



HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTON JA VARASTOINNIN NYKYTILA

Present state of carbon capture and storage

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Sara Simell

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkimusassistentti Kari Luostarinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Sara Simell

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin nykytila

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua, 10 kuvaa

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja Tutkimusassistentti Kari Luostarinen

Avainsanat: Hiilidioksidin talteenotto, hiilidioksidin varastointi, talteenottotekniikka, varastointitekniikka, CCS-tekniikka

Tässä kandidaatintyössä perehdytään erilaisiin hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniikoihin ja siihen, mikä niiden tekniikoiden tilanne on tällä hetkellä. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi tekniikat auttavat vähentämään energiasektorin kasvihuonekaasupäästöjä ja hillitsemään ilmastonmuutosta. On arvioitu, että ilman näitä tekniikoita emme tule pääsemään kansainvälisiin ilmastotavoitteisiin.

Hiilidioksidia voidaan talteenotto polton jälkeen syntyvistä savukaasuista, ennen polttoprosessia ja happipolton avulla. Hiilidioksidia voidaan varastoida mm. ehtyneisiin öljy- ja kaasuväistöihin, sekä suolaisiin pohjavesikerrostumiin.

On olemassa useita hiilidioksidin talteenottotekniikoita, jotka alkavat olemaan valmiita kaupalliseen käyttöön. Merkittävänä hidasteena niiden laajalle käyttöönotolle on talteenotto tekniikoiden korkea hinta ja tekniikoihin liittyvät poliittiset päätökset. Erilaisia hiilidioksidin varastointitekniikoita ja -paikkoja on tarjolla laajasti ympäri maailmaa. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin julkinen hyväksyntä tulee ratkaisemaan sen, kuinka laajasti tekniikkaa otetaan tulevaisuudessa käyttöön.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Sara Simell

Present state of carbon capture and storage

Bachelor's thesis

2023

30 pages, 10 figures

Examiners: Professor Esa Vakkilainen, Research Assistant Kari Luostarinen

Keywords: Carbon capture, carbon storage, capture technology, storage technology, CCS-technology

In this bachelor's thesis we explore different carbon capture and storage (CCS) technologies and what is the current state of these CCS technologies. CCS is a way to reduce greenhouse gas emissions in energy sector and control climate change. Researchers have estimated that without CCS we will not reach international climate targets.

Carbon dioxide can be captured via post-combustion, pre-combustion and oxy-fuel combustion CO₂ capture. CO₂ can be stored for example to depleted oil and gas reservoirs and deep unused saline water-saturated reservoir rocks.

There are several CCS technologies that are almost ready for commercial use. The significant obstacle are these technologies high costs and political decisions. There are various carbon dioxide storages and storage technologies available in the world. The public acceptance of CCS technologies will determine whether this technology will be widely used in the future.

Lyhenteet

BECCS	bioenergian käyttö yhdistettynä hiilidioksidin talteenotto ja varastointi tekniikkaan (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)
CCS	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage)
IGCC	(Integrated Gasification Combined Cycle)
IPCC	hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
EOR	tehostetty öljyn talteenotto (Enhanced Oil Recovery)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

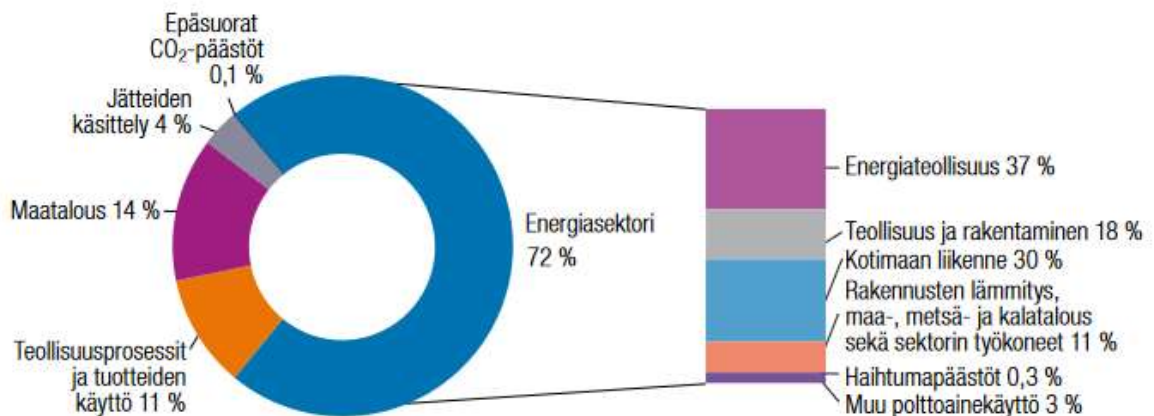
(Lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	6
2	Hiilidioksidin talteenottotekniikoita.....	9
2.1	Talteenotto savukaasuista.....	10
2.1.1	Hiilidioksidin talteenotto kemiallisella absorptiolla.....	11
2.2	Talteenotto ennen polttoa.....	13
2.2.1	Chemical looping.....	14
2.3	Happipolttu.....	16
3	Hiilidioksidin varastointitekniikoita.....	17
3.1	Hiilidioksidin geologinen varastointi.....	18
3.1.1	Varastointivaihtoehdot.....	19
4	CCS tekniikat tulevaisuudessa	22
4.1	Talteenottotekniikat tulevaisuudessa	22
4.2	Varastointitekniikat tulevaisuudessa	24
5	Johtopäätökset	25
	Lähteet	27

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on yksi suurimpia uhkia maapallolle ja koko ihmiskunnalle. Ilmastonmuutos on seuraus ihmisten tuottamista kasvihuonekaasupäästöistä, jotka lämmittävät ilmastoa ja nostattavat maapallon keskilämpötilaa. Ilmastonmuutos uhkaa tehdä maapallosta elinkelvottoman paikan niin ihmisille, kuin monille muillekin eliökunnan lajeille.

Energiasektori aiheuttaa Suomessa, sekä muissa teollisuusvaltioissa ylivoimaisesti eniten kasvihuonekaasupäästöjä. Kuten kuvasta 1 voi lukea, energiasektorin kasvihuonekaasupäästöt Suomessa vuonna 2020 oli 72 % (34,7 milj. tonnia CO₂-ekv.) kaikista kasvihuonekaasupäästöistä. (Tilastokeskus, 2021)



Kuva 1. Suomen kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain vuonna 2020. (Tilastokeskus, 2021)

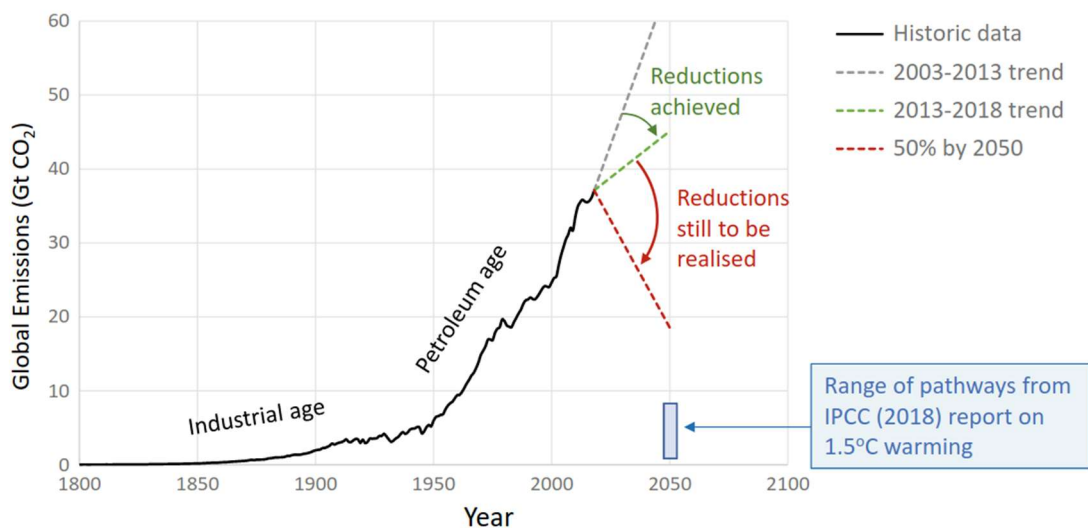
Kansainvälisessä Pariisin ilmastosopimuksessa vuonna 2015 sovittiin, että kasvihuonekaasupäästöt on maailmanlaajuisesti saatava laskuun mahdollisimman nopeasti. Keskeisenä tavoitteena on rajoittaa ilmastonlämpeneminen 1,5 °C. (Ympäristöministeriö, n.d.) Tällä hetkellä näyttää kuitenkin siltä, että tähän tavoitteeseen ei päästä.

