimalaitosolosuhteissa hiilidioksidin talteenotto vaatii koko voimalaitoksen höyrypiirin integrointia ja laitoskonseptin optimointia, jotta hyötysuhteen pieneneminen jäisi mahdollisimman vähäiseksi. (Teir et al. 2011, 15.)

Polton jälkeen tapahtuva talteenotto on joustava ja helposti muunneltava keino saada teollisuuden hiilidioksidipäästöjä pienennettyä. Talteenottotekniikalla päästään lisäksi hyvin puhtausasteisiin hiilidioksidin osalta. Tämä tekniikka mahdollistaa hyvin myös osittaisen käyttöönoton esimerkiksi yksi piippu kerrallaan. Kaikkiin piippuihin ei tarvitse investoida samanaikaisesti. Se mataltaa mahdollisesti kynnystä ryhtyä ottamaan savukaasuista hiilidioksidia talteen. Piipunpää-tekniikalla talteenotto säilyy prosessista erillisenä toimintona, joka mahdollistaa talteenottoasteen säädön ajon aikana. Talteenoton voi myös ohittaa kokonaan, jos markkinatilanne sitä vaatii. Nämä ominaisuudet tekevät talteenottotekniikasta houkuttelevan niin teknisesti kuin taloudellisestikin. (Aswathanarayana, et al. 2010, 73–75.)

Aker esittelee hiilidioksidin talteenottoon suunniteltuja moduuleja, joiden kapasiteetit ovat 40, 100 ja 400 ktCO₂/a. Kotkamillsin tarpeisiin voitaisiin ajatella kahta kapasiteetiltaan 100 ktCO₂/a olevaa moduulia. Yhden Just Catch™ 100-moduulin pinta-alaksi on ilmoitettu 19 x 24 metriä ja korkeudeksi 45 metriä. Pinta-alavaatimus kahdelle yksikölle olisi reilut 900 m² ja tilavuusvaatimus melko tarkalleen 41 000 m³. Moduulit toimitetaan tehtaalle rekkakuljetuksena ja esimerkiksi Kotkamillsin tarpeisiin sopivalle moduulille luvataan toimitusajaksi alle 24 kuukautta. (Aker Carbon Capture 2024.)

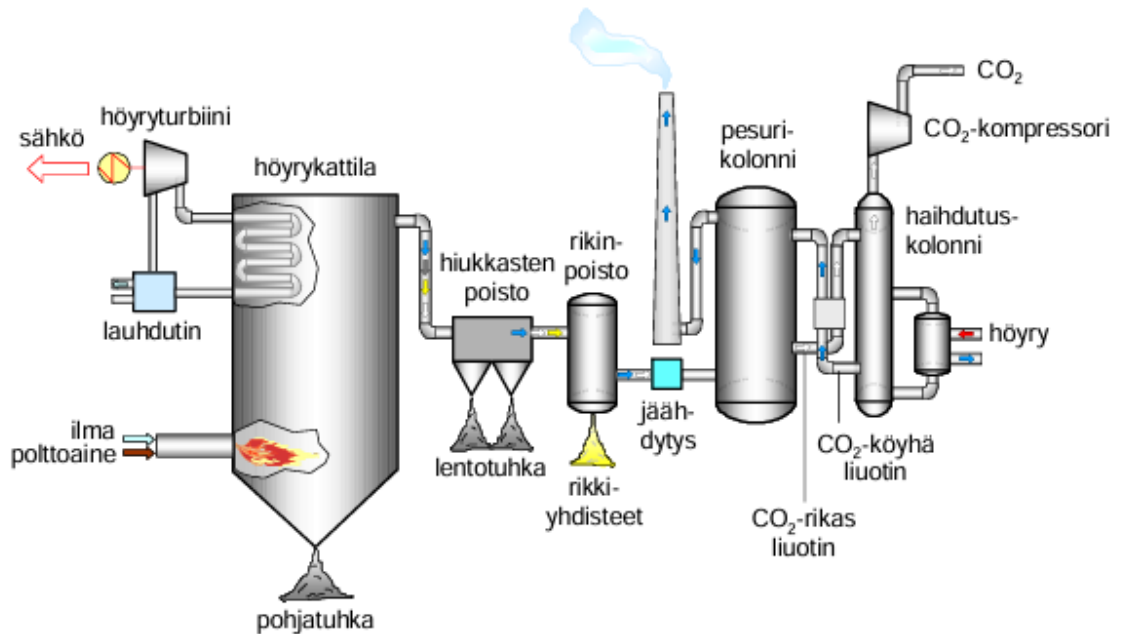
Valmiilla moduuleilla toteutettava hiilidioksidin talteenottolaitos on kompakti eikä aiheuta pitkäkestoista liikennöintiä tehdasalueella verrattuna paikan päällä rakennettaviin verrokkeihinsa. Toisaalta voidaan todeta, että aiemmin taulukossa 2 esitetty komponenttien suunnittelukoko, on samaa kokoluokkaa Akerin tarjoamien moduulien kanssa.

Riippumatta siitä miten polton jälkeen tapahtuva hiilidioksidin talteenotto toteutetaan, on erittäin tärkeää huomioida riittävällä tavalla olemassa oleva prosessi. Talteenotto tulee tehdä niin, että se on potentiaalisessa vikatilanteessa

mahdollista ohittaa niin, ettei vaikutusta muihin prosesseihin ole. Kuvatun kaltaisen toteutus on nimenomaan polton jälkeisessä talteenotossa yksinkertainen toteuttaa, kun savukaasut käsitellään vasta sähkösuodinten jälkeen.

Amiiniliuottimeen perustuva erotustekniikka

Polton jälkeisessä talteenotossa hiilidioksidi otetaan talteen poltossa syntyneistä savukaasuvirroista. Yleisimmin erottamisessa käytetään kemiallisia liuottimia, jotka absorboivat hiilidioksidin ja myöhemmin vapauttavat sen, tuottaen puhdasta hiilidioksidia nesteytettäväksi. Kuvassa 10 on esitelty liuottimeen perustuva erotustekniikka pääpiirteittäin. Talteenotto prosessi vaatii savukaasujen esikäsittelyä. Ennen absorbointia hiilidioksidi jäähdytetään ja epäpuhtaudet poistetaan. Poistettavia komponentteja ovat hiukkaset sekä typen ja rikin oksidit, jotka muuten reagoisivat liuottimen kanssa hajottaen sen. Jäähdytys tapahtuu lämmönvaihtimessa tai hiilidioksidin erotuspesurissa. Käytetyin menetelmä talteenotolle on amiiniabsorptio, jossa absorptioliuoksena käytetään monoetanoliamiineja (MEA), dietanoliamiineja (DEA) tai näiden seoksia. Käytetyin ja kypsien absorptiomenetelmä ovat monoetanoliamiinit. Absorbointi tapahtuu pesurissa, josta neste johdetaan haihdutuskolonnein. Hiilidioksidi erotetaan liuottimesta kaasumaiseksi haihdutuskolonnissa lämmittämällä TSA (Temperature-Swing Adsorption), paineenmuutoksella PSA (Pressure-Swing Adsorption) tai molemmilla edellä mainituilla tavoilla. Regeneroinnin jälkeen liuotin johdetaan takaisin pesuriin uudelleen käytettäväksi. Kemiallisten liuottimien miinuspuolena voidaan pitää suurta regenerointi energiaa sekä niiden haitallisia ympäristövaikutuksia. (Cook et al. 2018, 79–81; Teir et al. 2011, 13–14.)



Kuva 10. Kemialliseen liuottimeen perustuva hiilidioksidin talteenotto savukaasuista (Teir et al. 2011)

Amiiniliuotinten rinnalla kehittymässä on kaliumkarbonaattipohjainen erotustekniikka, joka olisi ainakin ympäristövaikutusten näkökulmasta amiineja parempi ratkaisu. Kaliumkarbonaatti absorptioprosessi on tutkimusten perusteella erittäin energiatehokas. Amiiniliuottimeen verrattuna kaliumkarbonaatti kuluttaa vähemmän energiaa sekä absorptiokyky ja reaktionopeus ovat paremmat. Kaliumkarbonaatin käytössä ongelmana on toistaiseksi rikin oksidit savukaasuissa, sillä karbonaatti reagoi mieluummin rikkioksidin kanssa ja siten vähentää kykyä absorboida hiilidioksidia savukaasuista. (Keskitalo 2013, 32.)

