

Iida Halkilahti

HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO JA VARASTOINTI TAI HYÖTYKÄYTTÖ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Hannele Auvinen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Iida Halkilahti: Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi tai hyötykäyttö
Carbon capture and storage or utilization
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Toukokuu 2023

Hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä on kasvanut ihmistoiminnan vaikutuksesta merkittävästi, minkä seurauksena maapallon keskilämpötila on noussut noin 1 °C:een verrattuna esiteolliseen aikaan. Jotta Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoite rajoittaa ilmaston lämpenemisen alle 2 °C:een voidaan saavuttaa, tarvitaan merkittäviä päästövähennyksiä. Yksi osatekijä tavoitteen saavuttamiseksi on hiilidioksidin talteenotto. Tässä kandidaatin työssä tarkastellaan talteenottoa voimalaitokselta, sillä 43 % maailman hiilidioksidipäästöistä on sähkön- ja lämmöntuotannosta. Työssä tarkastellaan myös talteenotetun hiilidioksidin loppusijoitusta varastoimalla tai jatkokäyttöä hyötykäytössä sekä näiden haasteita. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Hiilidioksidin talteenottoon voimalaitoksilla on kolme pääkategoriaa: talteenotto ennen polttoa, happipolttot ja talteenotto polton jälkeen. Hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa vaatii polttoaineen esikäsitteilyä, mutta etuna on erotusta helpottavat suurempi hiilidioksidikonsentraatio ja korkea osapaine. Happipoltossa käytetään ilman sijaan puhdasta happea, jolloin savukaasu sisältää ideaalisesti vain hiilidioksidia ja höyryä. Talteenotossa polton jälkeen hiilidioksidi otetaan talteen savukaasusta, jolloin menetelmää voidaan soveltaa ilman suuria muutoksia olemassa oleviin voimalaitoksiin. Hiilidioksidin matala konsentraatio ja alhainen osapaine savukaasussa aiheuttavat haastetta erotuksessa.

Tässä työssä tarkastellaan absorptiota, adsorptiota sekä membraaneja hiilidioksidin erotukseen ennen ja jälkeen polttoa tehtävässä talteenotossa. Absorptio käyttäen monoetanoliamiinia liuottimena on ainoa laajassa skaalassa käytössä oleva hiilidioksidin talteenottotekniikka. Haasteena ovat kuitenkin muun muassa korkeat kustannukset ja liuottimen toksisuus ympäristölle sekä ihmisille. Membraani eli puoliläpäisevä kalvo, joka toimii suodattimena erottaen hiilidioksidin syötteestä, tunnustetaan potentiaalisesti ympäristöystävällisemmäksi vaihtoehdoksi kuin absorptio tai adsorptio.

Talteenotettu hiilidioksidi voidaan joko varastoida tai hyötykäyttää. Hiilidioksidin varastoinnin ja hyötykäytön erona on, että hyötykäyttö hidastaa päästöjen vapautumista, muttei kokonaan poista niitä. Toisaalta muunnettaessa hiilidioksidi esimerkiksi polttoaineiksi voidaan vähentää fossiilisten materiaalien käyttöä ja sitä kautta vähentää päästöjä. Hiilidioksidin varastointipaikka tulee valita tarkoin, jotta hiilidioksidia ei pääse vuotamaan. Paikallisesti vuoto aiheuttaisi muun muassa maaperän ja veden saastumista. Talteenotettu hiilidioksidi voidaan myös hyötykäyttää usein eri tavoin varastoinnin sijaan. Hyötykäyttömenetelmien kaupallista hyödyntämistä hidastavat muun muassa korkea energian tai katalyytin tarve johtuen hiilidioksidimolekyylin stabiilisuudesta.

Työssä havaittiin, että hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin tai hyötykäyttöön liittyy vielä paljon haasteita. Lisäksi tunnustettiin tarve kehittää ympäristöystävällisempiä talteenottotekniikoita, jotta hiilidioksidipäästöjen lämmityspotentiaalia ei vaihdeta muihin ympäristöhaittoihin.

Avainsanat: ilmastonmuutos, voimalaitoksen hiilidioksidipäästöt, hiilidioksidin talteenotto, CCS, CCU

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VAIKUTUKSET JA MERKITYS	
ILMASTOTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISELLE	3
2.1 Ilmastonmuutoksen luonnontieteellinen perusta	3
2.2 Hiilidioksidipäästöt ja niiden kehitys	3
2.3 Hiilidioksidin talteenoton merkitys ilmastotavoitteiden saavuttamiselle	4
3. HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO	6
3.1 Talteenotto voimalaitoksissa	6
3.2 Erotustekniikat	9
3.2.1 Absorptio	10
3.2.2 Adsorptio	12
3.2.3 Membraanitekniikka	13
4. HIILIDIOKSIDIN VARASTOINTI JA HYÖTYKÄYTTÖ	15
4.1 Hiilidioksidin kuljetus	15
4.2 Hiilidioksidin varastointi	16
4.3 Hiilidioksidin hyötykäyttö	17
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	19
LÄHTEET	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCS	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, carbon capture and storage
CCU	Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö, carbon capture and utilization
CO ₂	Hiilidioksidi
GWP	Lämmityspotentiaali, global warming potential
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö, International Energy Agency
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutopaneeli, Intergovernmental Panel on Climate Change
MEA	Monoetanoliamiini
PSA	Adsorption regeneraatio painetta laskemalla, pressure swing adsorption
TSA	Adsorption regeneraatio lämpötilaa nostamalla, temperature swing adsorption

1. JOHDANTO

Hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen määrä on lisääntynyt ilmakehässä merkittävästi ihmisten toiminnan vaikutuksesta (Rahimpour et al., 2020). Tämän seurauksena luonnollinen kasvihuoneilmiö on voimistunut ja maapallon keskilämpötila on noussut noin 1,1 °C:n verrattuna esiteolliseen aikaan (IPCC, 2023, s. 6). Ilmaston lämpenemisellä on lukuisia seurannaisvaikutuksia, kuten sääilmiöiden voimistumista, ruoantuotannon ongelmia ja biodiversiteettikatoa (Rahimpour et al., 2020). Hiilidioksidin määrän kasvu aiheuttaa myös merten happamoitumista, sillä hiilidioksidi reagoi vesimolekyylien kanssa muodostaen hiilihappoa (Dolman, 2019, s. 132, 219). Tämän vaikutuksesta merten pH on laskenut esiteollisesta ajasta 8,21:stä 8,10:een, mikä vastaa 30 % nousua happamuudessa (NOAA, 2022). Hiilidioksidipitoisuuden nousu aiheuttaa siis laajaa vahinkoa sekä luonnolle että ihmisille, ja monet vaikutuksista ovat peruuttamattomia (IPCC, 2023, s. 34).

Vuonna 2015 solmitun Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteena on pitää keskilämpötilan nousu maapallolla alle kahdessa asteessa ja pyrkiä toimiin, joilla lämpötilan nousu saataisiin rajoitettua alle 1,5 °C:n verrattuna esiteolliseen aikaan (Ympäristöministeriö, 2023). Nykyvauhdilla ilmaston lämpeneminen saavuttaa 1,5 °C:n rajan vuoteen 2040 mennessä (IPCC, 2023, s. 33). Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC (2023) on arvioinut, että rajoittamalla ilmaston lämpeneminen 1,5 °C:een 2 °C:een sijaan muun muassa vähentää riskiä biodiversiteetille ja ekosysteemeille sekä maalla että merissä, ihmisten terveydelle, ruokaturvalle ja vedentuotannolle.

Kasvihuonepäästöjä on vähennettävä merkittävästi 1,5 °C:n tavoitteeseen pääsemiseksi. Määrällisesti hiilidioksidi on merkittävin kasvihuonekaasu (Seinfeld, 2016, s. 912). Vuonna 2019 hiilidioksidipäästöt vastasivat 75 %:sta kokonaiskasvihuonepäästöistä maailmassa (IPCC, 2022, s. 11). Tästä syystä tässä työssä keskitytään hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Hiilidioksidipäästöjä aiheuttaa muun muassa fossiilisten polttoainesten käyttö, energian tuotanto ja maankäytön muutokset (Rahimpour et al., 2020).

Vuonna 2019 maailman hiilidioksidipäästöistä 43 % oli peräisin sähkön- ja lämmöntuotannosta (Climate Watch, 2023). Työssä keskitytäänkin hiilidioksidin talteenottoon mahdollisuuksien mukaan. Jos talteenotettu hiilidioksidi varastoidaan pysyvästi, käytetään termiä CCS (carbon capture and storage) (IEA, 2020, s. 20). Hyötykäytettäessä talteenotettu

hiilidioksidi esimerkiksi polttoaineiden tai kemikaalien valmistukseen käytetään termiä CCU (carbon capture and utilization).

Työn tavoitteena on vertailla hiilidioksidin talteenottomenetelmiä sekä talteenotetun hiilidioksidin varastointia ja hyötykäyttöä. Tässä työssä selvitetään, miten hiilidioksidipäästöt ovat kehittyneet ja millaisia vaikutuksia niillä on, millä tekniikoilla hiilidioksidia otetaan talteen voimalaitoksista sekä miten talteenotettua hiilidioksidia voidaan varastoida ja hyötykäyttää. Lisäksi tarkastellaan näihin liittyviä haasteita. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Työn luvussa 2 käsitellään lyhyesti, miten hiilidioksidi vaikuttaa ilmastonmuutokseen ja miten hiilidioksidipäästöt ovat kehittyneet. Lisäksi tarkastellaan ilmastotavoitteiden saavuttamista ja erityisesti hiilidioksidin talteenoton roolia. Talteenottoa voimalaitoksissa ja tarkemmin eri hiilidioksidin erotustekniikoita käsitellään luvussa 3. Luvussa 4 käsitellään talteenotetun hiilidioksidin loppusijoitusta varastoimalla tai jatkokäyttöä hyötykäytössä.

2. HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VAIKUTUKSET JA MERKITYS ILMASTOTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISELLE

Tässä luvussa tarkastellaan ensin lyhyesti ilmastonmuutoksen luonnontieteellistä perustaa. Seuraavaksi käsitellään hiilidioksidipäästöjen syntyä, eri päästölähteitä sekä päästöjen kehitystä. Lopuksi tarkastellaan hiilidioksidin talteenoton roolia ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

2.1 Ilmastonmuutoksen luonnontieteellinen perusta

Osa auringosta peräisin olevasta ultraviolettisäteilystä emittoituu maapallon pinnoilta, pilvistä ja ilmakehän hiukkasista takaisin ilmakehään infrapunasäteilynä, jotta maapallon säteilytase pysyy tasapainossa (Seinfeld, 2016, s. 931–933). Kasvihuonekaasut, kuten hiilidioksidi, absorboivat osan tästä säteilystä lämmittäen maan pintaa (Jacob, 1999, s. 113). Tämä luonnollinen kasvihuoneilmiö on elämän edellytys maapallolla, sillä ilman säteilyn absorptiota maapallon keskilämpötila olisi -18 °C (Seinfeld, 2016, s. 931).

Kaasumolekyylit absorboi säteilyä tietyllä aallonpituudella, jos energia voidaan käyttää molekyylin energiatason lisäykseen (Schwartz, 2018). Energiatason lisäyksen seurauksena aiheutuu vibraatiota ja rotaatiota, jolloin molekyylit törmäilevät toisiinsa ja lämpötila kasvaa (Jacob, 1999, s. 123). Molekyylin liikkeen aiheuttama lämpö säteilee kaikkiin suuntiin, jolloin osa tästä säteilee kohti maapalloa lämmittäen maan pintaa (Schwartz, 2018). Kasvihuonekaasut absorboivat säteilyä infrapuna-alueella eli aallonpituuksilla 5–50 μm lukuun ottamatta ikkunaa aallonpituuksilla 8–13 μm , joilla ilmakehä ei juurikaan pidätä maan pinnalta tulevaa säteilyä (Jacob, 1999, s. 124–126). Tällä ikkunalla on merkittävä vaikutus lämpötilan määräytymisessä maapallolla.

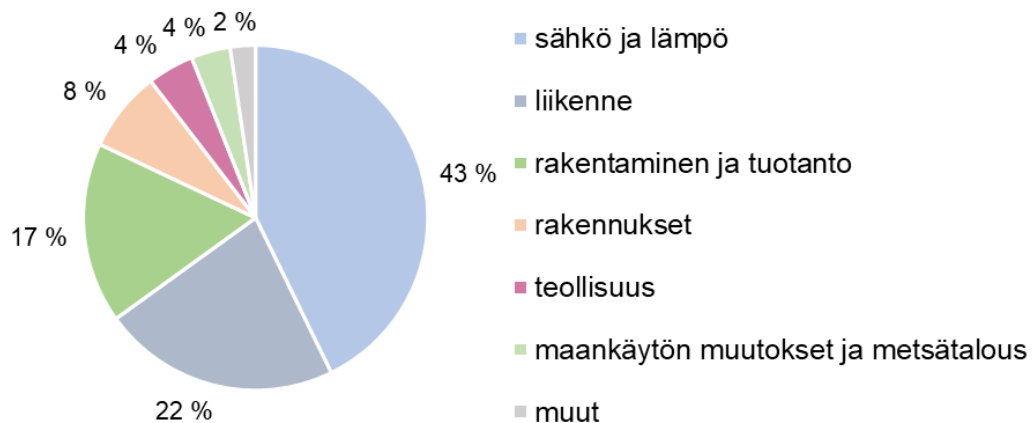
Kasvihuonekaasujen määrä ilmakehässä on lisääntynyt, mikä muokkaa säteilytasetta. Kun ilmakehässä on enemmän kasvihuonekaasuja, kykenee se absorboimaan enemmän säteilyä kuin ennen (Seinfeld, 2016, s. 933). Tämän seurauksena säteilyä pääsee takaisin avaruuteen vähemmän kuin aiemmin. Tämän takia ilmasto on lämmennyt noin $1,1\text{ °C}$:n esiteolliseen aikaan verrattuna (IPCC, 2023, s. 6).

2.2 Hiilidioksidipäästöt ja niiden kehitys

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli maailmassa keskimäärin 418 ppm vuoden 2022 marraskuussa (NOAA, 2023). Vuonna 1750 ennen teollista vallankumousta pitoisuus oli noin

280 ppm (NOAA, 2022). Hiilidioksidipitoisuus on siis kasvanut noin 50 %:a esiteollisesta ajasta.

Merkittävin hiilidioksidipäästöjen aiheuttaja globaalisti on energiasektori (Kuva 1). Kokonaishiilidioksidipäästöt huomioiden maankäytön muutokset ja metsätalouden nettovaiikutuksen olivat noin 36,9 Gt vuonna 2019 (Climate Watch, 2023). Kokonaishiilidioksidipäästöistä sähkön ja lämmön tuotannon osuus oli 15,8 Gt eli 43 %.



Kuva 1: Hiilidioksidipäästöt sektoreittain vuonna 2019 (Perustuu lähteeseen (Our World in Data, 2023))

Energiantuotannon hiilidioksidipäästöt johtuvat kivihiilen, maakaasun, öljyn sekä muiden fossiilisten polttoaineiden poltosta (IEA, 2021a, s. 7). Myös biopolttoaineiden käytöstä syntyy hiilidioksidipäästöjä (Winterton, 2021). Polttoaineen palaessa hiili reagoi ilman hapen kanssa, jolloin muodostuu hiilidioksidia (Schobert, 2013, s. 6, 454). Palamisreaktiossa syntyvä hiilidioksidi laimenee sekoittamalla muihin kaasuihin (Nord & Bolland, 2020, s. 11). Esimerkiksi hiilivoimalaitoksella savukaasun hiilidioksidikonsentraatio on noin 12–15 tilavuusprosenttia.

2.3 Hiilidioksidin talteenoton merkitys ilmastotavoitteiden saavuttamiselle

Tarvitaan radikaaleja päästövähennyksiä, jotta päästäisiin Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteeseen rajoittaa ilmaston lämpeneminen alle 2 °C:n. IPCC (2023, s. 30) on arvioinut, että 1,5 °C:n tavoite vaatii, että päästöt saavuttavat nettonollan noin vuoteen 2050 mennessä. Ilmaston lämpenemisen rajoittaminen vaatii merkittäviä muutoksia energiasektorilla seuraavan 30 vuoden aikana (IPCC, 2022, s. 89). Energiasektorin hiilineutraalius koostuu useasta tekijästä, joista merkittävimmät ovat sähköistyminen, uusiutuvien, bio- sekä vetypolttoaineiden käyttäminen, energiatehokkuus ja hiilidioksidin talteenotto (IEA, 2021b, s. 64).

Voimalaitokset voivat nykyvauhdilla tuottaa elinkaariensa aikana yli 600 Gt hiilidioksidipäästöt (IEA, 2020, s. 18, 21). Tämä vastaa noin kahden vuosikymmenen nykyisentaisia päästöjä. Hiilidioksidin talteenotto mahdollistaa ilmastotavoitteiden saavuttamisen, kun sitä hyödynnetään siirtymävaiheessa fossiilittomiin polttoaineisiin (IPCC, 2022, s. 89). Talteenottoa voidaan hyödyntää myös jo olemassa olevissa voimalaitoksissa (IEA, 2020, s. 13). Jos lämpeneminen saadaan rajoitettua 1,5 °C:een, hiilen poltto ilman hiilidioksidin talteenottoa putoaa 67–82 %:a (IPCC, 2022, s. 89).

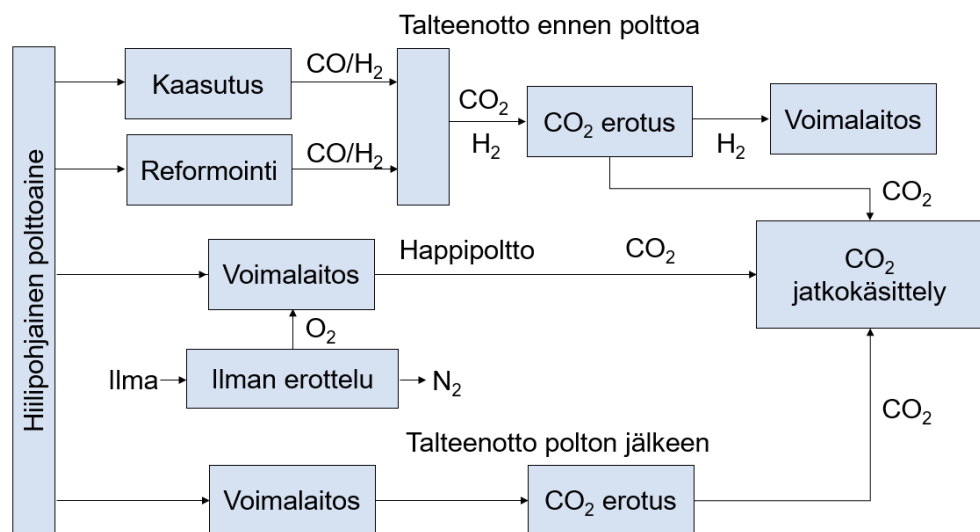
Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi tai hyötykäyttö -teknologiat voivat helpottaa siirtymää nettonolla tavoitteeseen myös mahdollistamalla tavan käsitellä vaikeasti vähennettäviä päästöjä sekä kustannustehokkaan vähähiilisen vedyn tuotannon (IEA, 2021b, s. 79, 80). Nettonolla tavoitteen saavuttaminen vuoteen 2050 mennessä vaatii kansainvälisen energijärjestön (IEA, 2021b, s. 79) arvion mukaan nopeaa kasvua talteenotetun hiilidioksidin määrässä tämän hetkisestä 40 Mt:sta vuodessa 7,6 Gt:iin vuonna 2050. Tässä skenaariossa 95 %:a talteenotetusta hiilidioksidista varastoidaan ja loput hyötykäytetään.

3. HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO

Hiilidioksidin talteenotto on prosessi, jossa hiilidioksidi erotellaan päästölähteestä, kuten voimalaitoksen savukaasuista tai teollisuuden prosesseista (Nord & Bolland, 2020, s. 11). Myös hiilidioksidin talteenottoa suoraan ilmakehästä (DAC, direct air capture) on tutkittu kahtena viime vuosikymmenenä, mutta toistaiseksi menetelmän kaupallistumisen esteenä on korkea energiantarve (Sodiq et al., 2023). Luvussa 3.1 keskitytään vertailemaan kolmea eri talteenottoa voimalaitoksissa. Eri tekniikoita hiilidioksidin erotukseen tarkastellaan luvussa 3.2.

3.1 Talteenotto voimalaitoksissa

Hiilidioksidin talteenottoon hiiliperäisiä polttoaineita hyödyntäviltä voimalaitoksilla on kolme pääkategoriaa: hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa (pre-combustion), happipolttotekniikka (oxy-combustion) sekä talteenotto polton jälkeen (post-combustion) (Kuva 2) (Nord & Bolland, 2020, s. 162).



Kuva 2: Hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa, happipolttotekniikalla ja polton jälkeen (Perustuu lähteeseen (Nord & Bolland, 2020, s. 162))

Ennen polttoa tapahtuvassa talteenotossa polttoainemolekyylit hajoavat osittaisella hapettamisella, jolloin muodostuu vedystä (H₂) ja hiilimonoksidista (CO) koostuva synteesikaasu (Nord & Bolland, 2020, s. 163). Reaktiossa höyryn (H₂O) kanssa saadaan vedyn ja hiilidioksidin seos, josta hiilidioksidi voidaan erottaa useille eri erotustekniikoilla

(Rackley, 2017, s. 26). Näitä tarkastellaan luvussa 3.2. Reaktiossa syntynyt vety voidaan hyödyntää voimalaitoksella polttoaineena (Nord & Bolland, 2020, s. 163).

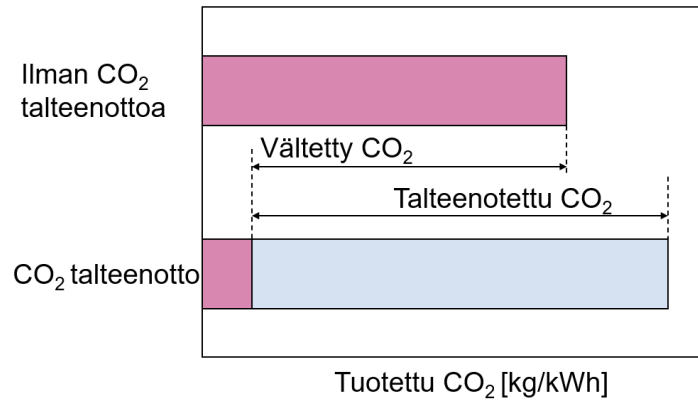
Happipoltossa käytetään palamisprosessissa ilman sijaan puhdasta happea, jolloin ideaalisesti saadaan vain hiilidioksidia ja höyryä sisältävä savukaasu (Nord & Bolland, 2020, s. 163). Polton jälkeisessä talteenotossa palamisprosessi on tavallinen, jonka jälkeen hiilidioksidi otetaan talteen savukaasuista (Rackley, 2017, s. 26). Menetelmän etuna on, että sitä voidaan soveltaa olemassa oleviin voimalaitoksiin ilman suuria muutoksia (Sifat & Haseli, 2019, s. 104).

Haasteena talteenotossa polton jälkeen on erotusprosessin energiankulutus, sillä savukaasu on ilmakehänpaineessa ja hiilidioksidipitoisuus on melko alhainen ($< 15\%$) (Lockwood, 2017, s. 2660). Ennen polttoa tehtävä talteenotto vaatii vähemmän energiaa verrattuna talteenottoon polton jälkeen, sillä vedyn ja hiilidioksidin seos on korkeassa 2–7 MPa paineessa ja hiilidioksidikonsentraatio on 15–60 tilavuusprosenttia (Jansen et al., 2015).

Happipoltossa savukaasun sisältämä hiilidioksidi ei laimene ilman tuestä (N_2), jolloin hiilidioksidikonsentraatio on suuri, 65–85 tilavuusprosenttia (Stanger et al., 2015). Savukaasun sisältämät hiilidioksidi ja höyry on helppo erottaa toisistaan, sillä höyryn tiivistyslämpötila on korkeampi kuin prosessissa vallitseva lämpötila (Nord & Bolland, 2020, s. 163). Happipolton haasteena on puhtaan hapen tuottamisen korkeat kustannukset (Edge et al., 2011).

Tavallisessa polttoprosessissa ilman kanssa syntyy haitallisia typenoksideja (NO_x) (Sifat & Haseli, 2019, s. 115). Happipoltossa näitä ei synny. Typenoksidit puhdistetaan savukaasusta polton jälkeisessä talteenotossa yleensä ennen hiilidioksidin erotusta (Nord & Bolland, 2020, s. 118–124). Lisäksi savukaasusta puhdistetaan ennen CO_2 :n erotusta muita epäpuhtauksia, kuten rikinoksidit (SO_x) ja pienhiukkaset, jotka voivat vaikuttaa heikentävästi erotusprosessin tehokkuuteen.

Hiilidioksidin talteenotto lisää voimalaitoksen energiantarvetta, jolloin prosessissa syntyy enemmän hiilidioksidia verrattuna voimalaitokseen ilman hiilidioksidin talteenottoa (Henkel & Pehnt, 2009). Voimalaitokselta talteenotetun hiilidioksidin määrä ei siis suoraan vastaa vältettyä päästömäärää (Kuva 3) (IPCC, 2005, s. 42–44).



Kuva 3: Hiilidioksidin talteenoton vaikutus voimalaitoksen hiilidioksidipäästöihin (Perustuu lähteeseen (IPCC, 2005, s. 44))

Hiilidioksidin talteenotto on taloudellisesta näkökulmasta kannattavaa, kun talteenoton kustannukset ovat pienemmät kuin vältettävän CO₂-päästöoikeuden kustannukset. Hiilidioksiditonnin hinta on vaihdellut EU:ssa tammi-huhtikuussa 2023 välillä 77–100 € (Ember, 2023). Voimalaitoksen hyötysuhde ei saa laskea liikaa talteenoton vaikutuksesta. Vältetyn CO₂:n kustannuksia ja muita tekijöitä talteenotolle ennen ja jälkeen polton sekä happipolttotekniikalle on vertailtu taulukossa 1.

Taulukko 1: Hiilidioksidin talteenoton ennen ja jälkeen polton sekä happipolttotekniikan vertailua

	Talteenotto ennen polttoa	Happipoltto tekniikka	Talteenotto polton jälkeen
Vältetyn CO₂:n kustannukset	hiili 21 €/t ¹ maakaasu 103 €/t ¹	hiili 33 €/t ¹ maakaasu 94 €/t ¹	hiili 31 €/t ¹ maakaasu 53 €/t ¹
Soveltuu nykylaitoksiin	ei ²	ei ²	kyllä ³
Kaupallisessa käytössä	ei ³	ei ³	kyllä ³
CO₂ konsentraatio	15–60 % ⁴	65–85 % ⁵	< 15 % ⁶
CO₂ osapaine	2–7 MPa ⁴	0,101 MPa ³	0,101 MPa ⁶

¹ Leung et al. (2014) ² Aghaie et al. (2018) ³ Sifat & Haseli (2019) ⁴ Jansen et al. (2015)

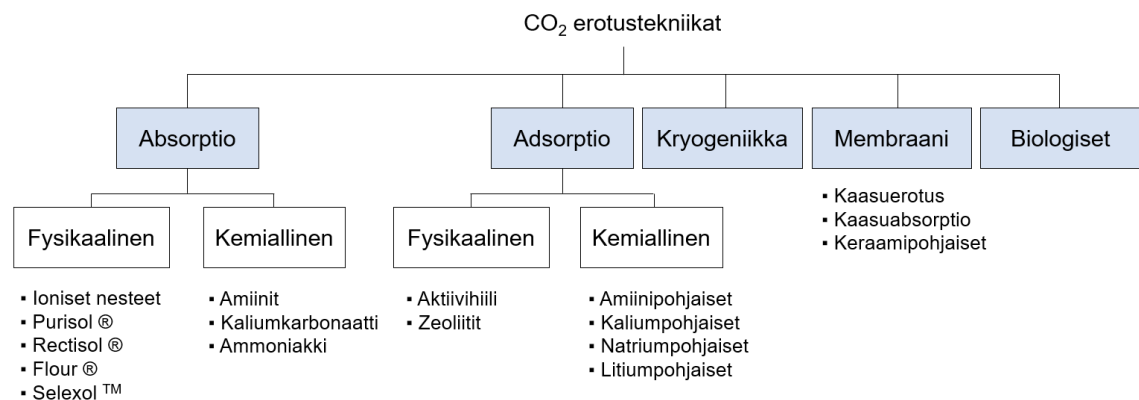
⁵ Stanger et al. (2015) ⁶ Lockwood (2017)

Talteenotolla ennen ja jälkeen polton sekä happipolttotekniikalla saadaan vähennettyä CO₂-päästöjä merkittävästi verrattuna voimalaitokseen ilman talteenottoa (Henkel &

Pehnt, 2009). Jos voimalaitokselta talteenotettu hiilidioksidi varastoidaan, laitoksen aiheuttamaa lämmityspotentiaalia (GWP) saadaan alennettua 63–82 %:a (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015). Suurimmat vähennykset saadaan happipoltteknikalla ja alhaisimmat polton jälkeisellä talteenotolla. Talteenottoon liittyy kuitenkin muita ympäristöhaasteita. Polton jälkeisen talteenoton elinkaariarvion mukaan CO₂:n talteenotto aiheuttaa perinteiseen voimalaitokseen verrattuna merkittävän nousun lähes kaikissa ympäristövaikutuskategorioiden, kuten rehevöityminen ja happamoituminen (Henkel & Pehnt, 2009).

