HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTOMENETELMIEN NYKYTILA JA NÄKYMÄT SEMENTTITEOLLISUUDESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Eeti Kulonen

Tarkastaja(t): Dosentti Kari Myöhänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Eeti Kulonen

Hiilidioksidin talteenottomenetelmien nykytila ja näkymät sementtiteollisuudessa

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua, 1 kuva, 6 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja(t): Dosentti Kari Myöhänen

Avainsanat: Hiilidioksidin talteenotto, CCUS, Sementti

Sementin valmistus aiheuttaa väistämättömästi hiilidioksidipäästöjä kalsinointireaktion takia, joita ei voida vähentää kansainvälisten ilmastosopimusten vaatimalle tasolle ilman hiilidioksidin talteenottoteknologiaa. Tässä kandidaatintyössä tehdään selvitys hiilidioksidin talteenottomenetelmistä sementtiteollisuudessa. Työn tavoitteena on selvittää alan kirjallisuudesta, minkälaisia hiilidioksidin talteenottomenetelmiä on tällä hetkellä käytössä sementtiteollisuudessa, esitellä niihin liittyvät projektit sekä tehdä teknologian valmiustasoarviointi jokaiselle menetelmälle.

Hiilidioksidin talteenottoon sementtiprosessista on kolme päätapaa, jotka eroavat toisistaan sijainnillaan prosessissa, ja kriittisten prosessien muutosten vaatimusasteella. Näiden päätapojen alla on erilaisia menetelmiä kaapata hiilidioksidia prosessista. Työssä esitellään näitä menetelmiä hyödyntävät projektit valmiustasoarviointia varten. Valmiustasoarvioinnin perusteella kemikaalinen absorptio on kypsin hiilidioksidin talteenottomenetelmä sementtiteollisuudessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Eeti Kulonen

The current state and future views of carbon-capture technologies in the cement industry

Bachelor's thesis

2023

30 pages, 1 figure, 6 tables and 1 appendice

Examiners: Dosent Kari Myöhänen

Keywords: Carbon capture, CCUS, Cement

Cement production inevitably produces carbon dioxide emissions from the calcination reaction, which cannot be reduced to the levels required by international climate agreements without carbon capture technology. This bachelor's thesis reviews carbon capture and storage technologies in the cement industry. The objective of the thesis is to use literature from the field to identify the present carbon capture technologies, present projects related to these technologies and to rate the technological readiness of each technology.

There are three main ways to capture carbon from the cement which differ from each other mainly based on location in the process and the number of changes to the plant itself required by the process. There are many independent technologies under these main ways. This thesis presents the projects which use and develop these technologies to conduct a technology readiness rating for each technology. The technology readiness rating found chemical absorption to be the most mature technology for carbon capture in the cement industry.

LYHENNELUETTELO

APBS	Amiinipitoinen puskurisuola (Amine-Promoted Buffer Salts)
BAT	Paras saatavilla oleva tekniikka (Best Available Technology)
CCUS	Hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (Carbon Capture, Utilization and Storage)
EU	Euroopan unioni
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
TRL	Teknologian valmiustaso (Technology Readiness Level)
MEA	2-aminoetanoli (Monoethanolamine)
MOF	Metalliorgaaninen runko (Metal-organic Framework)
NASA	Yhdysvaltain kansallinen ilmailu- ja avaruushallintovirasto (National Aeronautics and Space Administration)
VTT	Teknologian tutkimuskeskus

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 6
1.1 Sementin valmistus ... 7
1.2 Teknologian valmiustaso ... 8
2 Hiilidioksidin talteenotto ... 10
2.1 Prosessin jälkeen tapahtuva talteenotto ... 10
2.1.1 Kemikaalinen absorptio ... 11
2.1.2 Fyysinen adsorptio ... 12
2.1.3 Kryogeeninen talteenotto ... 12
2.1.4 Kalvoerotus ... 12
2.2 Happipoltto ... 12
2.3 Integroidut prosessit ... 13
2.3.1 Suora erotus ... 13
2.3.2 Calcium looping ... 14
3 Nykytilanne ja projektit ... 15
3.1 Kemikaalisen absorption tilanne ... 15
3.2 Fyysisen adsorption tilanne ... 18
3.3 Kryogeenisen talteenoton tilanne ... 19
3.4 Kalvoerotuksen tilanne ... 20
3.5 Happipolton tilanne ... 20
3.6 Integroitujen prosessien tilanne ... 21
4 Valmiustason arviointi ... 24
5 Yhteenveto ... 27
Lähteet ... 28

Liitteet

Liite 1. Teknologian valmiustasot

1 Johdanto

Toimiva yhteiskunta tarvitsee rakennuksia ja infrastruktuuria tarjotakseen jäsenilleen hyvän elämän edellytykset. Rakennukset ja infrastruktuuri tarvitsevat betonia, joka on maailman tuotetuin raaka-aine tilavuudeltaan. Betonin ominaisuudet kestävyyden ja hinnan suhteen ovat välttämättömiä nyky-yhteiskunnan rakennusvaatimusten täyttämiseksi. Betoni tarvitsee sementtiä pysyäkseen kasassa. Sementtiteollisuuden on kohdattava kaksinainen ongelma: jatkuva urbanisaatio ja infrastruktuurin kehityksen tarve lisäävät sementin kysyntää jatkuvasti. Toisaalta toimialan tulee vähentää hiilidioksidipäästöjään (CO2) huomattavasti, jos maailma haluaa saavuttaa ilmastotavoitteet ja rajoittaa globaalin lämpenemisen kahteen celsiusasteeseen (IEA, 2018). Vuonna 2023 sementtiteollisuus ei ole pysynyt kansainvälisen energiajärjestön (IEA) asettamisessa tavoitteissa, joten uusia tekniikoita tulee adoptoida nopeasti päästöjen vähentämiseksi. IEA:n mukaan valtiot voivat tukea päästöjen vähentämistä investoimalla kehitykseen ja demonstrointeihin, sekä asettamalla pakollisia hiilidioksidin vähentämislakeja.