CO₂ Solutions, jonka nykyään omistaa italialainen Saipem, on kehittänyt uutta absorptiotekniikkaa, joka pohjautuu kalsiumkarbonaattiliuottimiin. Kalsiumkarbonaatin hidasta absorbointia on nopeutettu lisäämällä siihen patentoitua, biologisesti johdettua entsyymiä, joka toimii katalyyttinä ja nopeuttaa hiilidioksidin siirtymistä liuottimeen. Erotusprosessin kohonnut kapasiteetti tarkoittaa sitä, että halutut talteenottomäärät voidaan saavuttaa fyysiseltä kooltaan pienemmällä laitteistolla ja alhaisemmilla kustannuksilla matalan osapaineen soveluksissa. (Kearns et al. 2021.)

Talteen otetun hiilidioksidin laatuvaatimukset

Vaatimukset talteen otetun hiilidioksidin laadulle perustuvat siihen, mihin hiilidioksidia aiotaan käyttää. Lienee sanomattakin selvää, että jos tarkoitus on varastoida hiilidioksidi maankuoreen, eivät laatuvaatimukset ole kovin tarkat. Koska Kotkamillsillä on ajateltu tuottaa talteen otetusta hiilidioksidista synteettistä maakaasua, tarkastellaan seuraavaksi mitä tulee ottaa huomioon laadullisesti.

Savukaasut sisältävät hiilidioksidin lisäksi typpeä, happea, rikin ja typen oksideja sekä hiukkasia, jotka tulee erotuksen yhteydessä poistaa esimerkiksi korroosion välttämiseksi. Hiilidioksidin kuljettaminen putkiverkostossa tapahtuu superkriittisessä olomuodossa, jolloin kaasuun seostuneiden epäpuhtauksien vaikutus kaasun kokoonpuristuvuuteen on huomattava. Tämä vaikuttaa myös putken mitoitukseen sekä materiaalivalintaan. Epäpuhtaudet vaikuttavat myös putkiston kapasiteettiin, kompressorien tehon tarpeeseen sekä potentiaalisiin paineennostoasemien sijoituksiin. Pelkkä veden poistaminen kuljetettavasta hiilidioksidista auttaa välttymään pahimmilta korroosio-ongelmilta. Talteen otetulle hiilidioksidille ei ole määritelty yleisiä laatuvaatimuksia. Taulukossa 3 on koostettuna laatusuosituksia talteen otetulle hiilidioksidille putki- ja laivakuljetuksen sekä varastoinnin ja EOR (Enhanced Oil Recovery) osalta. EOR on tekniikka, jossa öljyntuotantoa tehostetaan painetta lisäämällä. Hiilidioksidia pumpataan öljykenttiin, jossa öljynpumppaus on aiheuttanut paineen alenemista. Näitä VTT:n koostamia laatusuosituksia voidaan pitää suuntaa antavina arvoina hiilidioksidin puhtaudelle. (Teir et al. 2011, 30–31.)

Taulukko 3. Kootut suositukset talteen otetun hiilidioksidin puhtaudelle (Teir et al. 2011, 31)

		Laatusuositus	Putkikuljetus	Laivakuljetus	Varastointi	EOR
Vesi	H ₂ O	<20–500 ppm	500 ppm	50 ppm	-	<20 ppm
Haihtuvat yhdisteet	N ₂	<300 ppm (EOR) – 4 % (kaikki haihtuvat)	<4 % (kaikki haihtuvat)	<0,2–0,5 % (kaikki haihtuvat)	<4 % (kaikki haihtuvat)	<300–4 800 ppm
	O ₂	<100 ppm (EOR) – 4 % (kaikki haihtuvat)				<100–1 000 ppm
	Ar	<0,2–4 % (kaikki haihtuvat)				-
	H ₂	<0,2–4 % (kaikki haihtuvat)				-
	CH ₄	<0,2–4 % (kaikki haihtuvat)				<2%
Haitalliset yhdisteet	H ₂ S	<200–9 000 ppm	200 ppm	200 ppm	-	<1 500–9 000 ppm
	CO	<10–2 000 ppm	2 000 ppm	2 000 ppm	-	<10–1 000 ppm
Rikin ja typen oksidit	NO _x	<50–100 ppm	100 ppm	100 ppm	-	<50 ppm
	SO ₂	<10–100 ppm	100 ppm	100 ppm	-	<10 ppm
Hiili-dioksidi	CO ₂	>95,5–99,5 %	>95,5 %	> 99,5 %	>95,5 %	>95,5 %

Jos hiilidioksidi otetaan talteen ja myydään ulkopuoliselle toimijalle jatkojalostusta varten, on syytä varmistaa laatuvaatimukset kyseiseltä toimijalta. Putkikuljetuksessa epäpuhtaudet eivät todennäköisesti tuota toiminnallisia- tai ympäristöongelmia. Epäpuhtauksien poisto voi silti olla tarpeen, sillä ne muuttavat hiilidioksidin käyttäytymistä esimerkiksi lisäämällä kuljetuksessa ja varastoinnissa kompressointityön määrää. Epäpuhtaudet aiheuttavat lisäksi sen, että hiilidioksidin varastointi vaatii suurempaa painetta. Epäpuhtaudet lisäävät myös kaasuvirran määrää, joten monestakin syystä on järkevää puhdistaa hiilidioksidi mahdollisimman huolellisesti. (Teir et al. 2011, 29.)

6 KUSTANNUKSET

Hiilidioksidin talteenoton kustannukset muodostuvat hiilidioksidin savukaasuista erottamiseen tarvittavan tekniikan investointi- sekä ylläpitokustannuksista. Suurin kustannus on ymmärrettävästi pääomainvestointi tarvittavaan laitteistoon ja sen asennukseen. Käyttöön liittyvistä kustannuksista voidaan

nostaa esiin energiankulutus, joka tässä tapauksessa perustuu voimalaitoksen omakäyttöenergiankulutuksen kasvuun.

Tuoreessa Suomen Ilmastopaneelin raportissa Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa on esitetty laitospohjaisia arvioita hiilidioksidin talteenottokustannuksista kirjallisuuteen perustuen. Hiilidioksidin osapaine on arvioitu laitoksesta saatujen tietojen tai laitostyyppin perusteella. Hiilidioksidin osapaineella on merkittävä rooli laitoksen talteenottokustannuksen laskennassa. Mitä suurempi osapaine on, sen alhaisemmat ovat talteenoton kustannukset. Osapaineesta ja sen merkityksestä kerrotaan lisää omassa luvussa. (Kujanpää et al. 2023, 12.)

Suomen Ilmastopaneelin raportissa esitellyt kustannuslaskelmat perustuvat Global CCS Institutin julkaisemaan raporttiin Technology Readiness and Costs of CCS, jossa on arvioitu päästölaskelmia teollisuuden eri päästölähteille (Kearns et al. 2021). Raportissa talteenottotekniikkana on käytetty amiiniluottimeen perustuvaa tekniikkaa. Tässä työssä esitellyt kustannuslaskelmat ovat niin ikään amiinipohjaiseen talteenottotekniikkaan perustuvia.

Suomen ilmastopaneelin raportissa teknologisten hiilinielujen mahdollisuuksista ja edistämisestä löytyy taulukko, jossa eri teollisille päästölähteille on laskettu mittakaavakerroin hiilidioksidin talteenoton yksikkökustannuksille. Referenssitietoina on käytetty Global CCS Institutin arvioita. Talteenottokustannusten arvioinnissa on käytetty olettamuksena, että 90 % päästölähteen hiilidioksidista saadaan talteen. Lisäksi arvioinnissa on oletettu mahdollisuus useiden pistepäästölähteiden yhdistämisestä yhdeksi virraksi talteenottoa varten. (Kujanpää, et al. 2023, 11.)

Kustannusten suuruutta tarkasteltaessa on hyvä muistaa, että ne ovat suuntaa antavia. Hiilidioksidin talteenoton kustannusten voidaan olettaa laskevan tekniikoiden kehittymisen ja talteenoton yleistymisen myötä. Kotkan maantieteellinen sijainti rannikolla voidaan nähdä hyvänä asiana kuin myös itse tehtaan sijainti lähellä satamia ja raideverkostoa. Kustannuksiin tulee lähitulevaisuudessa vaikuttamaan EU:n tasolla tehtävät päätökset mm. hiilidioksidin standardisoinnista, hinnoittelusta sekä päästökaupan tulevaisuudesta. Toisaalta sekä Euroopan, että kansallisella tasolla tullaan toivottavasti näkemään

investointeja hiilidioksidin talteenottoa sekä varastointia edistävän infrastruktuurin luomiseksi.