3.2 Erotustekniikat

Hiilidioksidin talteenottoon polton jälkeen savukaasuista on useita erilaisia erotustekniikoita, jotka jaotellaan absorptioon, adsorptioon, membraaneihin, kryogeeneihin sekä biologisiin menetelmiin (Kuva 4) (Aghaie et al., 2018). Menetelmiä on paljon, mutta useimmat ovat vasta tutkimuksen alla. Hiilidioksidi voidaan erottaa samankaltaisilla tekniikoilla myös ennen polttoa tehtävässä talteenotossa (Jansen et al., 2015). Happipoltossa näitä erotustekniikoita ei tarvita, sillä pääosin höyrystä ja hiilidioksidista koostuvan savukaasun komponentit voidaan erottaa toisistaan tiivistämällä höyry (Sifat & Haseli, 2019, s. 114, 126). Happipoltteknikalla onkin vähemmän haitallisia ympäristövaikutuksia verrattuna ennen tai jälkeen polttoa tehtävään talteenottoon.



Kuva 4: Hiilidioksidin erotustekniikat (Perustuu lähteeseen (Aghaie et al., 2018))

Tässä keskitytään tarkastelemaan absorptiota, koska absorptio on tällä hetkellä suosituin erotusmenetelmä ja käytössä kaupallisesti polton jälkeisessä talteenotossa (Aghaie et al., 2018). Lisäksi käsitellään lyhyemmin adsorptio ja membraanitekniikka. Adsorption erona absorptioon on, että CO₂-molekyylit kiinnittyvät kiinteille pinoille, kun taas absorptiossa talteenotettavat molekyylit liukenevat käytettävään liuottimeen (Nord & Boland, 2020, s. 167).

3.2.1 Absorptio

Hiilidioksidin talteenotto absorptiolla on regeneratiivinen kaksivaiheinen prosessi (Nord & Bolland, 2020, s. 167). Ensimmäisessä vaiheessa kaasuvirta on kontaktissa liuottimen kanssa, jolloin liuotin absorboi CO₂-molekyylit (Aghaie et al., 2018). Toisessa vaiheessa hiilidioksidipitoinen liuotin ohjataan desorptiokolonneihin, jossa CO₂ poistetaan liuottimesta ja liuotin regeneroidaan (Sifat & Haseli, 2019, s. 108). Regenerointi tehdään yleensä nostamalla lämpötilaa tai muuttamalla painetta (Nord & Bolland, 2020, s. 173). Puhdas CO₂ kerätään varastointia tai jatkokäyttöä varten. Absorptiotehokkuus on yli 90 %:a eli erittäin korkea (Leung et al., 2014).

Absorptio voidaan jaotella fysikaaliseen ja kemialliseen absorptioon liuottimen mukaan. Kemiallisessa absorptiossa liuotin reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen kemiallisia yhdisteitä, joista CO₂ voidaan erotella myöhemmin (Sifat & Haseli, 2019, s. 108). Fysikaalisessa absorptiossa CO₂ liukenee liuottimeen, mutta pysyy kemiallisesti muuttumattomana (Nord & Bolland, 2020, s. 167).

Kemiallisten liuottimien absorptiokapasiteettia rajoittaa liuoksen aktiivinen komponentti (Jansen et al., 2015). Fysikaalisten liuottimien absorptiokapasiteetti puolestaan riippuu Henryn laista eli kasvaa lineaarisesti poistettavan CO₂ osapaineen kasvaessa (Nord & Bolland, 2020, s. 167). Fysikaalisten liuottimien absorptiokyky on parempi korkeissa osapaineissa, kun taas kemiallisilla liuottimilla alhaisissa osapaineissa (Jansen et al., 2015). Tästä syystä kemialliset liuottimet sopivat CO₂ erotusmenetelmäksi talteenottoon polton jälkeen, jolloin savukaasun paine on alhainen. Fysikaaliset liuottimet puolestaan sopivat hyvin talteenottoon ennen polttoa.

Paineen lisäksi lämpötila vaikuttaa absorptiokapasiteettiin. Hiilivoimalaitoksella savukaasun ulostulolämpötila on yleensä noin 1200 °C, josta se jäähtyy asteittain noin 150 °C:een (Song et al., 2004). Absorptiokapasiteetti on paras alhaisemmissa lämpötiloissa (Nord & Bolland, 2020, s. 168). Tämän takia kaasuvirta pitää usein viilentää ennen absorptiota, mikä heikentää prosessin tehokkuutta (Sifat & Haseli, 2019, s. 109). Esimerkiksi käytettäessä amiineja liuottimena tarvitsee savukaasuvirta jäähdyttää 15–25 °C:een, jotta CO₂:n absorptio on optimaalinen (Figuerola et al., 2008).

Absorption hyödyntämisessä hiilidioksidin erotusmenetelmänä on useita haasteita, kuten korkeat kustannukset ja tarvittavan laitteiston suuruus (Aghaie et al., 2018). Käytettävien liuottimien haasteita ovat muun muassa korkeat häviöt, regeneraation energiankulutus, korrodoivuus ja negatiiviset ympäristövaikutukset. Haasteena on löytää liuotin,

jolla näitä ominaisuuksia ei ole, ja jolla olisi korkea reaktiivisuus ja absorptiokapasiteetti CO₂ kanssa. Taulukossa 2 on tarkasteltu erilaisia liuottimia sekä niiden etuja ja haittoja.

Taulukko 2: Eri hiilidioksidin absorptiomenetelmien etuja ja haittoja

	Absorptiomenetelmä	Edut	Haitat
Fysikaalinen absorptio	Ioniset nesteet	Eivät aiheuta korroosiota. ¹ Alhainen höyrynpaine rajoittaa liuotinhäviöitä. ¹ Eivät saastuta ilmakehää. ¹	Korkea hinta. ¹
	Rectisol (jäähdytetty metanoli)	Korkea selektiivisyys CO ₂ :lle ja H ₂ S:ille. ² Helppo regeneroida. ³	Matala toimintalämpötila. ² Monimutkainen prosessi. ³
	Selexol (DMEPG)	Kemiallisesti ja termisesti stabiili. ² Alhainen höyrynpaine rajoittaa liuotinhäviöitä. ²	Korkea viskositeetti. ²
Kemiallinen absorptio	Amiinit (mm. MEA, DMEA)	Korkea reaktiivisuus CO ₂ kanssa. ¹ Termisesti stabiili. ¹ Korkea absorptiokapasiteetti. ¹	Aiheuttavat korroosiota. ¹ Amiinien hajoaminen savukaasun sisältämien SO ₂ , NO ₂ ja O ₂ vaikutuksesta. ¹ Toksisia. ¹
	Kaliumkarbonaatti (K ₂ CO ₃)	Helppo regeneroida. ⁴ Alhainen toksisuus. ⁴ Edullinen liuotin. ⁴	Hidas reaktionopeus. ⁴

¹ Aghaie et al. (2018) ² Jansen et al. (2015) ³ Nord & Bolland (2020) ⁴ Borhani et al. (2015)

Polyetyleeniglykolin dimetyylieetteri DMEPG; Monoetanoliamiini MEA; Dimetyylietanoliamiini DMEA

Hiilidioksidin erotus absorptiolla käyttäen monoetanoliamiinia (MEA) liuottimena on ainoa laajassa skaalassa käytössä oleva CO₂ talteenottotekniikka (Kárászová et al., 2020; Rahimpour et al., 2020, s. 33). MEA ja hiilidioksidi muodostavat karbamaatti-ionin reaktiolla



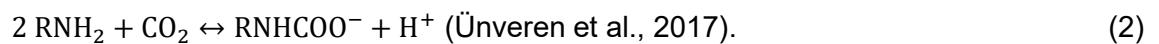
missä R on funktionaalinen ryhmä –C₂H₄OH (Yang et al., 2015). Jos hiilidioksidin talteenottoon käytetään MEA:a ja talteenotettu hiilidioksidi varastoidaan, murskahiiilivoimalaitoksen GWP on keskimäärin 203 kg CO₂ eq. / MWh, (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015). Ilman hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia laitoksen GWP olisi 876 kg CO₂ eq. / MWh eli 77 %:a korkeampi. Amiinit ovat laajasti käytetty liuotin, sillä niillä on korkea CO₂ absorptiokapasiteetti (Aghaie et al., 2018). Amiinien käytössä on kuitenkin korkeat

pääoma- ja käyttökustannukset (Kárászová et al., 2020). Lisäksi ne ovat toksisia ihmisille ja ympäristölle (Aghaie et al., 2018).