Ilmastonmuutosta aiheuttavat kasvihuonekaasut tulevat pääosin erilaisista teollisuuden prosesseista tai liikenteestä. Yksi näistä päästölähteistä on sementin valmistus. Sementin valmistus kattaa noin 5–8 % maailman vuosittaisista hiilidioksidipäästöistä (IEA, 2020). Suurin osa sementin valmistuksen päästöistä tulevat suoraan valmistusprosessista, minkä takia niiden välttäminen on hankalaa. Keinoja hiilidioksidipäästöjen hillitsemiseen kuitenkin on. Hiilidioksidin syntymistä voidaan joko välttää käyttämällä vaihtoehtoisia materiaaleja tai sen pääsy ilmakehään voidaan estää erilaisilla talteenottomenetelmillä (Kajaste ja Hurme, 2016; Markewitz et al., 2019). Hiilidioksidin talteenotto on suurin tekijä IEA:n kestävän kehityksen skenaarioissa, joiden mukaan 60 % sementtiteollisuuden päästönvähennyksistä tulisi hiilidioksidin talteenotosta ja hyödyntämisestä (IEA, 2020). Hiilidioksidin talteenotto on siis kriittisessä asemassa sementin hiilineutraaliuden kannalta.

Hiilidioksidin talteenoton ollessa tärkeä osa sementtiteollisuuden päästöjen vähentämistä, aiheesta löytyy runsaasti kansainväliselle yhteisölle tuotettua englanninkielistä kirjallisuutta. Tässä työssä olemassa olevan kirjallisuuden perusteella esitellään hiilidioksidin talteenottomenetelmät, sekä arvioidaan niiden kypsyysasteita ja hintavaatimuksia. Työssä esitellään

myös projekteja, joiden avulla tehdään katsaus hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen nykytilanteeseen ja tulevaisuuden näkymiin.

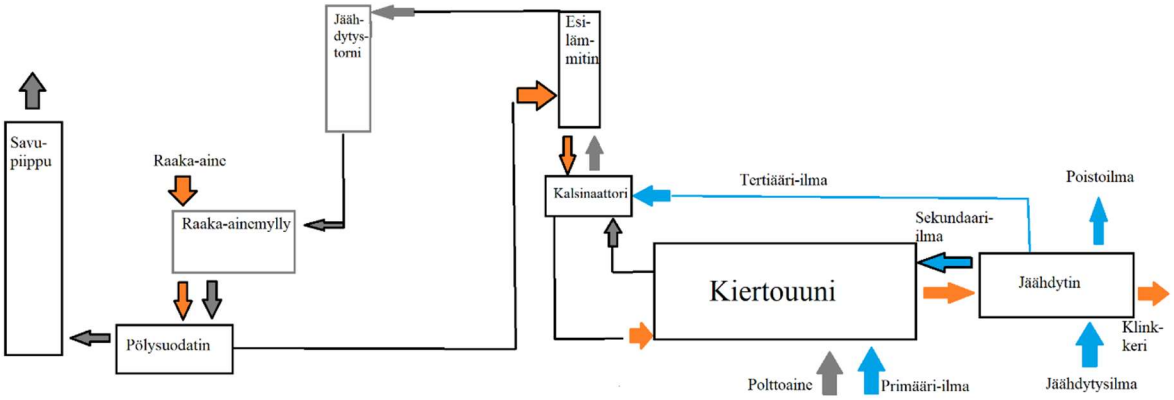
1.1 Sementin valmistus

Sementtiä valmistetaan sekoittamalla klinkkeriä ja kipsiä. Suurin osa sementin valmistuksen päästöistä tulevat klinkkerin valmistamisesta. Klinkkeri valmistetaan yhdistämällä savea ja kalsiumoksidia. Kalsiumoksidia saadaan kalkkikivestä lämmittämällä, jolloin se hajoaa kalsinointireaktiossa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi (IEA, 2020). Prosessi vapauttaa noin 0,5–0,6 tonnia hiilidioksidia yhtä tuotettua sementtitonnia kohden (Hanifa et al., 2023).

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \tag{1}$$

Prosessin vaatima lämpö tuotetaan usein kivihiilellä, jonka polttaminen vapauttaa lisää kasvihuonekaasuja. Lämmönlähteen vaihtaminen olisi haastavaa, jolloin näidenkin päästöjen vähentäminen hiilidioksidin talteenotolla kemiallisen prosessin yhteydessä on houkutteleva vaihtoehto (IEA, 2020). Mainitsemisen arvoista on, että Suomessa teknologian tutkimuskeskus (VTT) on kehittänyt koekäyttöä varten sähkökuumenteisen rumpu-uunin, jota voidaan käyttää fossiilista polttoainetta polttavan kalsinoijan sijasta (Kokko, 2022).

Sementtilaitoksen toiminnan kannalta tärkeimmät osat ovat raaka-ainemylly, esilämmitin, kalsinaattori ja kiertouuni. Ensin raaka-aine jauhetaan sopivan pieneksi materiaaliksi, jonka jälkeen se viedään esilämmittimeen pölysuodattimen kautta. Esilämmittimestä materiaali saapuu kalsinaattoriin, jossa tapahtuu suurin osa prosessin kalsinaatiosta. Jopa $\frac{2}{3}$ prosessin polttoaineesta käytetään tässä vaiheessa kalkkikiven hajoamisreaktion vaatiman lämmön tuottamiseksi. Loput polttoaineesta poltetaan kiertouunissa kalsinaatioreaktion loppuunsaattamiseksi ja klinkkerin muodostamiseksi. Kuvasta 1 näkyy tämänhetkistä parasta saatavilla olevaa teknologiaa (BAT) esittävä sementtilaitos. (Anantharaman, Fu, Roussanaly, Voldsund, 2016).