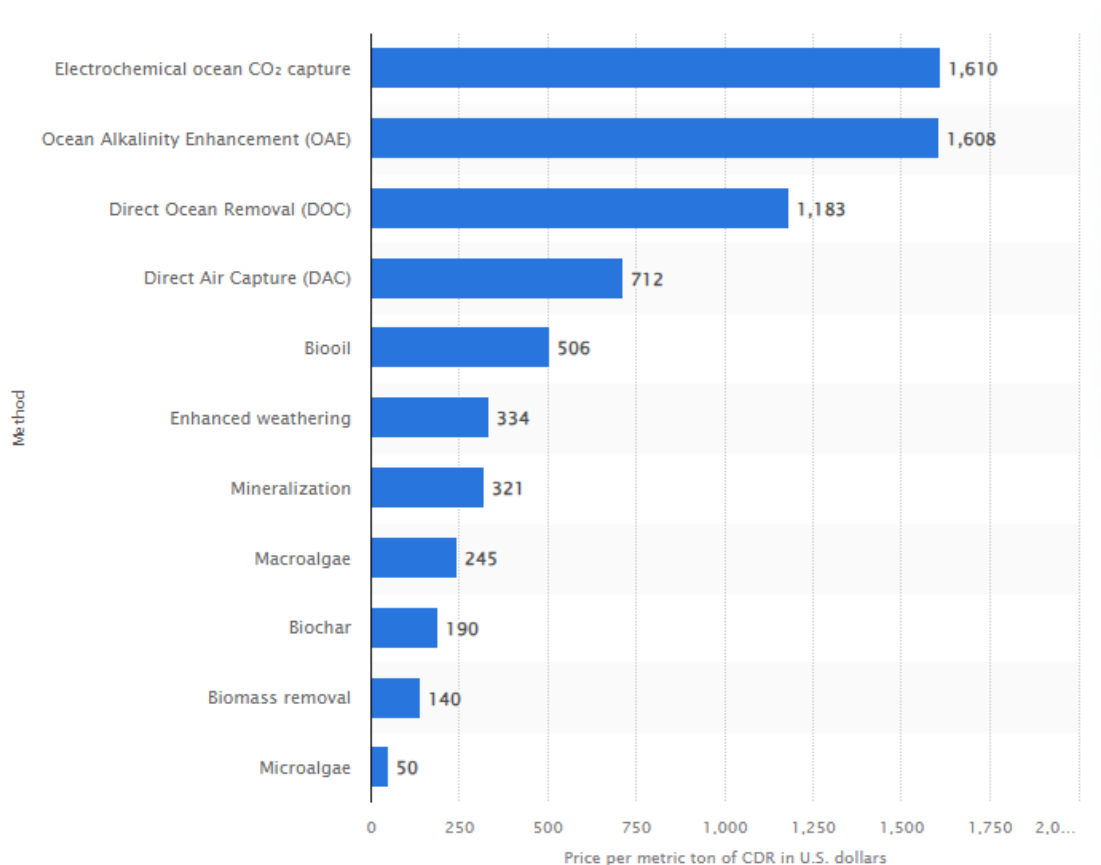
Myös vetytalouteen liittyvä sääntely vaikuttaa merkittävästi hiilidioksidimarkkinoihin. Vetyklusterit, jotka sijoittuvat maantieteellisesti strategisesti valitulle alueelle voivat merkittävästi alentaa etenkin talteen otetun hiilidioksidin kuljetuskustannuksia, jos useat yritykset voivat käyttää yhteisiä putkistoja.

Tässä työssä kustannukset on tarkoituksen mukaisesti laskettu yläkanttiin. Talteenottotavat ovat tekniikasta riippumatta verrattain tuoreita ainakin teollisessa mittakaavassa, joten kustannusarvioiden vaihteluvälit ovat suuria sekä vaihtelevat paljon eri lähteiden välillä. Prosessin eri osa-alueiden kustannukset talteen otettua hiilidioksiditonnia kohden on yritetty haarukoida mahdollisimman realistiselle tasolle. Huomionarvoista on, että kansainvälisissä lähteissä ei kustannusarvioissa todennäköisesti ole huomioitu esimerkiksi talteenotto prosessin hukkalämmön hyödyntämistä kaukolämpöverkossa. Suomessa kaukolämpöverkko on laaja ja sen vuoksi kustannuksia on mahdollista saada alas suhteessa kansainvälisiin arvioihin.

Päästöjen kompensointi

Vapaaehtoisessa päästökaupassa perusajatuksena on se, että ilmastonmuutosta voidaan hillitä päästöjen kompensoinnilla, poistamalla hiiltä ilmakehästä, CDR (Carbon Dioxide Removal). Kompensointiin on käytettävissä hyvitysyksikkö, joka vastaa yhtä talteen otettua hiilidioksiditonnia. Päästöjen kompensointi on kasvava trendi, kun toimijat ympäri maailman pyrkivät hyvittelemään vuosien saatossa aiheuttamiaan päästöjä tai pyrkivät hiilinegatiivisuuteen investoimatta itse varsinaiseen hiilidioksidin talteenottoon. Yleinen ajatus on, että päästöjen kompensoinnilla kumotaan tiettyyn päästömäärään liittyvä ilmastohaitta poistamalla vastaava määrä kasvihuonekaasupäästöjä toisaalla. Toisin sanoen jonkun talteen ottamasta hiilidioksidista ja sen pitkäaikaisesta tai lopullisesta varastoimisesta maksetaan rahaa ja vastineeksi saadaan vähennettyä hiilidioksidia omasta hiilijalanjäljestä. (Ympäristöministeriö 2021.) Taulukosta 4 löytyy globaalin tilastotieteen alustan keräämää dataa hiilidioksidin hinnoittelusta kompensointiä varten.

Taulukko 4. Myydyn, vältetyn hiilidioksiditonin keskihinnat 2023 lähtien (Statista 2024)



Taulukosta nähdään, että biomassalla tuotetun, vältetyn hiilidioksiditonin keskihinta on ollut 140 dollaria. Euroiksi muutettuna tämänhetkisellä valuuttakursilla (3.4.2024) hinta on 129,86 euroa. Hiilidioksidin talteenoton kustannuksia arvioitaessa on hyvä pitää mielessä päästöoikeuden sekä päästökompensointihinnat.

6.1 Osapaine

Osapaineen vaikutus talteenottoprosessissa on olennainen. Daltonin laki todistaa kaasuseosten käyttäytymistä. Sen mukaan kaasuseoksen kokonaispaine on yhtä suuri kuin kunkin kaasulajin osapaineen summa yhtälön 3 mukaisesti. Hiilidioksidin talteenotossa sen osapaine vaikuttaa prosessilaitteiston kokoon, talteenoton energiantarpeeseen sekä käytettävissä oleviin tekniikoihin. Mitä korkeampi osapaine on, sitä nopeammin hiilidioksidimolekyylit siirtyvät savukaasuista liuottimeen. Molekyylien liikkeessa nopeammin on talteenottolaitteisto fyysiseltä kooltaan pienempi, mikä tarkoittaa myös pienempiä investointikustannuksia. Korkean osapaineen helpottaessa talteenottoa prosessia

tarvitaan prosessiin energiaa vähemmän, mikä puolestaan pienentää käyttö-kustannuksia. (Kearns et al. 2021)

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 \dots \quad (3)$$

Lähdekirjallisuudessa soodakattilassa hiilidioksidin osapaineeksi on ilmoitettu 10–15 kPa lähteestä riippuen, eli 0,10–0,15 baaria. Polton jälkeisessä talteenotossa savukaasun paine on lähellä normaalia ilmakehän painetta 1 atm, eli hyvin lähelle 1 baaria. Jos savukaasun hiilidioksidipitoisuus on esimerkiksi 13 % ja savukaasun kokonaispaine 1 baaria on yhtälön 3 mukaisesti hiilidioksidin osapaine silloin 0,13 baaria. Maakaasua poltettaessa hiilidioksidin osapaine on vain 0,08–0,10 baaria, mutta happipoltossa hiilidioksidin osapaine on välillä 0,80–0,95 baaria. Paineen lisääminen keinotekoisesti lienee mahdollista, jolloin myös hiilidioksidin osapaine kasvaa ja erotus savukaasuista helpottuu. Aiheen rajaamisen vuoksi lähempi tarkastelu jätettiin toteuttamatta.