Suurin osa kasvihuonekaasuista ovat hiilidioksidia ja sen määrä ilmakehässä kasvaa ennätysvauhtia (2,0 ppm/yr). 2016 oli ensimmäinen vuosi ihmiskunnan historiassa, kun ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ei laskenut kertaakaan alle 400ppm. (Bailera et al., 2020)

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) arvion mukaan seuraavien vuosikymmenien kasvihuonekaasupäästöt ratkaisevat

sen, pystymmekö rajoittamaan ilmastonlämpenemisen 1,5 °C. Jotta pääsemme 1,5 °C tavoitteeseen, vuoteen 2050 mennessä uusiutuvien energioiden osuus energiantuotannossa täytyisi olla 52–67 %. Hiilen käytön määrän energiantuotannossa täytyisi puolestaan pienentyä ja jäljelle jäävästä hiilen osuudesta suurimpaan osaan täytyisi yhdistää hiilidioksidin talteenotto- ja varastointijärjestelmä. (IPCC, 2018)

Kuvassa 2 on kuvaaja koko maapallon hiilidioksidipäästöistä vuosittain. Kuvaan on myös merkattu IPCC:n asettama päästötavoite vuoteen 2050 mennessä. Punainen katkoviiva kuvaa trendiviivan muutosta, joka täytyy tapahtua päästäksemme tavoitteeseen.



Kuva 2. Maailman hiilidioksidipäästöt vuosittain. (Ringrose, 2020)

Hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla eli CCS:llä (Carbon Capture and Storage) on potentiaalia vähentää energiasektorin ja teollisuuden hiilidioksidipäästöjä merkittävästi. CCS- prosessin tavoitteena on eristää hiilidioksidi ilmastosta ja siksi CCS-tekniikoilla enustetaankin olevan suuri rooli ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. CCS mahdollistaa nopeamman ja edullisemmän energiasiirtymän, kuin mitä pelkät uusiutuvat energiat tarjoaisivat. CCS:n ja bioenergianpolton yhdistäminen mahdollistavat jopa hiilinegatiivisen energiantuotannon. (Ringrose, 2020)

CCS- prosessin ensimmäinen vaihe on talteenottaa hiilidioksidia sen päästölähteistä, eli voimalaitoksista ja teollisuusalueista. Talteenoton jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan ja paineistetaan kuljetusta varten. Kuljetus voi tapahtua mm. putkikuljetuksena tai säiliöissä laivalla tai autolla. Hiilidioksidin varastointipaikkana voi toimia esimerkiksi ehtyneet kaasuu-

tai öljykentät. CCS- tekniikka kattaa koko prosessiin tarvittavat laitteistot ja teknologiat. (Teir et al., 2009)

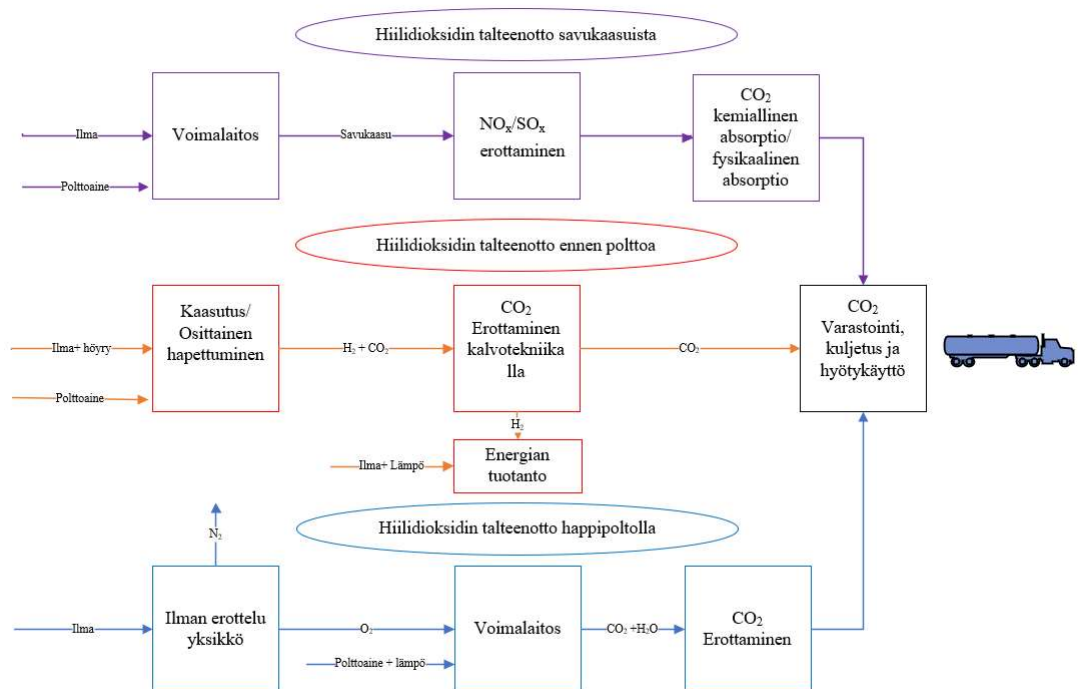
Tässä kandidaatintyössä perehdytään erilaisiin hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniikoihin. Työn tavoitteena on selvittää mikä on hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin nykytila. Työssä käydään läpi erilaisten tekniikoiden etuja ja haasteita, sekä erilaisten hiilidioksidin talteenoton ja varastointi tekniikoiden teknistä valmiutta kaupalliseen käyttöön.

2 Hiilidioksidin talteenottotekniikoita

Hiilidioksidin talteenottotekniikat voidaan jakaa kolmeen tapaan. Hiilidioksidin talteenottoon savukaasuista, hiilidioksidin talteenottoon ennen savukaasuja ja happipolttoon. Hiilidioksidin talteenottotekniikan valinnassa täytyy huomioida laitteiston asennus mahdollisuudet, kiinteät kustannukset, teknologian käyttökustannukset ja jälkiasentaminen jo olemassa oleviin kohteisiin. (Khalid et al., 2022)

Hiilidioksidin talteenottotekniikoiden tärkeimpiä tavoitteita on tuottaa sellainen hiilidioksidivirta, joka saadaan helposti kuljetettua hiilidioksidin varastointipaikalle. Varastointipaikan olisi hyvä olla järkevän etäisyyden päässä talteenotto paikasta, jottei hiilidioksidin kuljetukseen kulu tarpeettoman paljon energiaa. (Pant, 2021)

Kuvassa 3 on esitetty eri hiilidioksidin talteenottotekniikoita ja niiden välivaiheita. Kuvasta näkee mitä eri vaiheita erilaisiin talteenottotekniikoihin kuuluu ja mitä lähtötuotteita tarvitaan ja mitä sivutuotteita prosesseissa syntyy.



Kuva 3. Hiilidioksidin talteenottotekniikoita. (Yadav & Mondal, 2022, s.3)

Hiilidioksidin talteenoton yhteydessä puhutaan paljon energiahäviöistä. Energiahäviö kertoo, kuinka paljon energiaa kuluu hiilidioksidin talteenottoprosessissa suhteutettuna laitoksen tuottamaan energiaan. (Vasudevan et al., 2016)

Hiilidioksidin talteenottojärjestelmän vaatima energia aiheuttaa laitoksille merkittäviä hyötysuhteen laskuja. Se johtaa laitoksen aiheuttamien ympäristövaikutuksien nousuun, koska silloin kun laitoksen energiankulutus nousee, silloin myös polttoaineen kulutus nousee ja laitoksen aiheuttamien jätteiden määrä nousee. Hiilidioksidin talteenottojärjestelmien tärkeimpiä kehityskohteita ovat energiahäviöiden pinentäminen. (Pant, 2021)

Yhdistämällä biomassan poltto CCS-tekniikkaan, on mahdollista saavuttaa hiilinegatiivinen energiantuotanto. BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) voi poistaa jopa 0,5-1 tonnia hiilidioksidia per tuotettu MWh. BECCS onkin herättänyt erityistä mielenkiintoa tutkijoissa ja päättäjissä ympäri maailmaa. (Zhang et al., 2022)

2.1 Talteenotto savukaasuista

Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista tapahtuu polttoprosessin jälkeen syntyvässä savukaasuissa. Hiilidioksidin talteenottoyksikkö voidaan integroida laitokseen omana savukaasujen erottelu yksikkönään. Tämä mahdollistaa hiilidioksidin talteenottojärjestelmän integroimisen myös jo olemassa oleviin voima- ja teollisuuslaitoksiin, eikä CCS prosessia varten tarvitse rakentaa kokonaan uutta voimalaitosta. Tästä syystä hiilidioksidin talteenotto savukaasuista onkin yksi lupaavimmista tavoista talteenottaa hiilidioksidia ja vähentää teollisuuden aiheuttamia hiilidioksidi päästöjä. Järjestelmä pystyy talteenottamaan 85–90 % savukaasujen hiilidioksidista. (Feron, 2016)