3.2.2 Adsorptio

Absorption tavoin adsorptio on kaksivaiheinen prosessi, jossa ensin adsorbentti selektiivisesti adsorboi CO₂:n kaasuvirrasta (Nord & Bolland, 2020, s. 201). Jälkimmäisessä vaiheessa laskemalla painetta (PSA, pressure swing adsorption) tai nostamalla lämpötilaa (TSA, temperature swing adsorption) CO₂:lla kyllästynyt adsorbentti vapauttaa hiilidioksidin (Rackley, 2017, s. 151, 153). Näin CO₂ voidaan ottaa talteen ja adsorbenttia käyttää uudelleen. Adsorption etuna absorptioon verrattuna on, ettei prosessissa synny nestemäisiä jätevirtoja. Korkea, yli 85 %:n, adsorptiotehokkuus on mahdollista saavuttaa (Leung et al., 2014).

Adsorptio voidaan absorption tavoin jakaa fysikaalisen ja kemialliseen adsorptioon (Rackley, 2017, s. 151). Fysikaalinen adsorptio perustuu sähköstaattisiin tai van der Waalsin voimiin kaasufaasissa olevan CO₂:n ja kiinteän adsorbentin pinnan välillä (Godin et al., 2021). Kemiallinen adsorptio perustuu kemiallisiin sidoksiin näiden välillä (Sifat & Haseli, 2019, s. 110). Esimerkiksi amiinipohjainen adsorbentti reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen karbamaatti-ionin:



Fysikaalista adsorptiota hyödynnetään yleensä matalammissa lämpötiloissa ja kemiallista adsorptiota korkeammassa lämpötiloissa (Akpasi & Isa, 2022). Kemiallinen adsorptio on fysikaalista adsorptiota vähemmän riippuvainen CO₂:n osapaineesta, joten se soveltuu paremmin polton jälkeiseen talteenottoon (Ünveren et al., 2017).

Käytettäväksi regenerointimenetelmäksi soveltuu paremmin lämpötilan nostamiseen perustuva TSA, jos CO₂:n konsentraatio on alhainen, kun taas paineen alentamiseen perustuva PSA soveltuu paremmin CO₂:n osapaineen ollessa korkea (Sifat & Haseli, 2019, s. 111). PSA adsorptiosykli on nopeampi ja vaatii pienemmät adsorbenttipedit tietyllä teholla verrattuna TSA-sykliin (Rackley, 2017, s. 155) TSA vaatii suhteellisesti pidempiä lämmitys- ja jäähdytysaikoja.

Adsorbenttimateriaalin valinnassa tärkeitä parametreja ovat selektiivisyys hiilidioksidille ja adsorptiokapasiteetti (Nord & Bolland, 2020, s. 203). Selektiivisyys CO₂:lle mutta ei muille kaasuille on tärkeää, jotta varmistetaan lopullisen tuotteen puhtaus. Korkea adsorptiokapasiteetti pienentää tarvittavan adsorbenttipedin kokoa, kustannuksia ja energiantarvetta (Rackley, 2017, s. 155). Koska adsorptio tapahtuu pinnalla, adsorptio on sitä

suurempaa, mitä suuremmat ovat adsorbenttin pinta-ala, huokoskoko ja muoto (Akpassi & Isa, 2022). Eri adsorbenttimateriaaleja on tarkasteltu taulukossa 3.

Taulukko 3: Eri hiilidioksidin adsorptiomenetelmien etuja ja haittoja

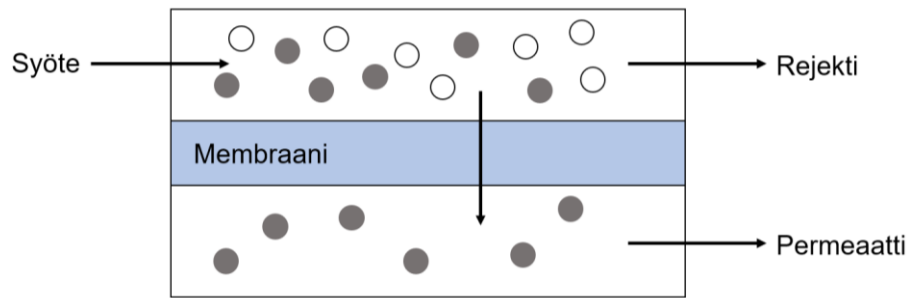
	Adsorptiomenetelmä	Edut	Haitat
Fysikaalinen adsorptio	Aktiivihili	Korkea ominaispinta-ala. ¹ Alhaiset kustannukset. ²	Adsorptiokapasiteettiin vaikuttaa merkittävästi CO ₂ osapaine. ¹ Alhainen selektiivisyys. ²
	Zeoliitit	Korkea adsorptiokapasiteetti. ¹ Pitkä käyttöikä. ¹	Adsorptiokapasiteettiin vaikuttaa merkittävästi lämpötila ja CO ₂ osapaine. ¹ Herkkä vesihöyrylle. ¹
Kemiallinen adsorptio	Amiinipohjaiset	Korkea adsorptionkapasiteetti. ³ Alhainen regeneraatioenergia verrattuna amiiniansorptioon. ³ Kestävät kosteutta. ³	Korkeat kustannukset. ³

¹ Fu et al. (2022) ² Godin et al. (2021) ³ Ünveren et al. (2017)

Adsorption haasteena on pienempi kapasiteetti verrattuna absorptioon sekä lämpötilan, CO₂:n osapaineen ja muiden kaasujen vaikutus adsorptiokapasiteettiin (Fu et al., 2022). Adsorptiomateriaaleja kehitetään, jotta CO₂ talteenottoa saadaan parannettua (Sifat & Haseli, 2019, s. 126).

3.2.3 Membraanitekniikka

Membraanit ovat puoliläpäiseviä kalvoja, jotka toimivat suodattimena erottaen CO₂:n syötteestä erilaisten mekanismien avulla (Kuva 5) (Olajire, 2010). Membraanitekniikka kuluttaa vähemmän energiaa kuin muut hiilidioksidin erotustekniikat (Sifat & Haseli, 2019, s. 126). Membraanitekniikan energiankulutus on 0,5–6 MJ/ kg CO₂ kun taas absorptio 4–6 MJ/ kg CO₂ (Brunetti et al., 2010). Lisäksi membraanitekniikassa on alhaisemmat kustannukset, yksinkertaisempi prosessi ja se ei saastuta (Fu et al., 2022). Membraanitekniikka onkin potentiaalinen ympäristöystävällisempi vaihtoehto hiilidioksidin talteenottoon kuin absorptio tai adsorptio.



Kuva 5: Kaasuerotus membraani, jossa syötteestä (CO₂ kuvattu harmaalla ja muut komponentit valkoisella) erottuu CO₂ (Perustuu lähteeseen (Olajire, 2010))

Membranit voidaan jaotella orgaanisiin ja epäorgaanisiin membraaneihin (Godin et al., 2021). Orgaanisia membraaneja ovat esimerkiksi polymeeriset membraanit ja epäorgaanisia muun muassa keraamiset tai zeoliittimembraanit. Polymeerimembraaneja käytetään tällä hetkellä CO₂:n erotukseen monilla teollisuudenaloilla, mutta haasteena on alhainen selektiivisyys CO₂:lle (Fu et al., 2022). Epäorgaanisilla membraaneilla on hyvä erotustehokkuus verrattuna orgaanisiin, mutta membraanin korkea hinta on esteenä kaupalliselle hyödyntämiselle.

Permeabiliteetti, eli kuinka helposti molekyylit pääsevät membraanin läpi, ja selektiivisyys, eli kuinka tietyt molekyylit pääsevät läpi ja toiset eivät, ovat membraanin tärkeimmät ominaisuudet (Godin et al., 2021). Mitä korkeampi permeabiliteetti on sitä alhaisemmat ovat kustannukset, sillä tarvittava membraanin pinta-ala on kääntäen verrannollinen permeabiliteettiin. Membraanin tulee olla termisesti kestävä käytettäessä polton jälkeisessä talteenotossa savukaasuista, sillä savukaasujen korkeat lämpötilat tuhoavat membraanin nopeasti (Brunetti et al., 2010). Tästä syystä savukaasut tulee viilentää ennen membraania alle 100 °C:seen.

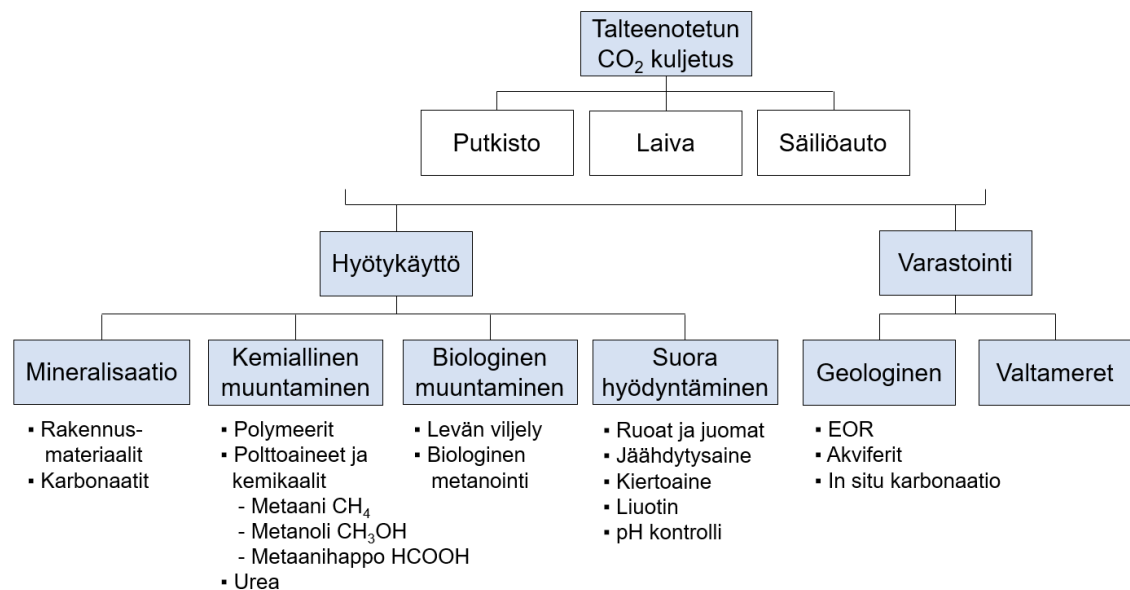
Membraanin tulee olla myös kemiallisesti kestävä savukaasujen sisältämille kemiallisille yhdisteille tai yhdisteet tulee puhdistaa ennen membraanierotusta (Brunetti et al., 2010). Lisäksi membraanin tehokkuuteen vaikuttaa CO₂:n konsentraatio ja osapaine (Leung et al., 2014). Korkea CO₂:n osapaine toimii ajavana voimana kaasuerotusmembraanissa, joten se soveltuu paremmin ennen polttoa tehtävään talteenottoon (Godin et al., 2021). Polton jälkeisessä talteenotossa paine-eron tuottaminen vaatii merkittävästi energiaa, jolloin energiankulutus on yhtä korkea kuin esimerkiksi absorptiossa (Brunetti et al., 2010)