6.2 Talteenoton kustannukset

Aineistossa mittakaavakertoimeksi soodakattilalle, jossa vuosittaiset hiilidioksidipäästöt ovat 500 ktCO₂/a, on annettu -0,128. Talteenoton kustannukset voi aineistossa esitettyjen tietojen pohjalta laskea yhtälöllä 4.

$$K_{talteenotto} = K_{talteenotto,ref} \left(\frac{m}{m_{ref}} \right)^{S_t} \quad (4)$$

jossa	$K_{talteenotto}$	talteenottokustannus	[€/tCO ₂]
	m	talteenotettavan CO ₂ :n todellinen määrä	[kt/a]
	S_t	prosessikohtainen mittakaavakerroin	

Yhtälössä on talteen otettavan hiilidioksidin määräksi päätetty 100 ktCO₂/a ja siinä käytetty talteenottoasteena 90 %. Näillä lähtötiedoilla laskettuna yhden hiilidioksiditonin talteenottokustannukset olisivat 82,2 €/tCO₂. Lähteestä ei il-

mene mikä vaikutus talteen otettavan hiilidioksidin referenssimäärällä on mit-takaavakertoimeen, mutta 500 ktCO₂/a sijaan 300 ktCO₂/a määrällä lasket-tuna kustannukset olisivat 77 €/tCO₂ pelkälle talteenotolle. Kustannusarviot ovat siis talteenoton ylläpitokustannuksia, investointikustannukset arvioidaan myöhemmin omassa kappaleessaan.

Norjalainen jätteenpolttoyritys Forus Energigjenvinning (myöh. Forus) on teh-nyt yhteistyösopimuksen niin ikään norjalaisen Aker Carbon Capture -yrityk-sen (myöh. Aker) kanssa hiilidioksidin talteenottoa ja nesteytystä varten. Ake-rin talteenottoprosessi perustuu absorptioon ja liuottimena käytetään amiinia, joka on tehokas ja turvallinen. Forusin selvityksen mukaan ylläpitokustannuk-set hiilidioksidin talteenotolle ja nesteyttämiseksi, eli paineistukselle, 100 ktCO₂/a kapasiteetilla olisivat noin 60 – 105 €/tCO₂. Kustannusarvio sisältää lämmön talteenoton. (Forus CO₂ 2022) Yhtälöllä 4 lasketut talteenottokustan-nukset asettuvat Forusin ilmoittamaan kustannusväliin, kun siihen lisätään pai-neistuksen kustannukset, jotka lasketaan seuraavassa kappaleessa.

6.3 Paineistuksen kustannukset

Hiilidioksidin talteenoton jälkeen seuraa sen paineistaminen logistisesti kus-tannustehokkaan muodon mahdollistamiseksi. Paineistamisen kustannukset voidaan laskea talteen otettavissa olevan hiilidioksidin määrän funktiona yhtä-löllä 4 (Kujanpää et al. 2023, 13–14). Paineistuksen kustannuksia tarkemmin tarkasteltaessa voidaan todeta, että kustannuksiin vaikuttaa kuljetus- ja varas-tointitapa sekä niiden asettamat vaatimukset hiilidioksidin paineelle. Kompres-sointiin eli paineistukseen liittyy olennaisena osana myös kuivaus. Kuivauk-sella ehkäistään mm. korroosiota putkistossa. Paineistus ja kuivaus on moni-vaiheinen prosessi, jonka joka vaiheessa paineistetaan, jäähdytetään sekä poistetaan vettä.

$$K_{paineistus} = \frac{CAPEX + OPEX_{sähkö} + OPEX_{ylläpito} + OPEX_{työvoima}}{m} \quad (4)$$

$$K_{paineistus} = \frac{CAPEX_{ref} \left(\frac{m}{m_{ref}} \right)^{Sp} + m * p_{sähkö} * E_{sähkö} * 1,6 + 4\% CAPEX}{m}$$

jossa	$K_{paineistus}$	paineistuksen kustannus	[€/tCO ₂]
	CAPEX	investointikustannuksen vuosierä	[€/a]
	OPEX	käyttökustannus	[€/a]
	m	talteenotettavan CO ₂ :n määrä	[kt/a]
	S_p	mittakaavakerroin paineistuslaitteistolle	
	$p_{sähkö}$	sähkön hinta	[€/kWh]
	$E_{sähkö}$	sähkön kulutus	[kWh/tCO ₂]

Suomen ilmastoraportissa on käytetty referenssinä talteen otettavalle hiilidioksidille 400 ktCO₂/a. Laskennassa on käytetty 100 ktCO₂/a talteenottomäärää 90 %:n talteenottoasteella. Sähkön hintana on laskennassa käytetty 0,057 €/kWh, joka oli keskimääräinen Nordpoolin spot-hinta vuodelta 2023. Prosessin sähkönkulutukseksi on ilmastoraportin aineistossa annettu 105 kWh/tCO₂. Investointikustannukseksi on 400 ktCO₂/a kokoluokassa annettu 28 miljoonaa euroa niin, että vuosierä on 2 693 670 €/vuosi. Investointikustannus sisältää laitekustannukset asennuksineen. Investointikustannuksen mittakaavakerroinena on 0,65 ja ylläpitokustannukseksi on laskettu 4 % investointikustannuksista. Työvoimakustannukset on lähteen alkuperäisestä yhtälöstä poiketen laskettu kertoimella 1,6 suhteessa talteen otettuun päästömäärään. Tämä tieto on saatu yhtälön laatijalta (Onni Linjala) ja yhtälö on muokattu vastaamaan todellista laskentaa. Näillä lähtötiedoilla paineistuksen kustannukseksi yhtälöllä 4 saadaan 20,20 €/tCO₂.

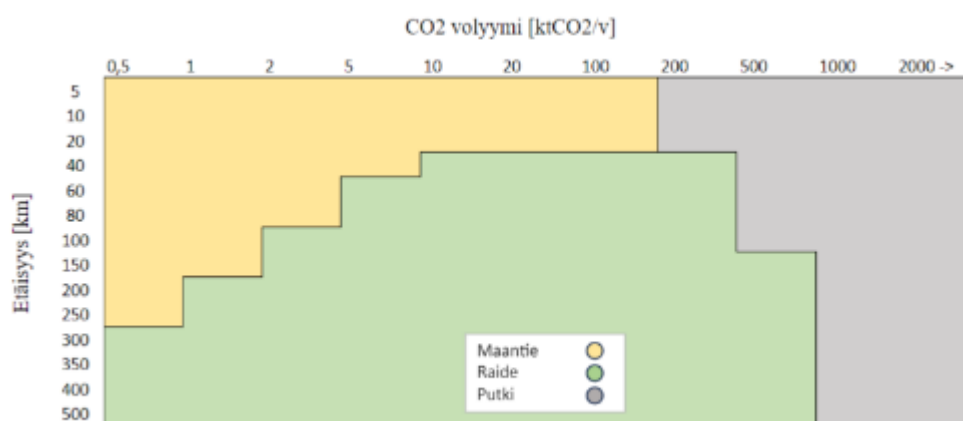
Eri lähteissä puhutaan talteenottokustannuksista hiilidioksiditonnia kohden, mutta niissä on usein yhdistetty sekä itse talteenoton käyttökustannukset, että paineistuksen käyttökustannukset. Talteenottokapasiteetilla 100 ktCO₂/a ja talteenottoasteella 90 % sekä referenssi kapasiteetin ollessa 300 ktCO₂/a saataisiin yhteenlasketuksi ylläpitokustannukseksi edellä esitetyillä yhtälöillä lasketuna 97,2 €/tCO₂. Tämä kustannus on selvästi linjassa esimerkiksi edellä esitetyn Forusin talteenoton ja paineistuksen kustannusarvion kanssa. Laskennan lopputulos tukee myös sitä tietoa, että kun päästöoikeuden hinta lähestyy 100

euroa hiilidioksiditonnia kohden, alkaa hiilidioksidin talteenotto olla kannattavaa. Samalla kannattaa pitää mielessä, että biomassan poltossa talteen otetusta hiilidioksidista maksetaan jo nyt keskimäärin 130 €/tCO₂ kun se varastoidaan kompensointitarkoituksessa.