Kuva 1 BAT-sementtilaitos (Anantharaman, Fu, Roussanaly, Voldsund, 2016)

Kuvassa 1 oranssi nuoli kuvaa raaka-aineen kulkua sementtilaitoksen läpi klinkkeriksi. Harmaa nuoli kuvaa polttoaineen ja palamiskaasujen kulkua uunista savupiippuun. Kiertouunin ja kalsinaattoriin polttaman polttoaineen savukaasujen energia otetaan hyötykäyttöön ohjaamalla kaasuvirta vastakkain prosessiin tulevan raaka-aineen kanssa, jolloin vähennetään polttoaineen tarvetta, sekä vähennetään savupiipusta hukkaan menevän lämpöenergian määrää.

1.2 Teknologian valmiustaso

Teknologian valmiustaso (TRL) on tapa kuvata jonkin tietyn teknologian kehityksen tilaa. Alun perin kehitetty 1970-luvulla Yhdysvaltain kansallisen ilmailu- ja avaruushallintoviraston Nasan toimesta avaruuslentoja varten. Tasojen tarkoitus on helpottaa teknologioiden vertailua keskenään standardisoiduilla ja selkeästi määritetyillä kriteereillä. Tänä päivänä asteikkoa käytetään laajasti erilaisissa tutkimusprojekteissa arvioimaan teknologian kehityksen tärkeyttä ja etäisyyttä massatuotannosta. (IEA, 2020)

Alkuperäinen valmiusasteikko toimii välillä 1–9 (Tzinis, 2021). Taso yksi tarkoittaa teknologian konseptuaalista olemassaoloa, jolloin teknologiaan liittyviä perusilmiöitä tutkitaan ja raportoidaan. Tason yhdeksän saavuttamiseen on tiukat kriteerit. Tällä tasolla Nasan asteikon mukaan teknologia on testattu onnistuneella avaruuslennolla. Kansainvälinen energiayhdistys IEA on lisännyt kaksi tasoa 10 ja 11 kuvaamaan massatuotannon vaatimusta energia-alalla. Tässä työssä käytetään valmiustasojen arviointiin IEA:n Nasan asteikon pohjalta kehittämää paremmin kohteena olevien teknologioiden arviointiin sopivaa asteikkoa.

Asteikon kriteerit ovat esitetty IEA:n vastaavan taulukon pohjalta tehdyssä liitteessä 1. (IEA, 2020).

2 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidin talteenottoon ja hyödyntämiseen (CCUS) on olemassa monia lupaavia metodeja ympäri maailmaa. Sementtiteollisuuden kannalta olennaiset CCUS-teknologiat voidaan jaotella seuraaviin tyyppeihin:

- Prosessin jälkeen tapahtuva talteenotto
- Happipolttomenetelmät
- Prosessiin integroidut menetelmät

(Markewitz et al., 2019).

Tässä kappaleessa käydään läpi jokaisen tyypin alle asettuvien sementtilaitokseen sopivien teknologioiden toimintaperiaate.

2.1 Prosessin jälkeen tapahtuva talteenotto

Prosessin jälkeen tapahtuville talteenottomenetelmille ominaista on, että ne pyrkivät erottamaan hiilidioksidin prosessista syntyneestä savukaasuvirrasta (Wang, Song, 2020). Näitä tapoja voidaan myös kutsua polton jälkeiseksi menetelmiksi. Ne eivät myöskään vaadi muutoksia sementtilaitoksen perustoiminnoille, sillä ne rakennetaan sementtiprosessin jatkeeksi. Teknologian asentaminen on siis mahdollista myös olemassa oleviin laitoksiin tilan salliessa (IEA, 2018; Wang, M., Lawal, Stephenson, Sidders, Ramshaw, 2011; Markewitz et al., 2019). Sementtiteollisuuden kannalta tärkeimmät prosessin jälkeiset CCS-menetelmät ovat:

- Kemikaalinen absorptio
- Fyysinen adsorptio

(IEA, 2022).

Lisäksi aikaisessa prototyyppivaiheessa, mutta potentiaalisesti merkittäviä CCS-tekniikoita ovat:

- Kryogeeninen talteenotto

- Kalvoerotus

(IEA, 2022).

Prosessin jälkeisten menetelmien huono puoli on se, että hiilidioksidin erotus savukaasuista vie paljon energiaa. Tämä syö prosessin tehokkuutta, ja näin määrää suurilta osin talteenottoprosessin hinnan (Wang, M., Lawal, Stephenson, Sidders, Ramshaw, 2011). Prosessin jälkeisistä menetelmistä vanhin ja kehittynein menetelmä on kemikaalinen absorptio (Hanifa et al., 2023).

2.1.1 Kemikaalinen absorptio

Kemikaalinen absorptio tarkoittaa reaktiota, joka tapahtuu nestemäisen kemikaalivirran törmätessä prosessista syntyvää savukaasuvirtaa päin. Kemikaali kaappaa eli absorboi hiilidioksidin itseensä savukaasuista, jolloin prosessissa eteenpäin jatkava savukaasu ei sisällä yhtä paljon, tai ollenkaan, hiilidioksidia. Absorptioreaktio tapahtuu pylväissä, joissa ylöspäin kulkeva savukaasuvirta tulee kontaktiin alaspäin valuvan nestemäisen kemikaalin kanssa. (Walters, 2016).