4. HIILIDIOKSIDIN VARASTOINTI JA HYÖTYKÄYTTÖ

Hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla (CCS) pyritään CO₂-päästöjen vähentämiseen ilmakehässä ja siten hillitsemään ilmastonmuutosta. Hiilidioksidin hyötykäytön (CCU) ja varastoinnin erona on, ettei hyötykäytöllä pysyvästi poisteta hiilidioksidia ilmakehästä (Fu et al., 2022). CCU siis hidastaa päästöjen vapautumista, muttei kokonaan poista niitä. Hiilidioksidi voidaan muuntaa esimerkiksi ureaksi ja metanoliksi, joiden elinkaari on lyhyt, tyypillisesti alle 1 vuosi (Rackley, 2017, s. 577). Toisaalta CCU:n avulla voidaan vähentää fossiilisten materiaalien käyttöä, jos CO₂ muunnetaan esimerkiksi polttoaineiksi, ja sitä kautta vähentää CO₂-nettopäästöjä (Godin et al., 2021). Hiilidioksidin varastointia, hyötykäyttöä sekä kuljetusta tarkastellaan seuraavissa luvuissa.

4.1 Hiilidioksidin kuljetus

Talteenotettu hiilidioksidi kompressoidaan ja puhdistetaan ennen kuljetusta hyötykäyttöön tai loppusijoitukseen (Nord & Bolland, 2020, s. 35). Hiilidioksidi voidaan kuljettaa talteenotto paikasta putkistolla, laivalla tai säiliöautossa (Kuva 6) (Chen et al., 2022). Yksi 500 MW:n voimalaitos voi tuottaa vuodessa noin 4–5 Mt-CO₂ (Rackley, 2017, s. 595). Tällaiseen ison skaalan kuljetukseen putkistot ja laivat ovat realistiset kuljetusmenetelmät ja näiden teknologia on jo hyvin kehittyntä.



Kuva 6: Talteenotetun hiilidioksidin hyötykäyttö tai varastointi. EOR tarkoittaa tehostetua öljyntuotantoa. (Perustuu lähteisiin (Cruz et al., 2021; VTT))

Kuljetukseen liittyy kuitenkin riskejä esimerkiksi vuotojen suhteen, sillä vuodot voivat paikallisesti saastuttaa ympäristöä ja heikentää veden laatua (Chen et al., 2022). Lisäksi putkiston ja muun infrastruktuurin rakentaminen vahingoittaa ympäristöä ja ekologiaa. Talteenotettu CO₂ kuljetetaan joko varastointia tai hyötykäyttöä varten, joita tarkastellaan seuraavissa luvuissa.

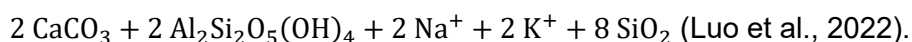
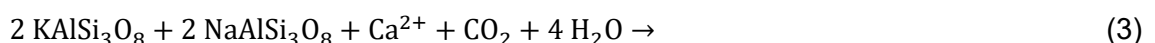
4.2 Hiilidioksidin varastointi

Geologisilla muodostumilla, kuten suolaisilla akvifereilla sekä tyhjentyneillä öljy- ja kaasuvarannoilla, on kapasiteettia varastoida talteenotettu CO₂ (Kuva 6) (Leung et al., 2014). Ensimmäinen kaupallisen mittakaavan hiilidioksidin varastointi suolaiseen akviferiin (Sleipner projekti) alkoi jo vuonna 1996 (Shukla et al., 2010). Valtameret ovat geologisten muodostumien lisäksi potentiaalinen varastointipaikka (Rackley, 2017, s. 29).

Hiilidioksidin varastointipaikka tulee valita tarkoin. Kriteereitä geologiselle CO₂ varastointimuodostumalle ovat muun muassa huokoisuus ja muodostuman paksuus, jotta suuria määriä saadaan varastoitua (Leung et al., 2014). Muita tärkeitä kriteereitä ovat muodostuman tiivistyskyky ja vakaa geologinen ympäristö, jotta CO₂ ei pääse vuotamaan varastosta. Vallinnassa huomioidaan myös etäisyys talteenotto paikasta ja muut taloudelliset kriteerit (Rackley, 2017, s. 432).

Geologisen varaston kapasiteetti ja turvallisuus ovat paremmat, jos CO₂ ruiskutetaan ylikriittisenä nesteenä (Rackley, 2017, s. 285–286). Hiilidioksidi on ylikriittisessä tilassa yli 31,1 °C lämpötilassa ja yli 7,38 MPa paineessa (Shukla et al., 2010). Tällöin CO₂ on tiheämpää kuin kaasumainen CO₂. Tämä vaatii CO₂:n ruiskutusta yleensä vähintään 800 metrin syvyyteen (Rackley, 2017, s. 286).

Akviferi on maanalainen kerros vettä sisältävää läpäisevää kalliota tai esimerkiksi soraa tai hiekkaa (Nord & Bolland, 2020, s. 20). Hiilidioksidin varastointiin soveltuvat akviferit ovat syvällä maaperässä ja sisältävät mineralisoituneita suolaliuoksia eli niitä ei voida hyödyntää juomaveden lähteenä. CO₂:n liukeneminen suolaveteen on päämekanismi, jolla hiilidioksidi pysyy akviferissa (Leung et al., 2014). Liuennut CO₂ reagoi ajan myötä mineraalien kanssa muodostaen karbonaattisaostumia:



Kun hiilidioksidi on reagoinut karbonaattisaostumiksi, ei ole enää vaaraa vuodoista. Lisäksi akviferia ympäröivä eristävä kerros pitää hiilidioksidin muodostuman sisällä (Leung

et al., 2014). Suolaisten akviferien etuna on suuri varastointipotentiaali, arviolta 1–150 Gt CO₂, sekä yleisyys maailmassa (Shukla et al., 2010).

Hiilidioksidin varastointiin geologisiin muodostumiin liittyy riskejä ympäristölle sekä ihmisten terveydelle ja turvallisuudelle (IPCC, 2005, s. 34). Hiilidioksidin vuotaminen on yksi varastointiin liittyvistä riskeistä. Vuodolla olisi sekä paikallisia että globaaleja vaikutuksia. Hiilidioksidin vapautuminen ilmakehään vaikuttaa ilmastonmuutokseen (Chen et al., 2022). Paikallisesti CO₂-vuoto voi aiheuttaa muun muassa maaperän ja veden saastumista, eroosiota sekä vahinkoa ympäröiville ekosysteemeille. Toinen riski hiilidioksidin varastointiin liittyen on maanjäristysalttius, joka aiheutuu laajamittaisesta ruiskutuksesta maan alle (Davies et al., 2013). Näiden riskien minimoimiseksi varastointi tulee suunnitella huolella ja käyttää menetelmiä vuotojen varhaiseen havaitsemiseen (IPCC, 2005, s. 34).

Valtameret ovat isoin luonnollinen hiilinielu (Leung et al., 2014) ja niillä on suuri potentiaali varastoida hiilidioksidia (Chen et al., 2022). Hiilidioksidin varastointi valtameriin tapahtuisi ruiskuttamalla CO₂ suoraan yli 1 000 metrin syvyyteen, jossa liuenneesta ja hajaantuneesta CO₂:sta tulisi osa hiilen kiertoa (IPCC, 2005, s. 37). Hiilidioksidi aiheuttaa kuitenkin merten happamoitumista, mikä on haitallista meriekosysteemeille (Leung et al., 2014). Varastoinnissa valtameriin onkin korkeampi riski ympäristölle kuin geologisiin muodostumiin varastoinnissa (Shukla et al., 2010).

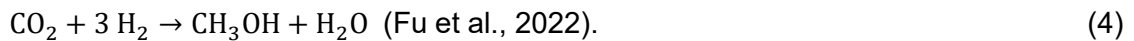
4.3 Hiilidioksidin hyötykäyttö

Hiilidioksidin talteenotossa ja hyötykäytössä (CCU) on useita vaihtoehtoja, jotka voidaan jaotella kemialliseen ja biologiseen muuntamiseen sekä mineralisaatioon (Kuva 6) (Fu et al., 2022). Kemiallista muuntamista ovat esimerkiksi kemikaalien ja polttoaineiden tuotto. Tällä hetkellä 230 Mt CO₂:a käytetään vuodessa, ja tästä suurin osa käytetään urean tuottoon lannoitteeksi (IEA, 2019, s. 3, 21). Käytettävä hiilidioksidi ei kuitenkaan pääosin ole peräisin hiilidioksidin talteenotosta vaan teollisuuden prosessien sivuvirroista saatavaa korkean puhtausasteen hiilidioksidia.