6.4 Kuljetuskustannukset

Suomi ei geologisesti sovellu hiilidioksidin pysyvään varastointiin. Norjassa eri päästölähteistä talteen otettua hiilidioksidia varastoidaan meren pohjaan, maankuoren alle, jossa sen väitetään pysyvän lähes ikuisesti. Tutkijoiden mukaan hiilidioksidi muuttuisi ajan myötä kiinteäksi maankuoren alla, mutta tästä ei ole vielä täyttä varmuutta. Geologisten vaatimusten takia varastointitarkoituksessa talteen otettu hiilidioksidi tulisi nesteyttää Kotkassa ja kuljettaa lähimpään satamaan, josta se siirrettäisiin laivalla joko päätteeseensä tai lähimpään satamaan, josta olisi putkiyhteys suoraan varastoalueelle.

Kuvassa 11 on esitetty kustannustehokkaimmat tavat hiilidioksidin kuljetukseen maalla. Jos talteen otettu hiilidioksidi kuljetettaisiin esimerkiksi Kotkan tai Haminan satamaan, olisi välimatka joka tapauksessa niin lyhyt, että taloudellisinta olisi kuljettaa maanteitse. Määrän lähestyessä 200:aa ktCO₂/a alkaa kustannustehokkuus kallistua putkikuljetuksen puoleen.



Kuva 11. Kustannustehokkaimmat CO₂ -kuljetusmuodot (LAB Pro 2023)

Kotkan Mussalon satama on herättänyt muutamien toimijoiden mielenkiinnon ja sijaintinsa vuoksi se olisi hyvä kohde myös Kotkamillsin tehtailla talteen otetulle hiilidioksidille. Hiilidioksidin kuljetuskustannukset riippuvat monesta tekijästä ja toivottavaa olisi saada infra kuntoon hiilidioksidin siirtoa varten. Mikäli

Mussaloon asettuu hiilidioksidin ympärillä toimivia yrityksiä, on hyvinkin mahdollista rakentaa hiilidioksidin kuljetukseen soveltuva infra yhteistyössä useamman tahon kanssa, kustannuksia jakaen. Mussalon satama sijaitsee Kotkamillsin tehtailta linnuntietä pitkin noin 5,5 km päässä ja maanteitse matka on noin 8 km.

Kuten sivulla 16 kerrottiin, on Nordic Ren-Gasin hankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelmassa arvioitu hiilidioksidia korkeintaan 97 ktCO₂/a kapasiteetilla talteen ottavan laitoksen ympäristövaikutuksia. Kyseisellä kapasiteetilla nesteytettyä hiilidioksidia kuljettavan raskaan liikenteen yhdensuuntaisen liikenteen vuorokausimääräksi arvioitiin 8–12 raskasta ajoneuvoa. Vaikka kuvan 11 mukaan kustannustehokkain tapa olisi kuljetus maanteitse, on kuljetuksen kustannuksia hankala arvioida. Koska tässä vaiheessa ei tiedetä kenen maksettavaksi kuljetuskustannukset jäävät, on päädytty selvittämään ainoastaan putkikuljetuksen kustannus.

Putkikuljetuksessa hiilidioksidin käyttöpaine on välillä 80–150 baaria. Kuljetettavalle hiilidioksidille on yleensä asetettu laatuvaatimuksia jatkokäyttäjän puolelta, mutta yleisiä standardeja talteen otetun hiilidioksidin laadusta ei toislaiseksi ole. Edellä mainitun lisäksi käytettävät materiaalit asettavat vaatimuksia esimerkiksi korroosion estämiseksi. Putkilinjoissa käytetään usein hiilimangaani-terästä. Putkilinjat voidaan valmistaa vaihtoehtoisesti ruostumattomasta teräksestä, mutta sen korkean hinnan takia käyttö hiilidioksidin kuljettamiseen tarkoitettussa putkistossa voi osoittautua kannattamattomaksi. (Teir et al. 2011, 38–39.)

Talteen otettu hiilidioksidi voidaan siirtää talteenottopaikalta jatkokäsittelyyn joko putkiverkkoa pitkin tai säiliöissä esimerkiksi laivalla, junalla tai maanteitse. Lyhyillä siirtomatkoilla kuljetus maantietä pitkin voi olla kustannustehokasta ja perusteltua. Maanteitse kuljettaminen tulee kyseeseen myös tilapäisenä tapana, kun putkiverkkoa ei ole vielä rakennettu. Hiilidioksidin kuljetuskustannus muodostuu eri tekijöistä, kuten kohteen etäisyys, kuljetetun hiilidioksidin määrä, sekä taustatekijät, kuten olemassa oleva verkosto tai putkilinjan pääomakustannukset. Suomen ilmastopaneelin raportin laskentakaava putkikuljetuskustannuksille (yhtälö 5) perustuu kirjallisuudessa esitettyihin yk-

sikkökustannuksiin, sillä vielä ei ole riittävästi tietoa toteutuneista investoinneista ja niiden kustannuksista. Yhtälöllä saadaan arvio kustannuksesta, joka pohjautuu kuljetuksen ensimmäisten kaupallisten demonstraatioiden jälkeiseen kaupalliseen tasoon (Kujanpää et al. 2023, 14).

$$A_{putki} = 0,076149 * B^{-0,504135} * C \quad (5)$$

jossa	A_{putki}	putkikuljetuskustannus	[€/tCO ₂]
	B	talteenottomäärä	[MtCO ₂ /a]
	C	kuljetusmatka	[km]

Yllä olevalla kaavalla laskettuna 10 kilometrin kuljetusmatka 100 ktCO₂/a eli 0,1 MtCO₂/a talteenottomäärällä tulisi maksamaan noin 2,4 €/tCO₂, eli vuosikustannus olisi 240 000 €. Lienee sopimuksesta kiinni, että kuka vastaa kuljetuskustannuksista, toisin sanoen vastaisiko Kotkamills hiilidioksidin kuljetuksen kustannuksista ulkopuoliselle toimijalle, maksaisiko vastaanottava taho kustannukset vai jaettaisiinko ne. Joka tapauksessa kuljetuskustannuksen osuus kokonaisuudessa on ainakin tällä yhtälöllä laskettuna verrattain pieni.

6.5 Kannustimet ja investointikustannukset

Vuonna 2021 noin 18 prosenttia, eli karkeasti viidennes Suomen teollisuuden hiilidioksidipäästöistä, oli peräisin metsäteollisuuden massan- ja paperinvalmistuksesta. Nämä suomalaiset tuotantolaitokset ovat jo hyvin integroituneita ja päätuotteen rinnalla syntyviä sivuvirtoja ohjataan hyötykäyttöön esimerkiksi energiantuotannossa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023c.)

Kuten muuallakin metsäteollisuudessa, niin myös Kotkamillsin tehtailla merkittävä osa hiilidioksidipäästöistä muodostuu soodakattilan bioperäisistä päästöistä. Askelissa kohti hiilineutraaliutta on fossiilisen hiilidioksidin talteenotto ensisijaista. Millä soodakattilan hiilidioksidipäästöjen talteenottoa voisi sitten perustella? Ilmakehän kannalta hiilidioksidi on hiilidioksidia riippumatta siitä lähteestä se on peräisin. Biopohjaisen hiilidioksidin talteenotto mahdollistaa hiilinegatiivisuuden. Kotkamillsin tapauksessa soodakattilan päästöistä

valmistettaisiin synteettistä metaania, jolla voitaisiin korvata maakaasu polttoaineena ja sitä kautta vähentää fossiilisia hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidi saataisiin käytännössä kiertoon omalla tehtaalla.

Kuten aiemmin on todettu, niin hiilidioksidille ei ole määritelty hintaa, mutta samalla odotetaan yritysten tekevän merkittäviä investointeja sen talteen ottamiseksi. Investoinnin kannattavuuslaskelmia on liki mahdotonta tehdä luotettavasti, mikäli työkalut ovat puutteelliset. Euroopan komission marraskuussa 2022 tekemän ehdotuksen hiilenpoistojen sertifiointista on tarkoitus edistää EU:n ilmastoneutraaliustavoitteeseen pääsemistä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023a).