Tämän jälkeen hiilidioksidi voidaan jatkokäsitellä käytetyn kemikaalin mukaan (Wang, M., Lawal, Stephenson, Sidders, Ramshaw, 2011). Kaappaamiseen voidaan käyttää useita eri kemikaaleja, joista vanhin on monoetanoliamiini (MEA), jota on käytetty vuodesta 1930 alkaen (Hanifa et al., 2023). Uudempi versio amiinipesusta on Carbonclean-yrityksen CDRMAax-liuotin, joka perustuu amiinipitoiseen puskurisuolaan (APBS) (Carbon clean, 2023).

Kemikaalista absorptiota on hyödynnetty jo kahdessa valmistuneessa pilottihankkeessa: Yhdysvalloissa Skymine-hankkeessa (Walters, 2016), sekä Kiinassa Anhui Conch-yrityksen Baimashinin maakunnan sementtilaitoksessa (IEA, 2022) Lisäksi useat työn alla olevat hankkeet hyödyntävät joko amiinipesua tai CDRMax-liuotinta, kuten Brevik CCS tai ECCO2-projekti.

2.1.2 Fyysinen adsorptio

Fyysisessä adsorptiossa prosessin kaasuvirta ohjataan kaappaavan materiaalin läpi, esimerkiksi huokoisten amiinien tai piioksidimateriaalien. Kaappauksen toimintaperiaate on siis hyvin samanlainen kuin kemikaalisessa absorptiossa, mutta fyysinen absorptio ei vaadi kemikaalivirtaa. Menetelmän etuna on se, että hiilidioksidin kaappaus ja uudelleenvapautus vie merkittävästi vähemmän aikaa kuin muissa teknologioissa. Menetelmää käyttää kaksi merkittävää projektia: CO2MENT ja Accelerating basic solid adsorbent looping technology (ABSALT). (IEA, 2022).

2.1.3 Kryogeeninen talteenotto

Kryogeeninen talteenotto perustuu kaasuvirran jäähdyttämiseen ja hiilidioksidin erottamiseen alhaisissa lämpötiloissa. Alhainen lämpötila helpottaa hiilidioksidin erottamista, jonka jälkeen kaasu nesteytetään ja siirretään haluttuun sijoituspaikkaan (IEA, 2022; Euroopan komissio, 2022). Kryogeeninen talteenotto on uniikki tapa toteuttaa CCS-sementtilaitokselle, ja sillä on tällä hetkellä vain yksi merkittävä projekti: GO4ECOPLANET (IEA, 2022).

2.1.4 Kalvoerotus

Kalvoerotuksessa käytetään hyödyksi polymeerikalvoja, joiden avulla hiilidioksidi voidaan erottaa muusta kaasuvirrasta. Teknologian kehitys on aikaisessa vaiheessa, mutta IEA ennakoi tekniikan hinnaksi noin 25 €/tCO2, joka olisi huomattavasti alhaisempi kuin amiinipesussa. Tekniikka on vasta todistettu laboratoriotasolla, mutta se saattaa osoittautua hyödylliseksi vuoteen 2030 mennessä. (IEA, 2022).

2.2 Happipoltto

Happipoltossa valmistusprosessiin syötetään palamisilman sijasta puhdasta happea. Tämä johtaa puhtaampaan hiilidioksidivirtaan savukaasuissa, mutta seurauksena uunin lämpötila nousee huomattavasti. Uunia tulee jäähdyttää ohjaamalla osa savukaasuvirrasta takaisin uuniin, jolloin vältetään uunin osien vahingoittuminen. Lopullinen hiilidioksidin erottaminen

savukaasuista tapahtuu kryogeenisen prosessin kautta, jonka ohella poistetaan polttoaineen mukana tulleita epäpuhtauksia. Happipolttotekniikkaa hyödyntää usea merkittävä projekti. Näistä merkittävimmät ovat Dania, Catch4Climate ja Westkuste 100-hankkeen Carbon2Business (IEA, 2022). (Hanifa et al., 2023).

2.3 Integroidut prosessit

Integroitu prosessi tarkoittaa CCS-menetelmää, jossa talteenottoratkaisu on rakennettu suoraan yhteyteen sementin valmistusprosessin kanssa. Tämä tarkoittaa verrannollisesti vaikeampaa ja kalliimpaa asennusta olemassa oleviin laitoksiin, mutta laitteiston asennuksen jälkeen integroidut prosessit ovat huomattavasti halvempia per talteen otettu hiilidioksidi (Hanifa et al., 2023). Tällä hetkellä on kaksi varteenotettavaa toteutustapaa integroidulle prosessille: suora erotus ja kalsiumkierto. Prototyyppitasolla oleva suomalaisen VTT:n sähkökuumenteinen rumpu-uuni voi myös olla merkittävä tapa vähentää sementtilaitoksen hiilidioksidipäästöt lähelle nollaa (Kokko, 2022).

2.3.1 Suora erotus

Suora erotus tarkoittaa sementin valmistustapaa, jossa polttoaine ja kalsinoitava kalkkikivi pidetään erillään. Normaalissa sementtilaitoksessa polttoaine poltetaan pyörivässä uunissa tai esikalsinaattorissa, joten palamisesta syntyvät savukaasut sekoittuvat kalsinointireaktion hiilidioksidin kanssa. Suorassa erotuksessa kalsinoinnin vaatima lämpö siirretään prosessiin epäsuorasti, jolloin reaktiosta vapautuva kaasuvirta on puhdasta hiilidioksidia. Suora erotus on pääosin LEILAC-hankkeen ajama teknologia. (LEILAC, 2023).