Hiilidioksidia voidaan erotella savukaasuista useilla eri tekniikoilla kuten kalvotekniikalla, absorptiolla, fysikaalisella absorptiolla ja kemiallisella absorptiolla. Suosituin tekniikka on erottaa hiilidioksidi savukaasuista kemiallisen absorptio avulla, jolloin liuotin absorboi hiilidioksidin ja regeneroitumisen avulla vapauttaa sen tuottaen puhtaan CO₂ virran. (Khalid et al., 2022)

Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista kuluttaa paljon energiaa, koska liuottimen regeneraatio vaatii korkean lämpötilan. Suuri energiankulutus vähentää laitoksen nettohyöty-

suhdetta ja kasvattaa polttoaineen kulutusta ja kustannuksia. Hiilidioksidin talteenottojärjestelmän aiheuttamat häviöt aiheuttavat toiminnallisia ja taloudellisia epävarmuuksia etenkin vanhoille laitoksille. Talteenottojärjestelmän tueksi voimalaitoksille voidaan asentaa aurinkopaneeleja kompensoimaan energiahäviöitä ja tukemaan sähköntuotantoa. (Feron, 2016)

Suurimmat haasteet hiilidioksidin talteenotosta savukaasuista ovat suuret hiilidioksidin talteenottomäärät, alhaiset osapaineet ja korkea energiantarve. Järjestelmän asentaminen voi nostaa sähkönhintaa jopa 30 %. (Bailera et al., 2020)

2.1.1 Hiilidioksidin talteenotto kemiallisella absorptiolla

Kemiallinen absorptio on tutkituin ja testatuin tapa talteenottaa hiilidioksidia savukaasuisista. Kemiallisella absorptiolla voidaan saavuttaa lähes puhdas (99 %) hiilidioksidi virta. Kemiallisessa absorptiossa liuotin aine absorboi hiilidioksidimolekyylin savukaasuisista. Tämän jälkeen liuotin regeneroidaan, eli lämmitetään korkeaan lämpötilaan, jolloin liuotin vapauttaa hiilidioksidimolekyylin ja siten hiilidioksidi saadaan eroteltua savukaasuisista ja syntyy puhdas hiilidioksidi virta, joka on valmis kuljetusta ja varastointia varten. (Khalid et al., 2022)

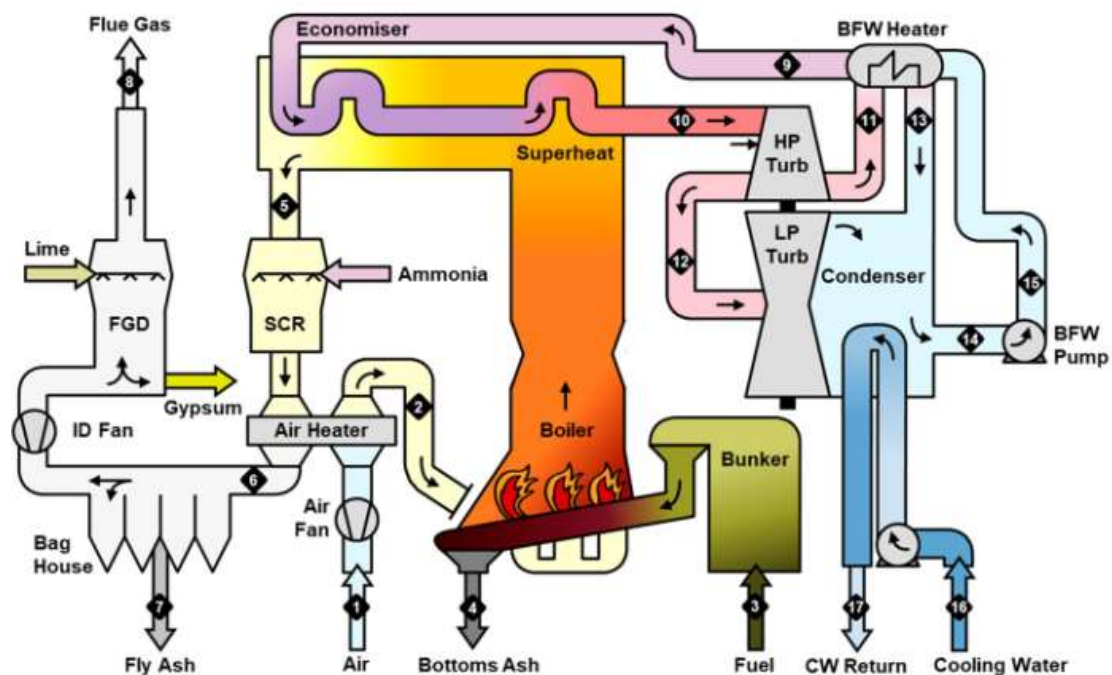
Kemiallisen absorption liuottimena voidaan käyttää mm. amiinipohjaisia liuottimia. Amiinipohjaisia kemialliseen absorptioon perustuvia hiilidioksidin talteenottojärjestelmiä on kaupallisessa käytössä jo jonkin verran. Amiini-liuotin lisätään savukaasuihin ylhäältäpäin, jolloin se absorboi CO₂ -molekyylin itseensä matkalla kolonnin pohjalle. Tämän jälkeen hiilidioksidin absorboinut amiini liuotin siirretään toiseen kolonniin, jossa CO₂ vapautuu. Amiinipohjainen absorptio prosessi pystyy talteenottamaan jopa 98 % hiilidioksidista. (Bailera, 2020) Amiini-prosessin ongelmana on hajoamistuotteena syntyvä nitrosoamiini, joka on ympäristömyrkky. (Khalid et al., 2022)

Suolasula-avusteinen magnesiumoksidi (MgO) on yksi liuotin vaihtoehto hiilidioksidin kemialliseen absorboimiseen savukaasuisista. Suolasulina voi toimia mm. alkalimetalli nitraatit, alkalit ja maa-alkalimetalli karbonaatit. Suolasulat ovat hyviä liuotin vaihtoehtoja, koska ne pysyvät termodynaamisesti tasapainossa, eivätkä vaadi korkeaa painetta korkeissa

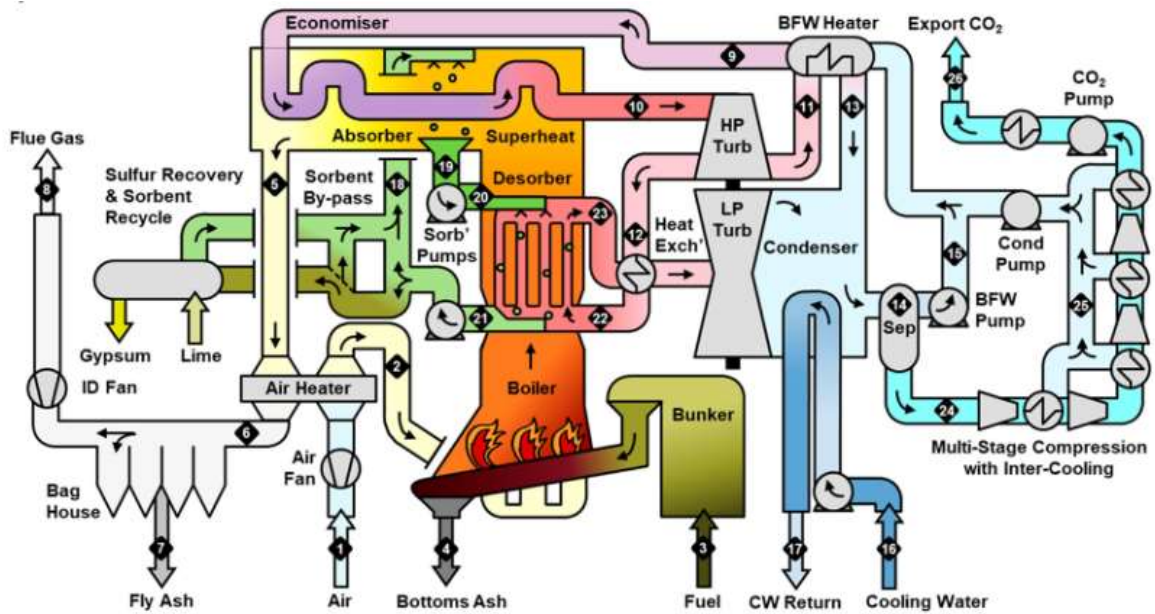
lämpötiloissa, joka helpottaa regeneroitumista. Etuna on myös laaja liukoisuusalue, joka mahdollistaa niiden käytön monipuolisissa olosuhteissa. (Shen, 2023)

Suolasulat ovat tuttuja aurinkoenergian tuotannosta, mutta viime vuosina suolasulia on alettu kehittää myös hiilidioksidin talteenottoa varten. Ne sopisivat hiilidioksidin talteenottoprosessiin, koska ne ovat helposti saatavilla, edullisia ja niillä on ainakin teoreettisesti korkea hiilidioksidin absorbointikyky (1,1g CO₂ per 1g MgO). Regeneroitukseen suolasula-avusteinen magnesiumoksidi vaatii 300–500°C lämpötilan, joka on huomattavasti alhaisempi verrattuna esimerkiksi kalsiumoksidiin (CaO), joka vaatii 850–950°C lämpötilan regeneroitukseen. (Shen, 2023)

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty kaksi eri voimalaitoksen prosessikaaviota. Kuvan 4 laitoksessa ei ole hiilidioksidin talteenottojärjestelmää ja kuvan 5 laitoksessa on. Kuvan 5 laitoksessa on suolasula-avusteinen MgO hiilidioksidin talteenottojärjestelmä. Kuvia vertailemalla huomaa, mitä muutoksia laitokseen tulee hiilidioksidin talteenottojärjestelmän mukana.