Hiilidioksidin talteenoton standardisoiminen ja sääntely toiminnan yhdenmuikaistamiseksi EU:n tasolla olisi merkittävä tekijä talteenoton houkuttelevuuden kannalta. Tällä hetkellä investointeihin ei uskalleta ryhtyä siksi, että ei tiedetä, millaiseksi sääntely muotoutuu ja minkälainen liiketoimintamalli olisi kannattava. Onneksi tilanne on tunnistettu EU:n tasolla ja yrityksille on tällä hetkellä tarjolla jonkin verran erilaisia rahoitus- ja tukimalleja. Varsinaisia suoria taloudellisia kannustimia hiilinielujen toteuttamiseen ei Suomessa tällä hetkellä ole.

Naapurimaassamme Ruotsissa, jossa monessa asiassa ollaan Suomea edellä, ollaan käynnistämässä käänteistä huutokauppaa biopohjaisella hiilidioksidilla tuotetuille negatiivisille päästöille. Huutokaupassa valtio kutsuu toimijoita tekemään tarjouksia hiilenegatiivisten päästöjen tuottamisesta. Kilpailun voittaa se toimija, joka tuottaa edullisimmilla kustannuksilla lupaamansa määrät negatiivisia päästöjä. Käänteisessä huutokaupassa tuotetut päästövähennykset kuuluvat Ruotsin valtiolle, mutta paikallinen energiaviranomainen on ehdottanut huutokaupan kehittämistä niin, että huutokaupan piiriin kuuluvat toimijat saisivat itse myydä miinusmerkkisiä päästöjään vapaaehtoisille markkinoille niin sanottuina ”ilmastotekoväittäminä”. Ruotsin mallissa huutokaupataan ainoastaan hankkeita, jossa bioperäinen hiilidioksidi varastoidaan pysyvästi maaperään. (Kujanpää et al. 2023, 39.) Ruotsin tapaa käänteisestä huutokaupasta voisi varmasti soveltaa Suomessa käytettäväksi ja ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi täytyisi järjestelmään sisällyttää myös talteen otetun hiilidioksidin hyödyntäminen.

Vihreän siirtymän hankkeille on mahdollista hakea rahoitusta EU:n elpymis- ja palautumistukivälineen RRF:n kautta. Myös Euroopan aluekehitysrahasto EAKR sekä Euroopan sosiaalirahasto ESR tarjoavat rahoitusta. Kansallisella tasolla rahoitusta myöntävät Business Finland, työ- ja elinkeinoministeriö, ympäristöministeriö sekä esimerkiksi maa- ja metsätalousministeriö ja ELY-keskukset. Vihreän siirtymän hankkeiden rahoituksen taustalla on tavoite nopeuttaa fossiilisesta energiasta luopumista sekä luoda uutta kasvua. (ELY-keskus 2022.)

Esimerkkinä valtion tarjoamista tuista voidaan todeta kristiinankaupunkilaisen Koppö Energia Oy:n saaneen loppuvuodesta 2023 lähes 27 miljoonan euron suuruisen investointituen uusiutuvan metaanin tuotantoinvestointiin ja Westenergy Oy Mustasaassa 20 miljoonan euron investointituen jätteenpolttolaitoksen hiilidioksidin talteenottolaitosta varten. Hankkeet kytkeytyvät toisiinsa niin, että jätteenpolttolaitoksella talteen otetusta hiilidioksidista (190 ktCO₂/a) tuotettaisiin liikennepolttoainetta Koppö Energian hankkeessa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023b.)

Investointikustannusten arviointiin on käytetty tietoja toteutuneiden hankkeiden kustannuksista. Erään suomalaisen yrityksen hiilidioksidin talteenotto-prosessin kapasiteetiksi on suunniteltu 80 ktCO₂/a. Puhelinkeskustelussa kyseisen yrityksen energiajohtaja kertoi tulevan hankkeen investointisummaksi 35–40 miljoonaa euroa hiilidioksidin talteenoton ja nesteytyksen osalta.

Aiemmin tässä työssä esitelty Twencen hanke, jossa hiilidioksidi otetaan niin ikään talteen jätteenpoltosta, on saanut Euroopan Komissiolta investointitukea 14,3 miljoonaa euroa. Twencen hankkeen kapasiteetti on 100 ktCO₂/a. Tukisumma on 37 % hankkeen arvioidusta kokonaisinvestoinnista, eli kokonaisinvestointi olisi hieman alle 39 miljoonaa euroa. (European Commission 2021.) Näistä kahdesta edellä mainitusta hankkeesta voidaan tehdä loppupäätelmä, että 100 ktCO₂/a talteenoton investointikustannukset olisivat luokkaa suuruusluokaltaan noin 40 miljoonaa euroa.

Suomen ilmastopaneelin raportissa teknologisten hiilinielujen yksikkökustannuksiksi rannikolla sijaitsevalle talteenottolaitokselle 119 €/tCO₂. Arvio on linjassa muiden lähteiden arvioiden kanssa. Raportissa todetaan arviolta 75–80

% kustannuksista olevan muuttuvia kustannuksia. Se tarkoittaa sitä, että jos hiilidioksidi pystytään myymään tai muuten hyödyntämään, voidaan myyntituloilla kattaa muuttuvia kustannuksia. Niin ikään omavaraisuus sähkön- ja lämmöntuotannossa auttaa vähentämään kustannusten määrää. (Kujanpää, et al. 2023, 39.)

Investoinnit vaativat merkittäviä pääomia, mutta taloudellista tukea on mahdollista saada. Varsinaisia taloudellisia kannustimia bioperäisen hiilidioksidin talteenotolle ei vielä ole. Bioperäinen hiilidioksidi on näennäisesti aina hiilineutraalia, mutta Suomessa on esitetty ehdotuksia kotimaisista kannustimista, joiden myötävaikutuksella saataisiin investointeja liikkeelle. Tämä johtaisi myös siihen, että Suomi voisi olla edelläkävijä bioperäisen hiilidioksidin talteenottajana. Kannustimia hiilinegatiivisuudelle luodessa täytyy huomioida myös se, ettei samalla luoda kannustimia puun käytölle kestävämmällä tasolla. (Sitra 2023.)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tarkasteltiin, millä tavalla Kotkamills voisi edetä tavoitteessaan alkaa ottaa hiilidioksidia talteen. Työn tavoitteiksi muodostui prosessin aikana kaksi pääseikkaa: tehdä esiselvitys talteenottotekniikoista ja niiden kustannuksista sekä tuottaa yksisivuinen esitys arvoketjusta (liite 1) Kotkamillsin näkökulmasta.

Kotkamillsin voimalaitoksen soodakattilan päästöt ovat biopohjaisia, eli puupohjainen aines on ennen polttamista sitonut yhtä paljon hiilidioksidia, kuin mitä siitä poltettaessa vapautuu. Ilmakehän ja ilmaston lämpenemisen kannaltahan hiilidioksidin alkuperällä ei ole merkitystä. Tämänhetkisellä sääntelyllä pyritään eroon fossiilisista polttoaineista, mutta se ei yksistään riitä ilmastotavoitteisiin pääsemiseen. Työn teettämisellä haluttiin valmistautua tulevaan, sillä hiilidioksidin talteenotto vaikuttaa väistämättömältä tulevina vuosina.

Hiilidioksidin talteenottoon Kotkamillsillä on kaksi vaihtoehtoa: happipolttotai polton jälkeinen talteenotto. Kummatkin tekniikat soveltuvat jo olemassa oleviin laitoksiin integroitavaksi. Happipolton tarkastelu jätettiin sivurooliin, sillä

hapen valmistamisen kustannukset ovat tällä hetkellä korkeat, eikä tekniikka pärjää taloudellisessa vertailussa polton jälkeiselle talteenotolle. Hapenvalmistuksen läpimurron myötä happipoltto voi yhtäkkiä olla hyvinkin kannattava talteenottotekniikka. Happipoltto on kemialliseen erottamiseen verrattuna ympäristöystävällinen vaihtoehto. Vaihtoehtoja löytyy ja siitä syystä myös muita potentiaalisia tekniikoita on esitelty pintapuolisesti.