VTT Oy:n rumpu-uunin CCS toimintaperiaate on hyvin samanlainen suoran erotuksen kanssa. Sähkökuumenteinen uuni mahdollistaa kalsinointiprosessin tarvitseman lämmön tuomisen prosessiin ilman fossiilisten polttoaineiden poltosta syntyvää sekalaista kaasuvirtaa (Kokko, 2022). Jos kalsinointiprosessin vaatima lämmön tuottaminen ei tuota savukaasuja, voidaan kalsinoinnista syntyvää virtaa pitää puhtaana hiilidioksidina.

2.3.2 Calcium looping

Calsium looping-tekniikassa käytetään osa kalsinoinnissa syntyvästä kalsiumoksidista uudelleen prosessissa syntyvän hiilidioksidin talteenottoon. Prosessissa on kaksi vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa uunista tuleva hiilidioksidi kaapataan savukaasuista kalsiumoksidin avulla. Noin 650 celsiusasteessa tapahtuva reaktio muodostaa hiilidioksidista ja kalsiumoksidista uudestaan kalsiumkarbonaattia eli kalkkikiveä:

$$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3 \tag{2}$$

Toisessa vaiheessa kalkkikivi ohjataan takaisin kalsinaattoriin, jossa siitä lämmitettäessä noin 900°C lämpötilaan muodostuu kalkkia ja hiilidioksidia yhtälön 1 mukaisesti. Tämä kalkki ohjataan eteenpäin vastaanottamaan uunilta tulevaa hiilidioksidia, josta muodostuu kalkkikiveä ja puhdas hiilidioksidivirta. Reaktiolle ylimääräinen kalkki jatkaa normaalin sementtilaitoksen mukaisesti esikalsinaattoriin ja kiertouuniin, missä loput kalsinointireaktioista tapahtuvat. Prosessin päätteeksi savukaasut jakautuvat kalsinoijassa vapautettavaan hiilidioksidiin, sekä hiilidioksidiköyhään savukaasuun, joka ei sitoudu yhtälössä 2. Integroitua Calcium looping-tekniikkaa edistää yksi merkittävä projekti: Euroopassa toimiva Cleanker-projekti arvioidulla hinnalla 36 €/t klinkkeriä. (IEA, 2022; Cleanker, 2023).

3 Nykytilanne ja projektit

Tässä kappaleessa esitellään tärkeimmät sementtituotannon hiilidioksidipäästöjen talteenottoprojektit. Huolimatta monesta suuresta työn alla olevasta projektista päästöjen vähentämiseksi, sementtiteollisuus on tällä hetkellä huomattavasti jäljessä IEA:n nollapäästöskenaariosta (NZE). Skenaarion tavoitteena on esittää sosiaalisesti ja ekologisesti kestävä polku nollapäästöihin vuoteen 2050 mennessä. Tällä hetkellä julkaistujen projektien oletetaan kaappaavan yhteensä noin 10 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa vuoteen 2030 mennessä, mikä on vain noin 6 % NZE-vaatimuksesta. (IEA, 2023).

3.1 Kemikaalisen absorption tilanne

Ensimmäinen kaupallinen pilottihanke Skymine-projekti hyödyntää natriumhydroksidin reaktiota hiilidioksidin kanssa muodostaakseen eteenpäin myytäviä kemikaaleja (Walters, 2016). Ensimmäinen hiilidioksidin talteenottoprojekti oikeassa mittakaavassa amiinipesutekniikalla ja kaupallisessa ympäristössä on rakenteilla Norjassa Brevikin sementtilaitoksessa Norcem-yrityksen toimesta (IEA, 2023). Sekä SkyMine, että Brevik CCS pyrkivät kaappaamaan vain osan prosessissa syntyvästä hiilidioksidista (Walters, 2016; Halvorsrud, 2023). Tästä poiketen Norcemin emoyhtiö Heidelberg materials pyrkii valmistamaan vuoteen 2030 mennessä sementtiteollisuuden historian suurimman CCS-hankkeen Ruotsissa, mikä on suunniteltu kaappaamaan kaikki prosessissa syntyvät hiilidioksidipäästöt (Beumelburg, 2022). Taulukossa 1 esitetään kemikaalisen absorption kannalta merkittävät projektit.

Taulukko 1 Kemikaalisen absorption projektitiedot

Projekti	**Aikataulu**	**Teknologia**	**Kaapatun hiilidioksidin määrä**	**Hiilidioksidin jatkokäsittely**
SkyMine	2010–2016	NaOH	75 ktCO2/vuosi	Kemikaalien tuotanto ja jälleenmyynti.

Anhui Conch Baimashan Cement Factory	Valmistunut 2018	Amiini	50 ktCO2/vuosi	Jälleenmyynti teollisuudelle
Brevik CCS	Valmistuminen vuonna 2024	Amiini	400 ktCO2/vuosi	Varastointi Pohjanmerelle
Slite CCS	2021–2030	Amiini	1,8 MtCO2/vuosi	Varastointi Pohjanmerelle
Lehigh Cement	Valmistuminen 2025	Amiini	0,6 MtCO2/vuosi	Tehostettu öljyn talteenotto tai varastointi maan sisälle
ECCO2-LH	Valmistuminen 2022 potentiaalisella jatkokehityksellä	APBS-CDRMax	Potentiaalisesti 700 ktCO2/vuosi	Maatalous
Dalmia Cement	Ennen vuotta 2040	APBS-CDRMax	500 ktCO2/vuosi	Suora myynti teollisuuteen ja kemikaalien valmistus
CEMEX FEED	Valmistuminen 2026	APBS-CDRMax	100 tCO2/päivä	Synteettisten polttoaineiden tuotanto