Vuonna 2050 hiilidioksidia hyödynnetään polttoaineiden tuottoon arviolta 1000–4200 Mt vuodessa (Godin et al., 2021). Kemiallisesta hyödyntämisestä tarkastellaan metanolin tuottoa ja biologisesta hyötykäytöstä mikrolevän viljelyä. Mikrolevän avulla pystytään hyödyntämään vuodessa arviolta 200–900 Mt CO₂:a vuonna 2050 (Godin et al., 2021). Hiilidioksidi voidaan hyödyntää myös suoraan esimerkiksi hiilihapollisiin juomiin, ruoan säilöntään ja jääähdytysaineeksi (Ghiat & Al-Ansari, 2021). Tällä hetkellä suurin osa kaupallisista sovelluksista käyttää hiilidioksidia suoraan (IEA, 2019, s. 16).

Hiilidioksidin hyötykäyttötekniikoiden kaupallista hyödyntämistä hidastavat useat haasteet. CO₂-molekyylissä hiilen ja happiatomien väliset kaksoissidokset ovat termodynaamisesti vahvoja, joten CO₂ on erittäin stabiili (Kamkeng et al., 2021). Stabiilisuuden vuoksi tarvitaan joko merkittävästi energiaa, korkea paine tai lämpötila heikentämään CO₂:n stabiilisuutta tai katalyytti alentamaan aktivointienergiaa, kun CO₂ muunnetaan korkeamman jalostusasteen tuotteiksi. Jotta välttyttäisiin lisäämästä CO₂ päästöjä, tarvittava energia tulisi olla uusiutuvista lähteistä (Jarvis & Samsatli, 2018).

Talteenotettu CO₂ voidaan syntetisoida katalyyttisella hydrogenoinnilla polttoaineiksi, kuten metaaniksi, metanoliksi ja metaanihakoksi (Godin et al., 2021). Hydrogenointi tarkoittaa vedyn H₂ lisäämistä CO₂-molekyyliin ja se voidaan tehdä lämmön, valon ja lämmön yhdistelmän tai plasman avulla (Kamkeng et al., 2021). Esimerkiksi metanolin synteesireaktio hiilidioksidista on



Tällä hetkellä tutkituin katalyytti prosessiin on kupari (Fu et al., 2022). CO₂:n muuntaminen metanoliksi on lupaava ison mittakaavan hyötykäyttömenetelmä, sillä metanoli soveltuu korkean energiasisältönsä (726,3 kJ/mol) vuoksi liikennepolttoaineeksi (Godin et al., 2021). Joitakin kaupallisen mittakaavan laitoksia CO₂:n hydrogenointiin metanoliksi on jo käytössä, kuten George Olah uusiutuvan metanolin -laitos Islannissa (Jarvis & Samsatli, 2018). Tällaisen talteenotetusta CO₂:sta metanolia tuottavan laitoksen netto CO₂-päästöt ovat 0,226 t CO₂/t metanolia, mikä on noin 71 % vähemmän kuin perinteisen metanolintuotto-prosessin päästöt. Samalla vähennetään veden kulutusta (Ghiat & Al-Ansari, 2021).

Hyödynnettäessä CO₂ mikrolevän viljelyssä saadaan energiarikasta biomassaa, joka muunnetaan esimerkiksi biopolttoaineiksi, muoveiksi tai proteiineiksi (Hepburn et al., 2019). Biopolttoaineiden ja proteiinien tuottaminen mikrolevän avulla hiilidioksidista vähentää kilpailua maankäytöstä ja veden kulutusta verrattuna perinteisiin menetelmiin (Ghiat & Al-Ansari, 2021). Voimalaitokselta tuleva CO₂ on ensin puhdistettava, sillä mikrolevät ovat herkkiä epäpuhtauksille (IEA, 2019, s. 63).

Leväbiomassa voi absorboida 1,83 kg CO₂ / 1 kg biomassaa (Anwar et al., 2020). Levien synteesi tehdään avoimissa altaissa tai valobioreaktoreissa (Jarvis & Samsatli, 2018). Mikrolevien hyödyntämisen haasteena on määrän mikrolevämässän kuivaamisen energiavaatimukset ja kustannukset (Godin et al., 2021). Tästä syystä toistaiseksi ei ole kaupallisen mittakaavan tuotantoa huolimatta mikrolevien potentiaalista.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tarkasteltiin hiilidioksidipäästöjen vaikutuksia sekä hiilidioksidin talteenoton roolia ilmastotavoitteiden saavuttamiselle. Työn tavoitteena oli tarkastella hiilidioksidin talteenottoa voimalaitokselta sekä mitä talteenotetulle hiilidioksidille voidaan tehdä. Lisäksi tarkasteltiin näihin liittyviä haasteita.

Hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä on kasvanut noin 50 %:a esiteollisesta ajasta, minkä seurauksena ilmasto on lämmennyt 1,1 °C:n. Energiasektorilla on merkittävä rooli maailman vuotuisista hiilidioksidipäästöistä ja siten mahdollisuus suuriin päästövähennyksiin. Energiasektorin hiilineutraalius koostuu useasta tekijästä, kuten sähköistymisestä, uusiutuvien polttoaineiden käytöstä ja hiilidioksidin talteenotosta. Hiilidioksidin talteenotto ei siis yksinään ole ratkaisu ilmastotavoitteiden saavuttamiseen, mutta mahdollistaa osaltaan tavoitteiden saavuttamisen hyödynnettäessä siirtymävaiheessa fossiilittomiin polttoaineisiin. Hiilen poltto ilman hiilidioksidin talteenottoa putoaa arviolta 67–82 %, jos lämpeneminen saadaan rajattua 1,5 °C:een. Suurin osa (95 %) talteenotetusta hiilidioksidista varastoidaan ja loput hyötykäytetään.

Hiilidioksidin talteenotto voimalaitoksissa voidaan jaotella talteenottoon ennen polttoa, happipolttoon sekä talteenottoon polton jälkeen. Talteenotto ennen ja jälkeen polttoa vaatii esimerkiksi absorptioon käyttöä hiilidioksidin erotukseen, kun taas happipoltossa savukaasun sisältämät hiilidioksidi ja höyry erotetaan tiivistämällä höyry. Tästä syystä happipoltto on potentiaalinen ympäristöystävällisempi vaihtoehto.

Työssä tarkasteltiin absorptiota, adsorptiota sekä membraaneja hiilidioksidin erotukseen ennen ja jälkeen polttoa tehtävässä talteenotossa. Erotuksen tehokkuus riippuu, toteutetaanko erotus voimalaitoksella ennen vai jälkeen polton. Polton jälkeisessä talteenotossa haastetta aiheuttaa hiilidioksidin alhainen (< 15 %) konsentraatio ja matala osapaine savukaasussa. Ennen polttoa tehtävässä talteenotossa saavutetaan 15–60 % hiilidioksidikonsentraatio ja korkea (2–7 MPa) osapaine. Tästä syystä esimerkiksi membraanitekniikka soveltuu paremmin käytettäväksi ennen polttoa tehtävään talteenottoon kuin polton jälkeiseen talteenottoon.

Polton jälkeinen talteenotto kemiallisella absorptiolla käyttäen monoetanoliamiinia liuottimeksi on ainoa laajassa skaalassa käytössä oleva hiilidioksidin erotustekniikka. Absorptiolla voidaan saavuttaa korkea yli 90 %:n erotustehokkuus. Menetelmän haasteena

ovat korkeat kustannukset, liuottimen regeneraation vaatima energia sekä liuottimen toksisuus ympäristölle ja ihmisille. On tarve kehittää liuottimia, joilla ei ole näitä ominaisuuksia, mutta on kuitenkin korkea absorptiokapasiteetti.

Adsorption haasteita ovat pienempi kapasiteetti verrattuna absorptioon, regeneraation energiankulutus sekä muiden kaasujen vaikutus adsorptiokapasiteettiin. Membraaniteknikka on potentiaalisesti ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin absorptio tai adsorptio, sillä se vaatii vähemmän energiaa eikä vaadi esimerkiksi toksisia liuottimia. Membraanien haasteita ovat toistaiseksi korkeat kustannukset ja alhainen selektiivisyys hiilidioksidille.

Varastoimalla voimalaitokselta talteenotettu hiilidioksidi voimalaitoksen päästöjen lämmityspotentiaalia saadaan alennettua 63–82 %:a, josta suurimmat vähennykset saadaan happipoltteknikalla ja alhaisimmat polton jälkeisellä talteenotolla. Hiilidioksidin varastointipaikka tulee valita tarkoin, jotta voidaan välttää hiilidioksidin vuotaminen. Vuoto voi aiheuttaa paikallisesti muun muassa maaperän ja veden saastumista sekä eroosiota. Varastointiin valtameriin liittyy korkeampi ympäristöriski kuin geologisiin muodostumiin varastointiin. Hiilidioksidi voidaan myös muuntaa esimerkiksi polttoaineiksi ja sitä kautta vähentää fossiilisten materiaalien kulutusta. Hiilidioksidin hyötykäytön haasteet liittyvät muun muassa talteenotetun hiilidioksidimolekyylin stabiilisuuteen, koska tarvitaan joko merkittävästi energiaa tai esimerkiksi katalyytti, jotta hiilidioksidi saadaan muunnettua korkeamman jalostusasteen tuotteiksi.

Hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin ja hyötykäyttöön liittyy siis paljon haasteita ja kehityskohtia, jotta esimerkiksi kustannukset ja energiankulutus saadaan alas. Lisäksi ympäristöystävällisempiä talteenottotekniikoita ja varastointimahdollisuuksia tulee kehittää, jotta hiilidioksidipäästöjen lämmityspotentiaalia ei vaihdeta muihin ympäristöhaittoihin.

LÄHTEET

- Aghaie, M., Rezaei, N., Zendejboudi, S., 2018. A systematic review on CO₂ capture with ionic liquids: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96, 502–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.004>
- Akpasi, S.O., Isa, Y.M., 2022. Effect of operating variables on CO₂ adsorption capacity of activated carbon, kaolinite, and activated carbon – Kaolinite composite adsorbent. *Water-Energy Nexus* 5, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2022.08.001>
- Anwar, M.N., Fayyaz, A., Sohail, N.F., Khokhar, M.F., Baqar, M., Yasar, A., Rasool, K., Nazir, A., Raja, M.U.F., Rehan, M., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Nizami, A.S., 2020. CO₂ utilization: Turning greenhouse gas into fuels and valuable products. *Journal of Environmental Management* 260, 110059. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110059>
- Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G., Drioli, E., 2010. Membrane technologies for CO₂ separation. *Journal of Membrane Science, Membranes and CO₂ Separation* 359, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.11.040>
- Chen, S., Liu, J., Zhang, Q., Teng, F., McLellan, B.C., 2022. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 112537. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112537>
- Climate Watch, 2023. Data Explorer [Verkkójulkaisu]. Saatavissa <https://www.climatewatch-data.org/data-explorer/historical-emissions> (Viitattu 15.2.2023).
- Cruz, T.T. da, Perrella Balestieri, J.A., de Toledo Silva, J.M., Vilanova, M.R.N., Oliveira, O.J., Ávila, I., 2021. Life cycle assessment of carbon capture and storage/utilization: From current state to future research directions and opportunities. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 108, 103309. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103309>
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A., 2015. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization* 9, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- Dolman, H., 2019. *Biogeochemical Cycles and Climate*. Oxford University Press.
- Edge, P., Gharebaghi, M., Irons, R., Porter, R., Porter, R.T.J., Pourkashanian, M., Smith, D., Stephenson, P., Williams, A., 2011. Combustion modelling opportunities and challenges for oxy-coal carbon capture technology. *Chemical Engineering Research and Design, Special Issue on Carbon Capture & Storage* 89, 1470–1493. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.010>
- Ember, 2023. Carbon Price Tracker [Verkkójulkaisu]. Saatavissa <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/> (Viitattu 2.5.2023).
- Figueroa, J.D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., Srivastava, R.D., 2008. Advances in CO₂ capture technology—The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2, 9–20. [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00094-1)
- Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., Xu, P., 2022. Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization* 66, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>
- Ghiat, I., Al-Ansari, T., 2021. A review of carbon capture and utilisation as a CO₂ abatement opportunity within the EWF nexus. *Journal of CO₂ Utilization* 45, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101432>
- Godin, J., Liu, W., Ren, S., Xu, C.C., 2021. Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: A brief review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9, 105644. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105644>
- Henkel, J., Pehnt, M., 2009. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.07.001>
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E.A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J.C., Smith, P., Williams, C.K., 2019. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* 575, 87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>

- IEA, 2021a. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level [Verkkajulkaisu]. Saatavissa <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emission-sin2021.pdf>. (Viitattu 18.2.2023).
- IEA, 2021b. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector [Verkkajulkaisu]. Saatavissa https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. (Viitattu 18.2.2023).
- IEA, 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS in clean energy transitions. Energy Technology Perspectives. [Verkkajulkaisu]. Saatavissa https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf. (Viitattu 28.2.2023).
- IEA, 2019. Putting CO2 to Use Creating value from emissions [Verkkajulkaisu]. Saatavissa https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf. (Viitattu 27.4.2023).
- IPCC, 2023. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6) [Verkkajulkaisu]. Saatavissa https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_Longer-Report.pdf. (Viitattu 28.4.2023).
- IPCC, 2022. Technical Summary in: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Verkkajulkaisu]. Saatavissa https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_TechnicalSummary.pdf. (Viitattu 15.2.2023).
- IPCC, 2005. Carbon dioxide capture and storage - Technical summary [Verkkajulkaisu]. Saatavissa https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_technicalsummary-1.pdf. (Viitattu 3.3.2023).
- Jacob, D. J., 1999. Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton University Press.
- Jansen, D., Gazzani, M., Manzolini, G., Dijk, E. van, Carbo, M., 2015. Pre-combustion CO2 capture. International Journal of Greenhouse Gas Control, Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO2 Capture and Storage 40, 167–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.028>
- Jarvis, S.M., Samsatli, S., 2018. Technologies and infrastructures underpinning future CO2 value chains: A comprehensive review and comparative analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 85, 46–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.007>
- Kamkeng, A.D.N., Wang, M., Hu, J., Du, W., Qian, F., 2021. Transformation technologies for CO2 utilisation: Current status, challenges and future prospects. Chemical Engineering Journal 409, 128138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128138>
- Kárszová, M., Zach, B., Petrusová, Z., Červenka, V., Bobák, M., Šyc, M., Izák, P., 2020. Post-combustion carbon capture by membrane separation, Review. Separation and Purification Technology 238, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116448>
- Leung, D.Y.C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M.M., 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39, 426–443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>
- Lockwood, T., 2017. A Comparative Review of Next-generation Carbon Capture Technologies for Coal-fired Power Plant. Energy Procedia, 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland 114, 2658–2670. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1850>
- Luo, A., Li, Y., Chen, X., Zhu, Z., Peng, Y., 2022. Review of CO2 sequestration mechanism in saline aquifers. Natural Gas Industry B 9, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.07.002>
- NOAA, 2023. Carbon Cycle Greenhouse Gases. Global Monitoring Laboratory [Verkkajulkaisu]. Saatavissa <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html> (Viitattu 15.2.2023).
- NOAA, 2022. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. Global Monitoring Laboratory [Verkkajulkaisu]. Saatavissa <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (Viitattu 15.2.2023).
- Nord, L., Bolland, O., 2020. Carbon Dioxide Emission Management in Power Generation. John Wiley & Sons.

- Olajire, A.A., 2010. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review. *Energy*, 7th International Conference on Sustainable Energy Technologies 35, 2610–2628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.030>
- Our World in Data, 2023. CO₂ emissions by sector [Verkköjulkaisu]. Saatavissa <https://our-worldindata.org/grapher/co-emissions-by-sector> (Viitattu 7.3.2023).
- Rackley, S.A., 2017. *Carbon Capture and Storage*. Elsevier Science & Technology, Oxford.
- Rahimpour, M.R., Farsi, M., Makarem, M.A., 2020. *Advances in Carbon Capture - Methods, Technologies and Applications*. Elsevier.
- Schobert, H., 2013. *Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels*. Cambridge University Press.
- Schwartz, S.E., 2018. Resource Letter GECC-1: The Greenhouse Effect and Climate Change: Earth's Natural Greenhouse Effect. *American Journal of Physics* 86, 565–576. <https://doi.org/10.1119/1.5045574>
- Seinfeld, J.H., 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, Incorporated, Newark.
- Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., Choi, X., 2010. A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity. *Fuel* 89, 2651–2664. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.012>
- Sifat, N., Haseli, Y., 2019. *A Critical Review of CO₂ Capture Technologies and Prospects for Clean Power Generation*. MDPI, Basel. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-558-6>
- Sodiq, A., Abdullatif, Y., Aissa, B., Ostovar, A., Nassar, N., El-Naas, M., Amhamed, A., 2023. A review on progress made in direct air capture of CO₂. *Environmental Technology & Innovation* 29, 102991. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102991>
- Song, C., Pan, W., Srimat, S.T., Zheng, J., Li, Y., Wang, Y.-H., Xu, B.-Q., Zhu, Q.-M., 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*. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(04\)80270-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(04)80270-2)
- Stanger, R., Wall, T., Spörl, R., Paneru, M., Grathwohl, S., Weidmann, M., Scheffknecht, G., McDonald, D., Myöhänen, K., Ritvanen, J., Rahiala, S., Hyppänen, T., Mletzko, J., Kather, A., Santos, S., 2015. Oxyfuel combustion for CO₂ capture in power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Special Issue commemorating the 10th year anniversary of the publication of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on CO₂ Capture and Storage 40, 55–125. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.010>
- Ünveren, E.E., Monkul, B.Ö., Sariođlan, Ş., Karademir, N., Alper, E., 2017. Solid amine sorbents for CO₂ capture by chemical adsorption: A review. *Petroleum* 3, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.11.001>
- VTT. Technical Research Center of Finland, BioCO₂ – Value chains and business potential for biobased-CO₂ in circular economy, Sustainable business from biogenic carbon dioxide, webpage [Verkköjulkaisu]. Saatavissa <https://projectsites.vtt.fi/sites/BioCO2/www.vtt.fi/sites/BioCO2/en.html> (Viitattu 2.4.2023).
- Winterton, N., 2021. *Chemistry for Sustainable Technologies - A Foundation* (2nd Edition).
- Yang, J., Y. Tan, H., X. Low, Q., P. Binks, B., M. Chin, J., 2015. CO₂ capture by dry alkanolamines and an efficient microwave regeneration process. *Journal of Materials Chemistry A* 3, 6440–6446. <https://doi.org/10.1039/C4TA06273F>
- Ympäristöministeriö, 2023. Pariisin ilmastopimus [Verkköjulkaisu]. Ympäristöministeriö. Saatavissa <https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus> (Viitattu 4.2.2023).