Kuva 4. Prosessikaavio voimalaitoksesta ilman hiilidioksidin talteenottojärjestelmää. (Shen, 2023)



Kuva 5. Prosessikaavio voimalaitoksesta hiilidioksidin talteenottojärjestelmän kanssa. (Shen, 2023)

Kuvassa 5 on limen vihreällä esitetty hiilidioksidin talteenotto prosessi ja turkoosissa osuudessa valmis hiilidioksidi virta poistuu laitoksen prosessista. Limen vihreässä osuudessa esitetään sorbentin, eli hiilidioksidia sitovan aineen kiertokulku voimalaitoksessa. Hiilidioksidi absorboidaan savukaasuista ja sorbentti regeneroidaan kattilan lämpöenergian avulla, jolloin hiilidioksidi vapautuu ja siirtyy turkoosiin osaan ja sorbentti jatkaa kiertoaan limen virheässä osuudessa. Turkoosissa osuudessa hiilidioksidi paineistetaan kuljetusta ja varastointia varten.

2.2 Talteenotto ennen polttoa

Hiilidioksidin talteenottojärjestelmä ennen polttoa perustuu siihen, että polttoaineesta poistetaan hiilidioksidi ennen sen polttamista. Polttoaine, joka voi olla mm. maakaasua, hiiltä tai biopolttoainetta, kaasutetaan lisäämällä siihen happea tai ilmaa ja höyryä, jotta syntyy synteesikaasua, joka sisältää hiilimonoksidia (CO) ja vetyä (H₂). Kaasutuksen jälkeen hiilimonoksidi (CO) katalysoidaan vesihöyryn avulla, jolloin syntyy hiilidioksidia (CO₂) ja vetyä (H₂). Kun hiilidioksidi on saatu eroteltua polttoaineesta molekyylitasolla, se pystytään talteenottamaan kaasuseoksesta, jossa sen pitoisuus on 15–60 %. (Bailera et al., 2020)

Hiilidioksidin talteenottoa ennen polttoa on kokeiltu pilottilaitoksissa, joissa on päästy testaamaan tekniikan soveltuvuutta. (Bailera et al., 2020) Tämän tekniikan haasteen on pääosin se, että hapen erottaminen ilmasta on kallista, koska siihen kuluu paljon energiaa. Tätä tekniikkaa varten täytyisi löytää tai kehittää materiaali, joka toteuttaa hapen erotuksen paljon tehokkaammin nykyiseen tapaan verrattuna. (Smit et al., 2014)

Vedyntuotannossa sivuvirtana syntyvää happea voitaisiin hyödyntää hiilidioksidin talteenottoprosesseissa. (Sivill et al., 2022) Vedyntuotantolaitoksiin olisi siis järkevää yhdistää hiilidioksidin talteenottojärjestelmä, joka perustuu joko talteenottoon ennen polttoa tai happipolttoon, koska silloin ei tarvitsisi rakentaa erillistä hapen erottelu yksikköä, kun happea syntyisi vetyprosessissa sivuvirtana.

Hiilidioksidin talteenottoteknologialla ennen polttoa ja happipoltto järjestelmällä pystytään talteenottamaan hiilidioksidia fossiilisia kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita käyttävien voimalaitoksen lisäksi myös maakaasulaitoksista. (Khalid et al., 2022) Hiilivoimalaitoksille talteenottojärjestelmä aiheuttaa 28 % energiahäviön ja kaasuvoimalaitoksille 25 % energiahäviön. (Bailera et al., 2020)

Hiilidioksidin talteenottotekniikkaa ennen polttoa sovelletaan usein IGCC (Integrated gasification combined cycle) laitoksissa. (Nemitallah et al., 2019) IGCC:n tavoitteena on tuottaa puhdasta energiaa edullisesti ja tehokkaasti kaasutuksen avulla. Polttoaineena käytetään kiinteitä tai nestemäisiä hiilivety polttoaineita. Hiilivety polttoaineisiin kuuluu mm. hiili, biomassa ja yhdyskuntajäte. Hiilidioksiin talteenotto osana IGCC prosessia on edullisempää kuin talteenottaa hiilidioksidi savukaasuista. (Wang & Gary, 2017)

2.2.1 Chemical looping

Kemikaalikierrollinen (Chemical looping) hiilidioksidin talteenotto prosessi perustuu hapetus- pelkistysreaktioon. Kemikaalikierrollinen prosessi erottelee hiilidioksidin fossiilisten polttoaineiden polton yhteydessä. (Brandl, 2019)

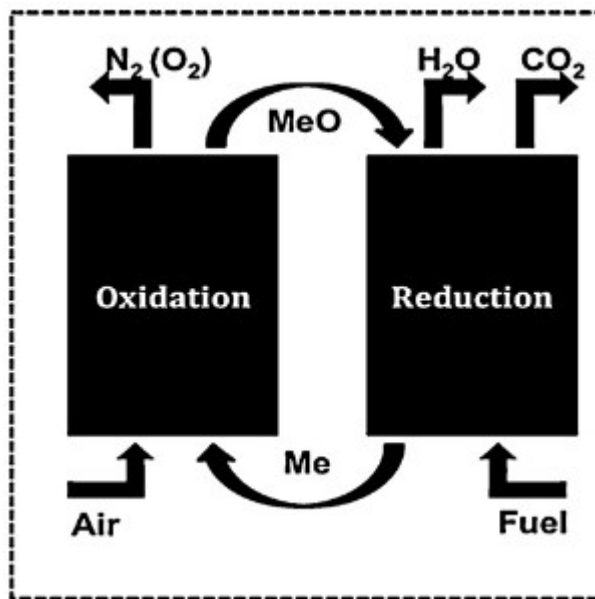
Hapetusreaktiossa välittäjäaineena toimiva metalli sitoo ilmasta hapen itseensä ja pelkistysreaktiossa hapetusreaktiossa syntynyt metallioksidi luovuttaa hapen polttoainevirtaan, jolloin lopputuotteeksi syntyy hiilidioksidia ja vettä. Pelkistysprosessissa syntyvä hiilidiok-

sivivirta on lähes puhdasta ja on siten heti valmis kuljetusta ja varastointia varten. (Nejera et al., 2011)

Suurimmassa osassa kemikaalikiertoon perustuvissa talteenottojärjestelmissä välittäjäaineena toimii metalli esim. rauta (Fe), kupari (Cu) tai mangaani (Mn). Metallin sitoo hapen ilmasta itseensä muodostaen metallioksideja (MeO). (Brandl, 2019)

Kemikaalikierron polttoprosessi on tehokas hiilidioksidin talteenottotekniikka ja sen etuna on, ettei polttoprosessissa synny lainkaan haitallisia typenoksideja (NO_x). (Nejera et al., 2011)

Kuvassa 6 on havainnollistettu hapetus-pelkistysreaktio. Välittäjäaineena toimiva metallioksideja kiertää hapetus ja pelkistysprosessissa.