Yhdysvaltalainen yritys Skyonic Corporation toteutti vuosien 2010–2016 välillä kaupallisen SkyMine pilottihankkeen, jonka tarkoitus oli kaapata hiilidioksidia kaupallisesti toimivan sementtilaitoksen savukaasuvirrasta. Laitoksen CO2-kaappaus perustuu kemikaaliseen absorptioon natriumhydroksidin avulla. Hiilidioksidin ja natriumhydroksidin reaktiossa syntyy natriumkarbonaattia, josta voidaan jatkoreaktiolla jalostaa natriumbikarbonaattia eli ruokasoodaa. Ruokasoodan käytössä varastoitu hiilidioksidi vapautuu taas, joten projektin hiilidioksidin varastointi on väliaikaista. Hankkeessa todistettiin SkyMine prosessikemian toiminta kaupallisessa mittakaavassa rakentamalla ensimmäinen tekniikalla varustettu pilottilaitos. Laitos on suunniteltu kaappaamaan suoraan prosessista noin 75 ktCO2/vuosi, joka vastaa noin 15 % laitoksen hiilidioksidipäästöistä. Kaapattua hiilidioksidia käytetään

valmistamaan erilaisia kemikaaleja, kuten suolahappoa, ruokasoodaa, valkaisuaineena toimivaa hypokloriittia, sekä natriumhydroksidia kaupallista toimintaa varten. (Walters, 2016).

Toinen jo käynnissä oleva CCS-laitos on käytössä Anhui Conch-yrityksen Baimashinin laitoksessa. Projektin tarkoituksena oli todistaa amiiniperäisen CCS-tekniikan toiminta sementtilaitoksessa, missä projekti onnistui projektin valmistuessa vuonna 2018. Kaapatun hiilidioksidin määrä on kuitenkin vaatimaton, noin 50 ktCO2/vuosi, joka on noin 3 % koko laitoksen päästöistä. (Plaza, Martínez, Rubiera, 2020) .

Heidelberg Materials-konserni on yksi suurimmista sementin tuottajista Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa (IEA, 2023) Konsernilla on useita projekteja liittyen sementin hiilidioksidipäästöihin, joista esimerkkinä ovat Brevik CCS Norjassa ja Slite CCS Ruotsissa.

Brevik on Norjassa sijaitseva kaupunki, jossa Norcem-yrityksen omistama projektiyritys Brevik CCS väittää valmistavansa maailman ensimmäistä täysimittaista projektia hiilidioksidin talteenotolle sementin tuotannosta (IEA, 2023; Halvorsrud, 2023). Norcem ja siten Brevik CCS ovat osa Heidelberg Materials- konsernia. Laitos hyödyntää poltonjälkeistä talteenottoa amiiniliuottimen avulla. Projektin tarkoituksena on kaapata savukaasuvirrasta vuodessa noin 400 kilotonnia hiilidioksidia, joka on noin 50 % laitoksen vuotuisista päästöistä. Laitoksen on tarkoitus aloittaa tuotanto vuonna 2024 (IEA, 2023), vaikka se onkin huhtikuussa 2023 noin neljä kuukautta jäljessä aikataulusta. Kaapattu hiilidioksidi on tarkoitus varastoida Pohjanmeren pohjan alle. (Halvorsrud, 2023).

Slite CCS on HeidelbergCementin ja ruotsalaisen alihankkijan Cementan yhteinen projekti sementtilaitoksen hiilidioksidipäästöjen täyteen kaappaukseen. Vuonna 2022 julkaistun esiselvityksen perusteella hiilidioksidin kaappausmenetelmäksi tulee prosessin jälkeinen amiiniliuottimeen perustuva CCS-järjestelmä, joka on tarkoitus asentaa Sliten sementtilaitokseen Ruotsissa Gotlannin saarella. Projektin tarkoituksena on ottaa talteen kaikki sementtilaitoksen vuotuiset hiilidioksidipäästöt vuodesta 2030 alkaen. Tämä tarkoittaisi noin 1,8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa, joka vastaa noin kolmea prosenttia Ruotsin kokonaispäästöistä. Kaapattu hiilidioksidi on tarkoitus varastoida Pohjanmeren pohjan alle yhteistyössä useiden työn alla olevien varastointiprojektien kanssa. (Beumelburg, 2022).

Lehigh Cement on HeidelbergCementin alla Kanadassa toimiva sementin valmistaja, jonka projekti Edmontonin sementtilaitoksen CCUS toiminnan toteutettavuudesta toimii amiiniliuotintekniikalla. Toteutettavuustutkimuksessa huomattiin kemikaalisen absorption olevan

ainoa varteenotettava vaihtoehto kaupalliselle laitokselle tällä hetkellä. (Emissions Reduction Alberta, 2021).

ECCO2-LH on Espanjassa sijaitseva projekti, joka tulee kaappaamaan sementtiprosessin hiilidioksidipäästöt paikallista uusiokäyttöä varten. Hiilidioksidin käytöllä voidaan nopeuttaa maatilan kasvisten fotosynteesiä, joka voi vähentää vesi- ja maatarvetta maatiloilla. Projektin kaappauskapasiteetti on alustavasti 10 % laitoksen vuotuisista päästöistä vuonna 2022, mutta kapasiteettia voidaan potentiaalisesti kasvattaa kattamaan jopa 100 % laitoksen päästöistä. (Carbon clean, 2020).