Polton jälkeinen talteenotto perustuen erotukseen amiinipohjaisella liuottimella on yksiselitteisesti tunnetuin kaupalliseen ja teolliseen mittakaavaan soveltuva talteenottotekniikka. Kyseisellä tekniikalla tämänhetkiseksi hiilidioksidin talteenoton yksikkökustannukseksi käytön osalta saatiin tässä työssä laskettua 100 ktCO₂/a kapasiteetilla noin 97 €/tCO₂. Hinta pitää sisällään ylläpitokustannukset aina talteen otetun hiilidioksidin nesteytykseen saakka. Jos yksikkökustannukseen lasketaan mukaan kuljetus lähialueelle, on yksikkökustannus noin 100 €/tCO₂. Laskentaan ja sen tuloksiin vaikuttavat monet eri seikat, jolloin tuloksia voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina.

Voitaisiin ajatella, että Kotkamillsin kannattaisi aloittaa hiilidioksidin talteenotto esimerkiksi 100 ktCO₂/a:n kapasiteetilla. Investointikustannukset jäisivät tässä työssä esiteltyjen hankkeiden kapasiteetin ja investointikustannusten perusteella arvioituna alle 50 miljoonan euron. Kapasiteettia voi myöhemmin kasvattaa, jos niin halutaan. Työn liitteenä on yhden sivun arvoketju-esitys hiilidioksidin talteenotosta Kotkamillsin näkökulmasta. Synteettiselle metaanille ei ole vielä muodostunut markkinahintaa, eli ei tiedetä, mikä sen hinta olisi suhteessa fossiiliseen maakaasuun. Tietoa hiilidioksidin arvosta synteettisen metaanin valmistukseen myytynä ei myöskään ole, koska ne ovat liikesalaisuuksia, joten näitä hintoja ei ole voitu arvoketju-esitykseen sisällyttää. Kuten aiemmin on todettu, on työssä esitelty talteenottotekniikoiden tämän hetken tilanne. Tekniikat kehittyvät ja hinnat muuttuvat nopeasti ja se kannattaa pitää mielessä tämän opinnäytetyön tulosten osalta. Verrokkina voidaan todeta, että tuuli- ja aurinkovoiman sekä akkuteollisuuden kehitys on kymmenessä vuodessa ollut huikeaa. Kukaan ei vielä tiedä, miten alhaisiksi hiilidioksidin talteenottokustannukset tulevaisuudessa saadaan tai mitä talteenotolla voidaan saavuttaa.

LÄHTEET

Afry. 2023. Arviointiohjelma Nordic Ren-Gas Oy P2X-hanke Kotka 25, 35. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Arviointiohjelma%20Nordic%20Ren-Gas%20Oy%20P2X-hanke%20Kotka.pdf> [viitattu 26.3.2024].

Aker Carbon Capture. 2024. Aker Carbon Capture awarded milestone project in the United States. WWW-sivusto. Saatavissa:

https://akercarboncapture.com/?cision_id=044A575F57DA0EBD [viitattu 7.3.2024].

Aker Carbon Capture. 2024. Sisäinen lähde. Ei julkisesti saatavissa.

MM Kotkamills. 2024. Organisaatiokuvaus. Sisäinen lähde. Ei julkisesti saatavissa.

Aspentech. 2024. Aspen plus. WWW-sivusto. Saatavissa:

<https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> [viitattu 7.3.2024].

Aswathanarayana, Harikrishnan, T. & Sahini, K. T. 2010. Capture of CO₂. Teoksessa: Green Energy - Technology, Economics and Policy. Boca Raton, Florida. CRC Press. 73-75.

Bioenergia ry. 2024. Sanasto. WWW-sivusto. Saatavissa:

<https://www.bioenergia.fi/tietopankki/sanasto/> [viitattu 13.3.2024].

Centi, G. & Quadrelli, E. A. 2011. Green Carbon Dioxide. *Chemistry & Sustainability* 9, 1179–1181. Verkkojlehti. Saatavissa:

<https://doi.org/10.1002/cssc.201100518> [viitattu 14.2.2024]

Changgwon, C., Heehyang, K. & Hankwon, L. 2023. Feasibility study of power-to-gas as simultaneous renewable energy storage and CO₂ utilization: Direction toward economic viability of synthetic methane production.

Sustainable Energy Tehcnologies and Assessments 57, 3. Verkkojlehti.

Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.xamk.fi/10.1016/j.seta.2023.103261> [viitattu 4.3.2024]

Chunshan, S., Wei, P., Srinivas, T., Zheng, J., Yan, L., Yu-He, W., Bo-Qing, X. & Qi-Ming, Z. 2004. Tri-reforming of Methane over Ni Catalysts for CO₂ Conversion to Syngas With Desired H₂/CO Ratios Using Flue Gas of Power Plants Without CO₂ Separation. *Studies in Surface Science and Catalysis* 153, 315–322. Verkkojlehti. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(04\)80270-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(04)80270-2) [viitattu 5.3.2024]

Cook, L., Huang, K., Li, L. & Wong-Ng, W. 2018. Metal-organic frameworks materials for post-combustion CO₂ capture. *Materials and Processes for CO₂*

Capture Conversion and Sequestration, 79–81. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/9781119231059.fmatter> [viitattu 16.1.2024]

ELY-keskus. 2022. Vihreän siirtymän rahoitusta yrityksille. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/69946589/vihrean-siirtymän-rahoitusta-yrityksille?publisherId=69817869> [viitattu 22.3.2024].

Energiavirasto. 2021a. Päästöoikeuksien huutokauppa. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/huutokauppa> [viitattu 4.1.2024].

Energiavirasto. 2021b. Päästöoikeuksien ilmaisjako. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/paastooikeuksien-ilmaisjako> [viitattu 4.1.2024].

Energiavirasto. 2022. Päästökaupan huutokauppatulot 511 miljoonaa euroa. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/-/paastokaupan-huutokauppatulot-511-miljoonaa-euroa> [viitattu 4.1.2024].

Euroopan komissio. 2023. Ilmastonmuutoksen syyt. WWW-sivusto. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fi [viitattu 18.1.2024].

Eurooppa-Neuvosto. 2023. Teollisuuden päästöt. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/industrial-emissions/> [viitattu 7.12.2023].

European Commission. 2021. State aid: Commission approves €14,3 million Dutch aid to support a carbon capture and use facility. WWW-sivusto. Saatavissa: https://commission.europa.eu/news/state-aid-commission-approves-eu143-million-dutch-aid-support-carbon-capture-and-use-facility-2021-07-30_en [viitattu 26.3.2024].

Finnwatch. 2021. Anekauppaa vai ilmastotekoja?. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://finnwatch.org/fi/julkaisut/anekauppaa-vai-ilmastotekoja> [viitattu 2.4.2024].

Forus CO2. 2022. CO2 fangst og flytendegjøring. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://rust-harpsichord-bge3.squarespace.com/education-for-teachers> [viitattu 2.2.2024].

Gasum. 2024. E-metaani - synteettinen ja uusiutuva kaasu. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.gasum.com/fi/gasum/tuotteet-ja-palvelut/e-metaani/> [viitattu 27.3.2024].

Gibbins, J., Chalmers, H., Lucquiaud, M., Li, J., McGlashan, N., Liang, X. & Davidson, J. 2011. Techno-economic assessment of CO2 capture retrofit to

existing power plants, 1836-1838. Teoksessa: Energy Procedia 4. Amsterdam, Alankomaat.

HE 71/2023 vp. 2023. Hallituksen esitys eduskunnalle päästökauppalaiksi sekä laiksi biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista annetun lain 2 ja 33 §:n muuttamisesta.

Kajolinna, T. 2022. Uusi ympäristöystävällinen teknologia hiilidioksidin talteenottoon. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/uusi-ymparistoystavallinen-teknologia-hiilidioksidin-talteenottoon> [viitattu 18.12.2023].

Kallioinen, M. 2021. Selluloosa membraaneiksi - jätteestä halutuksi vedenkäsittelytuotteeksi. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.biotalous.fi/selluloosa-membraaneiksi-jatteesta-halutuksi-vedenkäsittelytuotteeksi/> [viitattu 21.3.2024].

Kearns, D., Liu, H. & Consoli, C. 2021. Technology Readiness and Costs of CCS. Global CCS Institute. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> [viitattu 15.1.2024].

Keskitalo, E. 2013. Savukaasujen hiilidioksidin talteenotto-prosessin vaikutukset olemassa olevaan monipolttoaine-CHP-voimalaitokseen, 32, 56, 86. Oulu: Oulun yliopisto. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201305291357> [viitattu 16.2.2024].