Kuva 6. Hapetus-pelkistysreaktio. (Nejera et al., 2011)

Kemikaalikierron prosessin etuna on toivottujen ja ei toivottujen tuotteiden luonnollinen erottelu, eksergia häviöiden pieneminen ja turvallinen operointi. Kemikaalikierron hiilidioksidin talteenottotekniikka on suhteellisen uutta ja on muihin talteenottotekniikoihin verrattuna kauempana kaupallisesta valmiudesta. (Brandl, 2019)

2.3 Happipoltto

Happipolton ideana on polttaa polttoainetta ilman sijasta puhtaan hapen kanssa, silloin palamistuotteiksi syntyy pääosin hiilidioksidia ja vesihöyryä. Palamistuotteeksi syntyy lisäksi pienimäärä rikinoksideita (SO_x), ja pienhiukkasia. Savukaasuista pienhiukkaset saadaan talteenotettua sähkösuodattimilla, SO_x -päästöt saadaan talteenotettua rikinpoistojärjestelmällä ja vesihöyry saadaan poistettua kondensoimalla höyry nesteeksi. Jäljelle jäävä hiilidioksidi saadaan kerättyä talteen paineistusta ja kuljetusta varten. (Khalid et al., 2022)

Ennen polttoa ilma käsitellään hapen erottelu kolonnissa, jossa siitä poistetaan typpi ja muut ylimääräiset aineet, jotta jäljelle jää vain puhdas happi. Hapen erottelu prosessi vie paljon energiaa ja nostattaa siten laitoksen kustannuksia. Happipoltossa syntyy myös normaalia enemmän rikkioksideita, jotka aiheuttavat korroosiota ja vähentävät siten putkistojen ja laitteistojen käyttöikä. (Khalid et al., 2022)

Happipoltossa lopputuotteeksi syntyy paljon enemmän hiilidioksidia, kuin normaalisti, koska palamisilmassa ei ole mukana typpeä. Happipoltossa poltto ominaisuudet ovat myös hyvin erilaiset verrattuna ilman kanssa polttamiseen. (Nemitallah et al., 2019)

Polttoon tarvittava happi erotellaan kryogeenisen prosessin avulla, joka on erittäin kallis tekniikka. Tällä hetkellä tutkitaan erilaisia kalvotekniikoita, jotka mahdollistaisivat hapen erottelun edullisemmin ja tehokkaammin. Tutkimuksen kohteena on erityisesti eri kalvo materiaalit, kuten polymeeri ja keraami. Polymeerikalvot mahdollistavat suuren happi virran, mutta haittapuolena on se, että mukaan pääsee myös paljon typpeä. Keraamikalvojen avulla saadaan erittäin puhdasta happea, mutta liian hitaalla virtausnopeudella. Ideaali tilanteessa ilmasta saataisiin eroteltua puhdasta happea suurella virtausnopeudella. (Nemitallah et al., 2019)

Hapen erottelu yksikkö aiheuttaa 7–13 % energia häviön, joka vastaa 20 % nousua polttoaineen kulutuksessa. Energiahäviön pienentämiseksi on ehdotettu erilaisia keinoja, kuten ilman erottelu yksikön optimointia ja useampien talteenottotekniikoiden yhdistämistä. (Bailera et al., 2020)

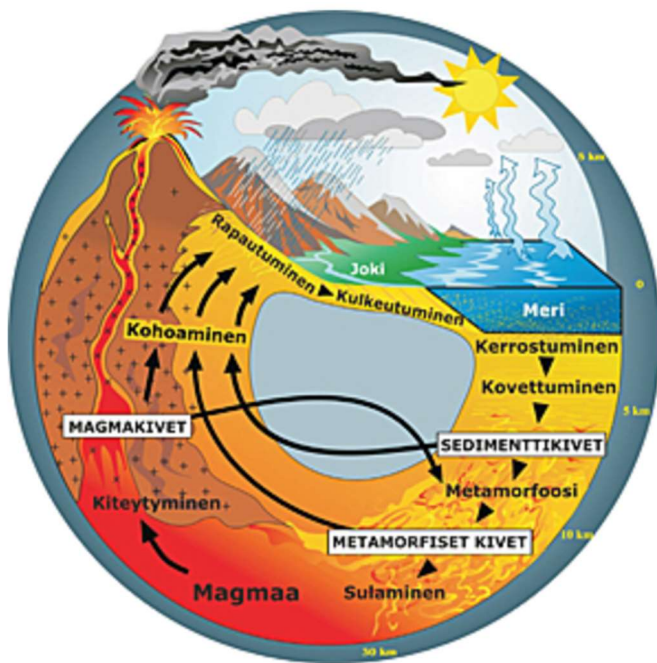
3 Hiilidioksidin varastointitekniikoita

Hiilidioksidin geologisen varastoinnin tavoitteena on estää hiilidioksidin pääsy ilmakehään. Talteenotto-prosessin jälkeen hiilidioksidi kuljetetaan varastointipaikalle ja syötetään syvälle kallioperään varastoon maankuoren alle. Maankuori on toiminut luonnollisena hiilidioksidin varastointi paikkana maapallolla jo satoja miljoonia vuosia. (Nemitellah et al., 2019)

Hiilidioksidin varastointitekniikat sai alkunsa siitä, kun hiilidioksidia hyödynnettiin öljyn talteenotto eli EOR-prosessissa (Enhanced Oil Recovery). Hiilidioksidin varastointi osana EOR-prosessia todisti, että on mahdollista varastoida suuria määriä hiilidioksidia maan alle siten, että se myös pysyy siellä, eikä karkaa pois. (Global CCS Institute, 2022)

Hiilidioksidin geologisille varastointipaikoille on olemassa tiettyjä kriteereitä. Varaston täytyy olla tarpeeksi syvällä maan alla, jotta vallitseva paine ja lämpötila pitävät hiilidioksidin sopivassa tiheydessä. Maaperän huokoisuus varastointipaikassa täytyy myös olla sopiva, jotta hiilidioksidia pystytään varastoimaan pitkäkestoisesti. Varaston päällä olevan kallioperän täytyy myös olla riittävän tiivis, jottei hiilidioksidi pääse noste voiman vaikutuksesta karkaamaan maaperästä. Sedimenttikivikerrostumat täyttävät nämä kriteerit ja sopivat siksi hyvin hiilidioksidin varastointipaikoiksi. (Brandl, 2019)

Sedimenttikivikerrostumat muodostuvan mineraalisesta- tai eloperäisestä maa-aineksesta, joka on eroosion ja rapautumisen seurauksena irtautunut ja myöhemmin kivettynyt kerrostumiksi maaperään. Kuva 7 havainnollistaa sedimenttikiven muodostumista. (Kaiva.fi, n.d.)



Kuva 7. Sedimenttikiven muodostuminen luonnon kiertokulussa. (Kaiva.fi, n.d.)

3.1 Hiilidioksidin geologinen varastointi

Yksi ratkaisu kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi on hiilidioksidin pysyvä varastointi maan alle. Hiilidioksidin varastointi on pysyvä ratkaisu, jonka tarkoituksena on eristää hiilidioksidi ilmakehästä ja varastoida se maan alle tuhansiksi vuosiksi. Hiilidioksidi ei ole yksinkertainen jäte, joka voidaan vaan tunkea maan alle, vaan se on olennainen osa hiilenkiertokulkua, joka tekee siitä haastavan aineen käsitellä. (Ringrose, 2020)

Tällä hetkellä hiilidioksidia varastoidaan vuodessa noin. 40 milj. tonnia. Tulevaisuudessa varastointikapasiteetin täytyy nousta miljardeihin tonneihin vuodessa, jotta pääsisimme ilmastotavoitteisiin ajoissa. (Global CCS Institute, 2022)

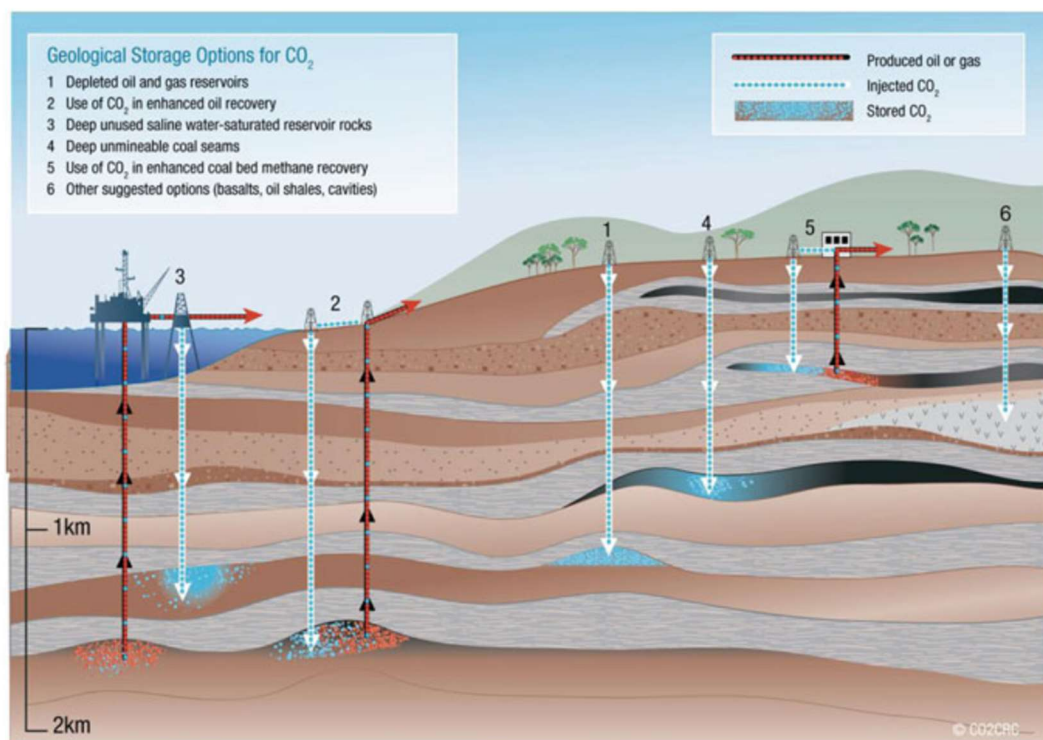
Ei ole täysin varmaa pystytäänkö hiilidioksidia pysyvästi eristämään maan alle, mutta teoriassa riittäisi se, että hiilidioksidi eristettäisiin ilmakehästä vain muutamaksi tuhanneksi vuodeksi, jotta saavutamme CCS tekniikalla sen, mitä haemme. Varastointia pystytään kuitenkin demonstroimaan ja on olemassa varastointitekniikoita, jotka mahdollistavat pitkän aikaisen ja turvallisen hiilidioksidin varastoinnin. (Ringrose, 2020)