Dalmia Cement aikoo rakentaa suuren mittakaavan CCS-prosessin osaksi Intian Tamil Nadussa sijaitsevaa sementtilaitosta. CCS-prosessi hyödyntää Carbon clean-yrityksen CDRMax-liuotinta, ja sen on tarkoitus kaapata noin 500 ktCO2/vuosi. Projektille ei ole asetettu julkista aikataulua, mutta Dalmia Cement pyrkii olemaan hiilinegatiivinen vuoteen 2040 mennessä. (Dalmia Cement, 2021).

CEMEX tutkii useita eri CCS mahdollisuuksia Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Yksi niistä on kemikaalista absorptiota CDRMax-liuottimella hyödyntävä projekti Saksassa, jonka tarkoitus on käyttää kaapattua hiilidioksidia synteettisten polttoaineiden valmistukseen yhdistämällä hiilidioksidiin elektrolyysistä saatua vetyä. Reaktiossa syntyviä synteettisiä hiilivetyjä voidaan käyttää polttoaineena monissa prosesseissa. (CEMEX, 2021).

3.2 Fyysisen adsorption tilanne

Tärkeimmät fyysistä adsorptiota tutkivat projektit ovat esitelty taulukossa 2. Tekniikan kehitys on alkuvaiheessaan, ja projektit keskittyvät todistamaan konseptiensa toimivuutta. Kumpikin taulukossa 2 esitelty projekti on ainutlaatuinen tutkimus materiaalinsa mahdolliseen käyttöönottoon CCS:n alalla.

Taulukko 2 Fyysisen adsorption projektitiedot (Lafarge, 2023; IEA, 2022)

Projekti	**Aikataulu**	**Teknologia**	**Kaapatun hiilidioksidin määrä**	**Hiilidioksidin jatkokäsittely**

CO2MENT	2019-	MOF	1 tCO2/päivä	Uudelleen-käyttö
ABSALT	2021–2024	PEI	-	Kemikaalien valmistus

CO2ment on kahden yrityksen, Lafarge ja Svanten, yhteinen projekti. Projekti on ensimmäinen esitys metalliorgaanisen rungon (MOF) omaavan nanomateriaalin käytöstä CCS-laitoksessa. Nanomateriaali kykenee kaappaamaan suuren määrän hiilidioksidia kokoonsa nähden, eikä hiilidioksidin regenerointi vaadi huomattavaa määrää lämpöä. Vuonna 2021 projekti onnistui todistamaan kykynsä kaapata ja suodattaa hiilidioksidia. Vuonna 2023 projekti on toiminut yli 2400 tunnin ajan suodattaen 90 % savukaasuvirran hiilidioksidista. Seuraavaksi projektin on määrä tutkia kaapatun hiilidioksidin uudelleenkäyttöä esimerkiksi vähähiilisissä polttoaineissa ja sementissä. (Lafarge, 2023).

ABSALT on monen organisaation, kuten Cemexin ja usean eurooppalaisen yliopiston yhteistyönä toteuttama tutkimusprojekti, jonka tarkoituksena on selvittää, voidaanko piidioksidin ja polyethyleniminen yhdistelmän avulla saavuttaa alhainen hinta hiilidioksidin kaappaukselle. Laboratoriokokeiden tasolla olevalla projektilla ei ole määritettyä hiilidioksidin kaappauksen määrän päämäärää. Kaapatun hiilidioksidin jatkokäsittelymenetelmäksi tutkitaan uudelleenkäyttöä kemikaalien raaka-aineena. (ABSALT, 2022).

3.3 Kryogeenisen talteenoton tilanne

Kryogeenisen talteenoton ainoa merkittävä projekti Go4ECOPLANET on Puolassa vuosille 2022–2027 ajoitettu pilottihanke, jonka tarkoituksena on kaapata Lafargen Kujawyn sementtilaitoksen hiilidioksidipäästöt täysin. Projektin tarkemmat tiedot ovat esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3 Kryogeenisen talteenoton projektitiedot

Projekti	**Aikataulu**	**Teknologia**	**Kaapatun hiilidioksidin määrä**	**Hiilidioksidin jatkokäsittely**
Go4Ecoplanet	2022–2027	Hiilidioksidin nesteytys	10 MtCO2/10 vuotta	Varastointi

Hiilidioksidin nesteytyksen on tarkoitus sekä erottaa hiili muusta kaasuvirrasta, että helpottaa kaapatun hiilidioksidin kuljetusta ja varastointia. Varastointi on tarkoitus toteuttaa kuljettamalla nestemäinen hiilidioksidi junalla ja laivalla Pohjanmerelle, ja pumppaamalla Pohjanmeren tyhjiin kaasu- ja öljyvarantoihin loppusijoitusta varten. Kokonaisuudessaan projektin oletetaan vähentävän laitoksen päästöjä noin 10 MtCO2 kymmenen vuoden aikana. (Euroopan komissio, 2022).

3.4 Kalvoerotuksen tilanne

Kalvoerotus on tekniikkana uusi, ja vasta laboratoriokokeiden tasolla. IEA:n raportin mukaan teknologian kehityksen myötä hiilidioksidin kaappaushinta menetelmällä voidaan saada noin 25 €/tCO2 vuosiin 2030–2050 mennessä. (IEA, 2022).

3.5 Happipolton tilanne

Happipolttoteknologiaa kehitetään usean eri organisaation toimesta lupaavana vaihtoehtona prosessin jälkeiselle talteenotolle. Kehittävät organisaatiot koostuvat tutkimuskeskuksista, yliopistoista sekä yksityisistä yrityksistä. Tällä hetkellä teknologia on todistettu pilottimittakaavassa, mutta kehitys jatkuu kaupallisiin esityksiin vuosikymmenen loppuun mennessä. Taulukossa 4 esitellyt teknologiat vaativat huomattavasti enemmän muutoksia voimalan rakenteeseen suurempien lämpötilojen vuoksi kuin prosessin jälkeiset tekniikat, mutta kalsinoijasta syntyvä puhdas hiilidioksidivirta on halvempaa käsitellä. Ongelmana on myös puhtaan hapen erotus polttoainetta varten. Erotusprosessi on energia-intensiivinen, mikä lisää teknologian hintaa. (IEA, 2022).