Kujanpää, L., Koponen, K., Linjala, O., Mäkikouri, S. & Arasto, A. 2023. Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa. Suomen Ilmastopaneeli. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2023/12/ilmastopaneelin-raportti-5-2023-teknologisten-hiilinielujen-mahdollisuudet-ja-niiden-edistaminen-suomessa.pdf> [viitattu 13.1.2024].

LAB Pro. 2023. Kustannustehokkailla CO₂-logistiikkaratkaisulla kohti hiilineutraaliutta. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.labopen.fi/lab-pro/kustannustehokkailla-co2-logistiikkaratkaisulla-kohti-hiilineutraaliutta> [viitattu 26.3.2024].

LabXchange. 2022. A Phase Diagram for Carbon Dioxide. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.labxchange.org/library/items/lb:LabXchange:8e3f616b.html:1> [viitattu 18.1.2024].

Linde Engineering. 2019. CO₂ purification and liquefaction. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.linde-engineering.com/en/process-plants/co2->

[plants/co2-purification-and-liquefaction/modular-co2-plants/index.html](https://plants.co2-purification-and-liquefaction/modular-co2-plants/index.html) [viitattu 3.2.2024].

Maniarasu, R., Murugan, S. & Rathore, S. K. 2023. A review on materials and processes for carbon dioxide separation and capture. *Energy & Environment* 34. 2023.

Mulk, W., Ali, S. A., Shah, S. N., Shah, M. U. H., Zhang, Q. J., Younas, M., Fatehizadehe, A., Sheikg, M. & Rezakazemi, M. 2023. Breaking boundaries in CO₂ capture: Ionic liquid-based membrane separation for post-combustion applications. *Journal of CO₂ Utilization* 24. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://pdf.sciencedirectassets.com/283534/1-s2.0-S2212982023X00080/1-s2.0-S221298202300166X/main> [viitattu 3.4.2024].

Müller, K., Fleige, M., Rachow, F. & Schmeisser, D. 2013. Sabatier based CO₂-methanation of flue gas emitted by conventional power plants, 240-248. Teoksessa: *Energy procedia* 40. Cottbus: Brandenburg university of Technology.

National Center for Biotechnology Information. 2024. PubChem Compound Summary for CID 280, Carbon Dioxide. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/280> [viitattu 18.1.2024].

Ósk Garðarsdóttir, S., Normann, F., Skagestad, R. & Johnsson, F. 2018. Investment costs and CO₂ reduction potential of carbon capture from industrial plants - A Swedish case study, 113. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2018.

Rejlers Finland Oy. 2021. Methanation Plant - Meri-Pori, 21–24. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/final-report_rev2.pdf [viitattu 16.1.2024].

Ren-Gas. 2022. Kotkaan suunnitteilla yli 100 MEUR laitosinvestointi vihreän vedyn ja uusiutuvan kotimaisen kaasun tuotantoon. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://ren-gas.com/ajankohtaista/kotkaan-suunnitteilla-yli-100-meur-laitosinvestointi-vihrean-vedyn-ja-uusiutuvan-kotimaisen-kaasun-tuotantoon> [viitattu 26.3.2024].

Sieborg, M., Oliviera, J., Ottosen, L. & Kofoed, V. 2024. Flue-to-fuel: Bio-integrated carbon capture and utilization of dilute carbon dioxide gas streams to renewable methane, 10. *Energy Conversion and Management* 302. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118090> [viitattu 26.3.2024].

Sitra. 2023. Miinuspäästöt tarvitsevat kannustimet, mutta niillä ei pidä edistää hakkuita. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/blogit/miinuspaastot->

[tarvitsevat-kannustimet-mutta-niilla-ei-pida-edistaa-hakkuita/](#)
[viitattu 3.4.2024].

Statista. 2024. Average selling price of carbon dioxide removals (CDR) worldwide as of 2023, by method. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.statista.com/statistics/1415800/carbon-removal-prices-by-method-worldwide/> [viitattu 3.4.2024].

Suomen standardisoimisliitto. 2024. Space engineering. Definition of the Tehchology Readiness Levels (TRLs) and thei criteria of assessment (ISO 16290:2013, modified). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/838082.html.stx> [viitattu 21.1.2024].

Suomen ympäristökeskus. 2022. Suomen ilmastopolitiikalla pyritään saavuttamaan ilmastotavoitteet. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/suomen-ilmastopolitiikalla-pyritaan-saavuttamaan-ilmastotavoitteet> [viitattu 17.11.2023].

Teir, S., Tsupari, E., Koljonen, T., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Arasto, A., Tourunen, A., Kärki, J., Nieminen, M. & Aatos, S. 2011. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Helsinki: VTT. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf> [viitattu 16.11.2023].

Laatikainen, T. Suomen sata suurinta CO2 päästäjää: Kärjessä olivat jälleen viime vuonna SSAB:n, Nesteen ja Helenin tutut laitokset. Tekniikka & Talous 2022. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www-tekniikkatalous-fi.ezproxy.xamk.fi/uutiset/suomen-sata-suurinta-co2-paastajaa-karjessa-olivat-jalleen-viime-vuonna-ssabn-nesteen-ja-helenin-tutut-laitokset/f497db7b-2c41-43f5-b322-074024203393> [viitattu 11.12.2023].

Tilastokeskus. 2023. Polttoaineluokitus. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.stat.fi/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2023.xlsx [viitattu 3.1.2024].

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2023a. Energiaintensiivisen teollisuuden vihreän siirtymän investointitarpeet ja niiden toteutumisedellytykset. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164567/TEM_2023_3.pdf [viitattu 22.2.2024].

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2023b. Investointitukea kolmelle uuden energiateknologian demohankkeelle muun muassa hiilidioksidin talteenottoon. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://tem.fi/-/investointitukea-kolmelle-uuden-energiateknologian-demohankkeelle-muun-muassa-hiilidioksidin-talteenottoon> [viitattu 22.3.2024].

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2023c. Päästökauppa. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://tem.fi/paastokauppa> [viitattu 7.12. 2023].

Työterveyslaitos. 2022. OVA-ohjeet. Hiilidioksidi. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ova.ttl.fi/print/pdf/node/55> [viitattu 15.12.2023].

Vierinen, T. 2020. Faasikaavio ja lämpöilmiöitä. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lukiol/lahti3/lahden-lyseo/fysiikka/vierinen/FY2222/!%C3%A4mp%C3%B6/faasikaavio> [viitattu 18.1.2024].

VTT. 2023. SI-mittayksiköt Suomessa, massa ja paine. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/si-mittayksikot-suomessa-massa-ja-paine> [viitattu 28.3.2024].

VTT. 2024. Power-to-X ja teollisuuden sähköistyminen. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/power-x-ja-teollisuuden-sahkoistyminen> [viitattu 13.3.2024].

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J. & Ramshaw, C. 2011. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review, 1610-1611. *Chemical Engineering Research and Design* 9. 2011. Verkkolehti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005> [viitattu 5.2.2024].

Westenergy. 2023. Westenergy, CPC Finland ja Prime Capital suunnittelevat suuren mittakaavan CO₂-talteenottoa. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://westenergy.fi/westenergy-cpc-finland-ja-prime-capital-suunnittelevat-suuren-mittakaavan-co2-talteenottoa/> [viitattu 26.3.2024].

Ylén, N. 2021. Synteettisen metaanin valmistus hiilidioksidista. Opinnäytetyö. LAB-ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikka. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021062416619> [viitattu 14.2.2023].

Ympäristöministeriö. 2021. Vapaaehtoisten päästökompensaatioiden sääntely, 8, 13. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163347/YM_2021_26.pdf [viitattu 26.3.2024].

Ympäristöministeriö. 2022. Pariisin ilmastopimus. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus> [viitattu 7.12.2023].

Yu, M., Bai, L., Moioli, S., Tontiwachwuthikul, P., Plisko, T., Bilyukevich, A., Feng, Y. & Liu, H. 2023. Hybrid CO₂ capture processes consisting of membranes: A technical and techno-economic review. *Advanced Membranes* 3, 2-3. Verkkolehti. Saatavissa: <https://pdf.sciencedirectassets.com/780771/1-s2.0-S2772823423X00025/1-s2.0-S277282342300012X/main.pdf> [viitattu 5.4.2024].

Ørsted. 2023. Carbon Capture and Storage. WWW-sivusto. Saatavissa: <https://orsted.com/en/what-we-do/renewable-energy-solutions/bioenergy/carbon-capture-and-storage> [viitattu 2.4.2024].



Arvoketju