Hiilidioksidin varastoinnin kannalta on oleellista tietää, kuinka paljon hiilidioksidia täytyy varastoida, mikä on hiilidioksidin koostumus, paine, lämpötila, virtausnopeus ja kuinka säännöllisesti hiilidioksidi tulee varastointipaikalle. (Ringrose, 2020)

Hiilidioksidia pystytään kuljettamaan putkissa, laivoissa ja säiliöautoissa. Hiilidioksidin termodynaamiset ominaisuudet tekevät siitä kuitenkin haastavan kaasun kuljettavaksi, koska talteenoton jälkeen, sitä saattaa esiintyä jokaisessa faasiolomuodossa. (Ringrose, 2020)

3.1.1 Varastointivaihtoehdot

Hiilidioksidin varastointivaihtoehtoja ovat suolaiset pohjavesikerrostumat, ehtyneet öljy ja kaasuvarastot, hiilidioksidin varastointi osana EOR-prosessia, hiiliesiintymiin sitominen, varastointi meren pohjakerrostumiin ja mineralisaatio. (Ilmasto-opas.fi) Kuvassa 8 on esitetty erilaisia geologisia hiilidioksidin varastointivaihtoehtoja.



Kuva 8. Hiilidioksidin varastointivaihtoehtoja. (Ringrose, 2020)

Suolaiset pohjavesikerrostumat ovat tällä hetkellä yleisimpiä hiilidioksidin varastointikohteita. Merkittävimmät varastointikohteet löytyvät Pohjois-Amerikasta ja Pohjanmereltä. (Global CCS Institute, 2022)

Suolaiset pohjavesikerrostumat ovat myös tilavuudeltaan suurimpia hiilidioksidin varastointivaihtoehtoja. (Ringrose, 2020) Suurimmasta osasta kohteista kuitenkin puuttuu tarvittava infrastruktuuri kuten syöttökaivot ja putkistot, joka tekee suolaisista pohjavesikerrostumista kalliin varastointivaihtoehdon. (Aminu et al., 2017)

Ehtyneet öljy- ja kaasuvarastot ovat potentiaalisia pitkäaikaisia hiilidioksidin varastointipaikkoja, koska ne ovat säilöneet jo tuhansia vuosia öljyä ja maakaasua. Hiilidioksidi täytyy pumpata yli 800 m syvyyteen, jotta maan alla vallitseva paine ja lämpötila pitävät hiilidioksidin nestemäisenä. Haasteena on varmistaa, että maanalainen varasto on eristetty ja tarpeeksi tiivis, mutta monia ehtyneitä öljy- ja kaasuvarastoja on tutkittu jo niin paljon, että pienillä lisätutkimuksilla löydettäisiin helposti vastaus varastointipaikan soveltuvuuteen. (Ilmasto-opas.fi, n.d.)

Hiilidioksidin varastointi ehtyneisiin öljy- ja kaasuvarastoihin tulee olemaan suosittu varastointitekniikka erityisesti Isossa-Britanniassa, Australiassa ja Kaakkois-Aasiassa. (Global CCS Institute, 2022)

Hiilidioksidin varastointi osana tehostettua öljyn talteenottoa eli EOR-prosessia on yksi geologinen tapa varastoida hiilidioksidia. Öljy varastoon syötetty hiilidioksidi puskee öljyn pinnalle, mutta hiilidioksidi jää maan alle varastoon. (Ringrose, 2020)

EOR-prosessissa jaksottainen hiilidioksidin syöttäminen varastoon parantaa kevytpolttoöljyn talteenottoa. Öljyn talteenotto perustuu öljyn turpoamiseen, viskositeetin pienenemiseen ja kaasun suhteelliseen permeabiliteettiin, joka kuvaa aineen magneettista käyttäytymistä. (Nemitellah et al., 2019)

Hiilidioksidin varastointitekniikalla osana EOR-prosessia on pisin historia verrattuna muihin varastointitekniikoihin, mutta tulevaisuudessa sen roolin on arvioitu jäävän pieneksi. (Global CCS Institute, 2022)

Hiilidioksidia voidaan myös varastoida hiiliesiintymiin pumpaamalla niihin hiilidioksidia. Hiilidioksidin sitominen hiilivarastoihin voidaan yhdistää myös EOR-prosessiin. Mahdollis-

set varastointi paikat tällä tekniikalla ovat kuitenkin pienet, joten tämä tapa ei tule olemaan merkittävät varastointi ratkaisu. (Ringrose, 2020)

4 CCS tekniikat tulevaisuudessa

On arvioitu, että CCS-tekniikoilla pystytään vähentämään jopa 20 % kokonaishiilidioksidipäästöistä vuoteen 2050 mennessä. Puolestaan CCS-tekniikoiden pois jättäminen voi nostaa ympäristötavoitteiden toteutumisen kustannuksia jopa 70 %. (Aminu et al., 2017)

CCS-tekniikan julkinen hyväksyntä tulee ratkaisemaan sen, kuinka laajasti CCS-tekniikoita otetaan käyttöön tulevaisuudessa. (Aminu et al., 2017) CCS-tekniikoilla on myös vastustajia, joiden mukaan CCS-tekniikkaa kannustaa fossiilisten polttoaineiden käyttöön pidempään, kuin mitä olisi tarpeellista ja siten hidastaisi energiasiirtymää. (Ringrose, 2020) Esimerkiksi Saksassa on vastuttettu CCS-teknologiaa jo vuosia.

Saksa on rajoittanut CCS-tekniikkaan liittyviä tutkimuksia, testejä ja varastoitavan hiilidioksidin määrää maassa vuodesta 2012 lähtien. Vuoden 2022 joulukuussa liittovaltion hallitus kuitenkin teki ehdotuksen, jossa lakia höllennettäisiin, jotta Saksassakin voitaisiin ottaa CCS-teknologiat laajemmassa mittakaavassa käyttöön. (BMWK, 2023)

Euroopan komission ilmoittaa nettisivuillaan kannattavansa aktiivisesti hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniikoita. Erityisesti EU komissio kannustaa hiilidioksidin talteenottoa yhdistettynä bioenergian polttoon. EU komissio myös tukee CCS-teknologioihin liittyviä tutkimuksia ja rahoittaa erilaisia CCS-projekteja. (European commission, 2023)

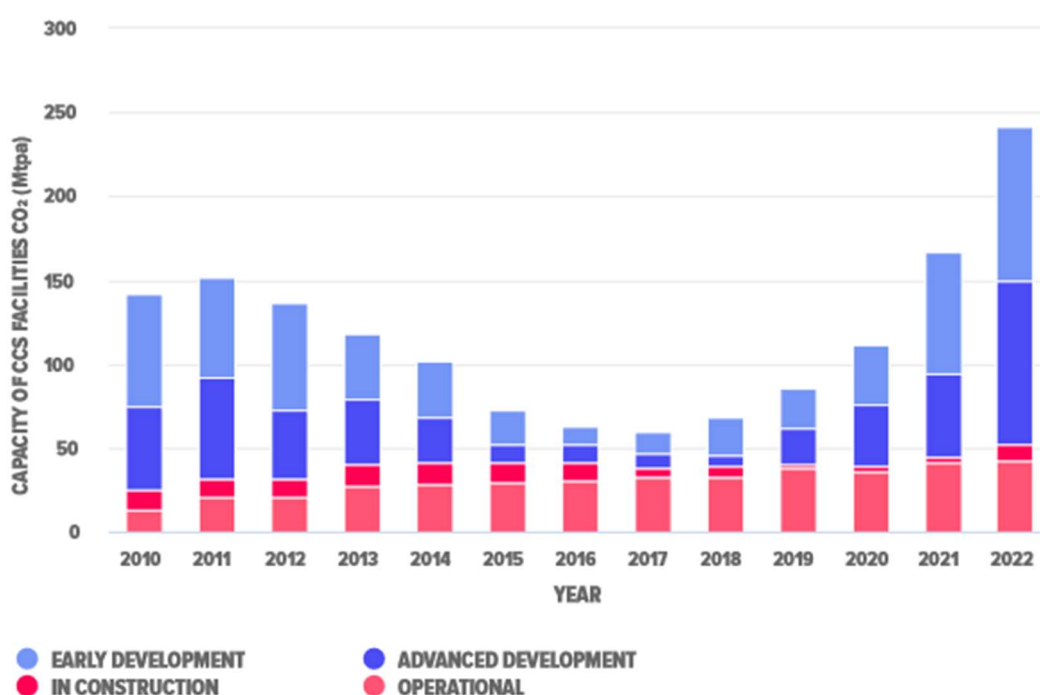
Rotterdamın satamaan Alankomaihin on rakenteilla hiilidioksidin talteenotto ja varastointilaitos. Tällä hetkellä projekti odottaa lopullisia investointipäätöksiä ja rakentamisen on tarkoitus alkaa vuonna 2023 tai 2024 ja laitoksen on määrä valmistua vuonna 2026. Valmistuessaan laitos varastoisii 2,5 megatonnia hiilidioksidia vuodessa, 15 vuoden ajan. Hiilidioksidi varastoitaisiin putkea pitkin Pohjanmereen ehtyneeseen maakaasuvarastoon. (Porthos, 2023)

4.1 Talteenottotekniikat tulevaisuudessa

Tällä hetkellä hiilidioksidin talteenottoteknologiat ovat kalliita ja kuluttavat paljon energiaa. On tärkeää tehdä lisää tutkimuksia hiilidioksidin talteenottotekniikoista, jotta kustan-

nuksia ja energiahäviöitä saataisiin laskettua, jotta tekniikoiden käyttöönotto olisi houkuttelevampaa asiakkaille. (Khalid et al., 2022)

Kuvassa 9 on esitetty CCS-tekniikoiden kapasiteetti vuosina 2010–2022, johon on huomioitu sekä toiminnassa, että rakenteilla ja suunnitteilla olevat laitokset. Kuvaan on merkattu kuinka monta miljoona tonnia vuodessa ne tulevat talteenottamaan ja varastoimaan hiilidioksidia. Kuvasta huomaa, että vuodesta 2017 lähtien CCS-tekniikoiden suosio on ollut jatkuvassa nousussa.

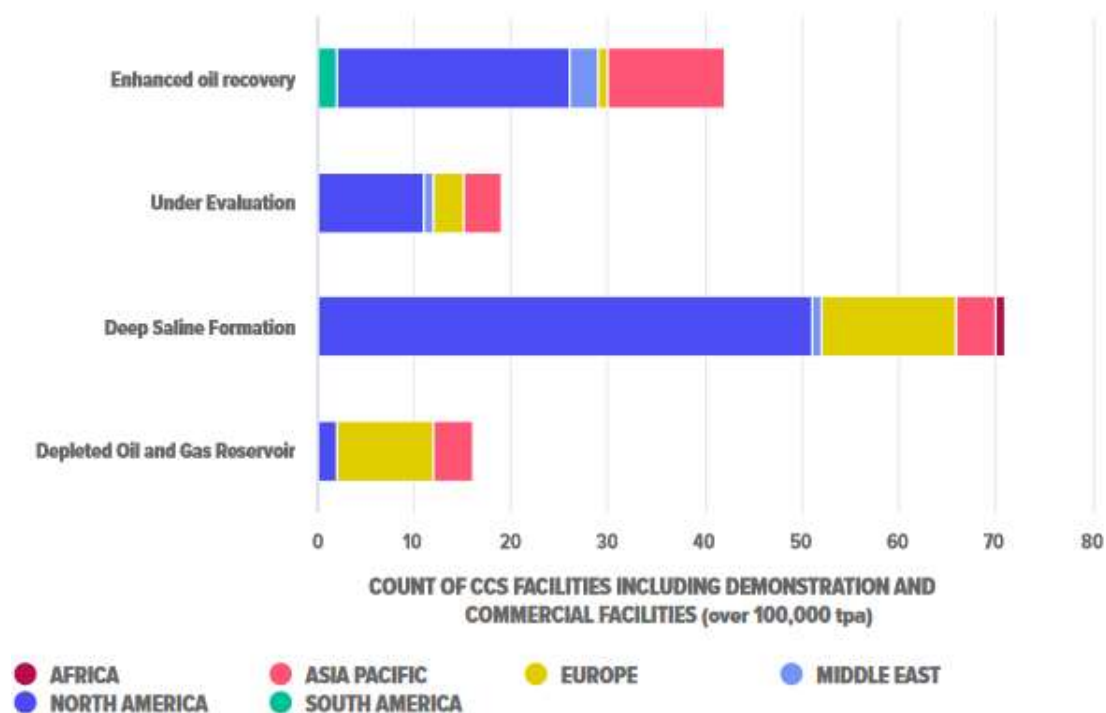


Kuva 9. CCS-tekniikoiden kapasiteetti 2010–2022. (Global CCS Institute, 2022)

Porvoon jalostamolle on suunnitteilla vedyn tuotantolaitos ja hiilidioksidin talteenottolaitos. Vedyntuotannossa syntyy ylimääräisenä happea, jota voitaisiin hyödyntää hiilidioksidin talteenotto-prosessissa. Porvoon Kilpilahteen olisi tulossa hiilidioksidin talteenottolaitos, joka talteenottaisi 250 000–400 000 tonnia hiilidioksidia vuodessa. Talteenotettu hiilidioksidi kuljetettaisiin laivalla ulkomaille varastointiin ja Kilpilahdessa se vain välivarastoitaisiin. (ELY-keskus, 2022) Alustavissa suunnitelmissa vedyntuotanto laitos aloittaisi toimintansa vuonna 2024 ja hiilidioksidin talteenottolaitos vuonna 2025. (Ympäristöterveysjaosto, 2022)

4.2 Varastointitekniikat tulevaisuudessa

Kuvassa 10 on esitetty valmiiden, tällä hetkellä rakenteilla olevien ja tulevaisuudessa toteutuvien hiilidioksidin varastointilaitoksien kapasiteetti. Kuvan taulukkoon on kerätty yli 150 laitoksen data. Kuvasta myös huomaa, että suurin osa varastointipaikoista sijoittuu Pohjois-Amerikkaan. Euroopassa suurimmat varastointimahdollisuudet ovat ehtyneissä öljy- ja kaasuvarastoissa, sekä suolaisissa pohjavesikerrostumissa.



Kuva 10. Hiilidioksidin varastointilaitoksien kapasiteetti. (Global CCS Institute, 2022)

Potentiaalisia hiilidioksidin varastointipaikkoja on valtavasti, eikä niiden puuttuminen tule olemaan este CCS-tekniikoille. Monista varastointipaikoista täytyy vain suorittaa tarvittavat tutkimukset, jotta voimme varmistaa niiden sopivuuden juuri hiilidioksidin varastointiin.

5 Johtopäätökset

Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista kemiallisen absorptio-avulla on tutkituin ja testatuin talteenottotekniikka. Savukaasutekniikalla on suurin teknillinen valmius kaupalliseen käyttöön, joka pitkälti johtuu myös siitä, että se on pitkään ollut houkuttelevin tekniikka varastoida hiilidioksidia. Tekniikan etuna on se, että hiilidioksidin talteenotto savukaasuis- ta pystytään integroimaan jo olemassa oleviin laitoksiin.

Hiilidioksidin talteenotto ennen polttoa ja happipolton avulla ovat myös lupaavia tekniikoi- ta, mutta niiden tarvitsemat hapen erotteluyksiköt ovat kalliita ja vievät paljon energiaa ja siksi kaipaavat vielä lisä tutkimuksia. Tulevaisuudessa hapen erotteluyksikköön liittyvät ongelmat voisivat ratkaista yhdistämällä näitä tekniikoita vedyntuotantoon, koska siellä happea syntyy sivuvirtana.

Hiilidioksidin talteenottotekniikat tarvitsevat vielä lisää tutkimuksia, jotta niiden aiheutta- mia energiahäviöitä saataisiin laskettua, jolloin niiden käyttöönotosta saataisiin houkutte- levampaa. CCS tekniikoiden kustannukset ovat kuitenkin jatkuvasti laskussa, mitä enem- män niitä otetaan käyttöön ja mitä enemmän tekniikoita tutkitaan.

Tällä hetkellä CCS- tekniikoiden suosio on kasvussa ja kiinnostus tekniikka kohtaan on lisääntynyt myös poliittisilla päättäjillä. Paine päästä kansainvälisiin ilmastotavoitteisiin kasvaa ja jo taloudellisista syistä alkaa olla kannattavaa perusta CCS-laitoksia, mikäli il- mastotavoitteet halutaan saavuttaa. Biomassan polton yhdistäminen CCS-tekniikkaan mahdollistaa hiilinegatiivisen energiantuotannon ja se on herättänyt huomiota ympäri maa- ilmaa.

Tilavuudeltaan suurimmat varastointi kohteet löytyvät suolaisista pohjavesikerrostumista, moni näistä kohteista vaatii vielä paljon lisätutkimuksia, jotta tiedetään ovatko kohteet tar- peeksi tiiviitä hiilidioksidin varastointia varten.

Eniten tutkimuksia on tehty ehtyneisiin öljy- ja kaasuväistöihin, sillä niitä on tutkittu pal- jon jo öljyn ja kaasun porausta varten. Tämän varastointitekniikan etuna on se, että paikalla on jo tarvittava infrastruktuuri, jota voidaan hyödyntää hiilidioksidin varastoinnissa.

CCS-tekniikoiden julkinen hyväksyntä tulee määrittämään sen, kuinka laajasti tekniikoita tullaan tulevaisuudessa ottamaan kaupalliseen käyttöön. EU komissio tukee CCS-tekniikoita ja se kannustaa monia EU maita investoimaan CCS-tekniikoihin. Tällä hetkellä CCS-tekniikoiden tulevaisuuden näkymät näyttävät hyvältä, koska tekniikoihin investoidaan joka vuosi yhä enemmän. Paljon täytyy kuitenkin vielä tehdä töitä, jotta CCS-tekniikoita olisi käytössä laajamittaisesti ympäri maailmaa.

Lähteet

Aminu, Mohammed D. Nabavi, Seyed Ali. Rochelle, Christopher A. Manovic, Vasilije. 2017. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied energy*, 2017, Vol.208, p.1389-1419. Elsevier Ltd. Elsevier SD Complete Freedom Collection [SCCMFC].

Bailera, Manuel. Lisbona, Pilar. Peña, Begoña. Romeo, Luis M. 2020. *Energy Storage Hybridization of Power-to-Gas Technology and Carbon Capture*. 1st ed. 2020. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer

BMWK (Bundesministerium für wirtschaft und klimaschutz). 2023. *CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie*. [verkkoaineisto]. [viitattu: 21.4.2023]. Saatavilla: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weiterentwicklung-ccs-technologien.html>

Brandl, Patrick. 2019. *Carbon capture and storage (2020 edition)*. Cambridge, England: Royal Society of Chemistry.

ELY-keskus. 2022. Päätös ympäristövaikutusten arviointimenettelyn (yva-menettelyn) soveltamisesta yksittäistapauksessa; Hiilidioksidin talteenotto ja uusiutuvan vedyn tuotanto Porvoon jalostamolla. Elinkeino-liikenne- ja ympäristökeskus. UUDELY/1288/2022. [pdf.] Saatavissa: file:///C:/Users/x084926/Downloads/Neste_CCS_vety_p%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s.pdf

European Commission. 2023. *Carbon capture, storage and utilisation*. [verkkoaineisto]. [viitattu: 21.4.2023]. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-storage-and-utilisation_en

Feron, Paul H.M. 2016. *Absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide*. Duxford, England: Woodhead Publishing.

Global CCS Institute. 2022. *Global status of CCS 2022*. [verkkoaineisto]. [viitattu: 29.3.2023]. Saatavissa: https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/11/Global-Status-of-CCS-2022_Download.pdf

Ilmasto-opas.fi. N.d. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. [verkkoaineisto]. [viitattu: 23.2.2023]. Saatavissa: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi>

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

Kaiva.fi. N.d. Kivilajien jaottelu ja syntytavat. [verkkoaineisto]. [viitattu: 2.3.2023]. Saatavilla: <https://kaiva.fi/geologia/kivilajit-ja-malmien-synty/kivilajien-jaottelu-ja-syntytavat/>

Khalid, Mohammad. Dharaskar, Swapnil A. Sillanpää, Mika. Siddiqui, Humaira. 2022. Emerging carbon capture technologies: towards a sustainable future. Electronic books. Amsterdam, Netherlands; London, England : Elsevier

Najera, Michelle. Solunke, Rahul. Gardner, Todd. Vesper, Götz. 2011. Carbon capture and utilization via chemical looping dry reforming: Carbon Capture & Storage. Chemical engineering research & design, 2011, Vol.89 (9), p.1533-1543. ISSN: 0263-8762. Amsterdam: Elsevier. Elsevier SD Complete Freedom Collection (subscription).

Nemitallah, Medhat A. Habib, Mohamed A. Badr, Hassan M. 2019. Oxyfuel Combustion for Clean Energy Applications. Green energy and technology, 1865-3529. 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer.

Pant, Deepak. 2021. Advances in carbon capture and utilization. Energy, Environment, and Sustainability Ser. Singapore: Springer.

Porthos. 2023. Project. Porthos CO2 transport and storage. [verkkoaineisto]. [viitattu: 21.4.2023]. Saatavissa: <https://www.porthosco2.nl/en/project/>

Ringrose, Philip. 2020. How to store CO2 underground: Insights from early-mover CCS projects. Springerbriefs in earth sciences, 2191-5369. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer.

Shen, Yafei. 2023. Molten salt-mediated carbon capture and conversion. *Fuel* (Guilford), 2023, Vol 339, p.127473. Artikkele. [pdf]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0016236123000868>

Sivill, Leena. Bröckl, Marika. Semkin, Nikita. Ruismäki, Antti. Pilpola, Henriikka. Laukkanen, Olli. Lehtinen, Hannele. Takamäki, Saana. Vasara Petri. Patronen, Jenni. 2022. Vetytalous- mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2022. Valtioneuvoston julkaisuarkisto Valto. [pdf]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf

Smit, Berend. Reimer, Jeffrey A. Oldenburg, Curtis M. Bourg, Ian C. 2014. Introduction to carbon capture and sequestration. The Berkley Lectures on Energy – Vol. 1. London: Imperial College Press

Tilastokeskus. 2021. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2020. [verkkojulkaisu]. ISSN 2670-2568 [pdf]. [Viitattu 1.3.2023]. Saatavissa: https://www.tilastokeskus.fi/static/media/uploads/yymp_kahup_1990-2020_2021_23462_net.pdf

Teir, Sebastian. Tsupari, Eemeli. Koljonen, Tiina. Pikkarainen, Toni. Kujanpää, Lauri. Arasto, Antti. Tourunen, Antti. Kärki, Janne. Nieminen, Matti. ja Aatos, Soile. 2009. Hiili-diksidin talteenotto ja (CCS). VTT TIEDOTTEITA- RESEARCH NOTES 2503. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2009/T2503.pdf>

Vasudevan, Suraj. Farooq, Shamsuzzaman. Karimi, Iftekhar A. Saeys, Mark. Quah, Michael C.G. Agrawal, Rakesh. 2016. Energy penalty estimates for CO₂ capture: Comparison between fuel types and capture-combustion modes. *Energy* (Oxford), 2016, Vol.103, p.709-714. Elsevier-ScienceDirect (LUT)

Wang, Ting. Stiegel, Gary. 2017. Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies. Woodhead Publishing in energy. ISBN: 0-08-100185-1. 1st edition. Waltham, MA:Elsevier. Library Catalog.

Yadav, Sujeet. Mondal, S.S. 2022. A review on the progress and prospects of oxy-fuel carbon capture and sequestration (CCS) technology. *Fuel* (Guildford), 2022, Vol.308, p.122057. Elsevier SD Complete Freedom Collection [SCCMFC].

Ympäristöministeriö. N.d. Pariisin ilmastosopimus. [verkkoaineisto]. [Viitattu 1.3.2023].

Saatavissa:

<https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus>

Ympäristöterveysjaosto, 2022. Neste OYJ:n hiilidioksidin talteenotto ja uusiutuvan vedyn tuotanto Porvoon jalostamolla, YVA-tarveharkinta, lausunto Uudenmaan ELY.kehitykselle. 1750/35/2022. [pdf.] Saatavissa:

<https://porvoo01.oncloudos.com/kokous/202212170-9.PDF>

Zhang, Yuxin. Wu, Shiliang. Cui, Dongxu. Yoon, Sang-Jun. Bae, Youn-Sang. Park, Bugae. Wu, Yinlong. Zhou, Fu. Pan, Cunhua. Xiao, Rui. 2022. Energy and CO2 emission analysis of a Bio-Energy with CCS system: Biomass gasification-solid oxide fuel cell-mini gas turbine-CO2 capture. [artikkeli]. Fuel processing technology, 2022, Vol.238,p.107476. Elsevier SD Complete Freedom Collection.