Taulukko 4 Happipolton projektitiedot

Projekti	**Aikataulu**	**Teknologia**	**Kaapatun hiilidioksidin määrä**	**Hiilidioksidin jatkokäsittely**
Dania Pilot	Valmistunut	Happipoltto	-	-
CEMCAP	2015–2018	Happipoltto	90 %	-

Carbon2Business	2023–2029	Elektrolyysistä saatava happi	1 MtCO2/vuosi	Synteettisen polttoaineen tuotanto
Catch4Climate	2019-	Puhdas happipoltto	-	Synteettisen polttoaineen tuotanto

CEMCAP-projekti todisti suuren prototyypin mittakaavassa usean erilaisen CCS-menetelmän, joista yksi oli happipoltto. Projektin tarkoituksena oli selvittää suurimman potentiaalin omaavat CCS-menetelmät, jotka voidaan jälkiasentaa sementtilaitoksiin, sekä helpottaa päätöstentekoa hiilidioksidin talteenoton käyttöönottoon sementtiteollisuudessa. (Jordal, 2018).

Carbon2Business on osa kymmenen yrityksen muodostamaa saksalaista tutkimusprojektia Westkuste100, jonka tarkoituksena on kehittää kestäviä ratkaisuja liiketoiminnalle. Carbon2business hyödyntää Westkuste100-projektin laboratorioissa kehitettyä teknologiaa oikeassa mittakaavassa Holcim-yrityksen sementtilaitoksessa Saksassa. Projekti kehittää ja perustuu happipolttotekniikkaan, jossa palamisilma korvataan puhtaalla hapella. Prosessista näin vapautuva puhdas hiilidioksidi aiotaan muuntaa raaka-aineeksi muun muassa kemikaaliteollisuuteen. Laitoksen prosessista aiotaan kaapata 1 MtCO2 joka vuosi valmistuessaan vuoteen 2029 mennessä. (Holcim, 2022).

Catch4Climate on neljän sementtivalmistajan yhteinen suunnitteluvaiheessa oleva happipolttoprojekti, jonka tarkoituksena on rakentaa puoliteollinen demonstraatiolaitos Saksaan Mergelstettenin sementtilaitokseen. Toteutuessaan projekti olisi osana luomassa pohjaa happipolttotekniikan laajamittaista käyttöönottoa sementtilaitoksissa. Projektin toteutus riippuu kuitenkin Saksan julkisen tutkimusrahoituksen saannista. (Beumelburg, 2020).

3.6 Integroitujen prosessien tilanne

Integroidut prosessit ovat hyvin erilaisia keskenään, jolloin niiden nykytilanteen arviointi yhtenä ryhmänä on haastavaa. Sementtiteollisuudessa kaikki taulukossa 5 esitellyt teknologiat ovat todistettuja prototyyppitasolla, ja teknologioiden kehitys jatkuu nopeasti kohti demonstraatiolaitoksia. (IEA, 2022).

Taulukko 5 Integroitujen prosessien projektitiedot

Projekti	**Aikataulu**	**Teknologia**	**Kaapatun hiilidioksidin määrä**	**Hiilidioksidin jatkokäsittely**
LEILAC-2	2020-	Epäsuora lämmitys	100 ktCO2/vuosi	-
CEMCAP	2015–2018	Calcium looping	98 %	-
Cleanker	2017–2023	Calcium looping	>90 %	Varastointi ja tutkimus
Decarbonate	2019–2022	Sähkölämmitys	-	

LEILAC on monista projekteista koostuva hanke, jonka tarkoituksena on kehittää halpa ja tehokas CCS-menetelmä suoralla erotuksella. Hankkeen perustana on kalsinoijan epäsuora lämmitys. Leilac-1 on vuonna 2019 käyttöön astunut pilottilaitos Belgiassa. Laitos on todistanut teknologian toimivuuden, sekä valmistetun sementin laadun. Leilac-2 on vuonna 2020 alkanut projekti Saksan Hannoverissa. Projektin tarkoituksena on todistaa Leilac-1 hankkeessa todistetun teknologian toiminta suuremmassa mittakaavassa. Hankkeessa analysoidaan myös potentiaalisia kohteita kaapatulle hiilidioksidille, mutta tällä hetkellä projektin kaappaamaa hiilidioksidia ei ole tarkoitus säilyttää tai käyttää. Menetelmän tavoitteena on saavuttaa 100 kilotonnin vuosikapasiteetti hiilidioksidin talteenotolle. Hanke on toteutettu yhteistyössä suurien sementin valmistajien Heidelberg Materials:in ja CEMEX:in kanssa, sekä useiden muiden organisaatioiden kanssa. Hanke on myös saanut 16 miljoonaa euroa rahoitusta Euroopan unionilta. (LEILAC, 2023).

CEMCAP on vuosina 2015–2018 toiminut eurooppalainen tutkimusprojekti, joka tutkii hiilidioksidin talteenottoa sementin valmistuksessa. Projektin tarkoituksena on luoda pohja CCS-teknologioiden käyttöönotolle Euroopassa. Tutkimuksen kohteina olivat useat prosessin jälkeiset talteenottomenetelmät, happipoltto, sekä calcium looping. CEMCAP-projekti todisti pilottilaitoksella puoliteollisessa mittakaavassa calcium looping-tekniikan toiminnan ja mahdollisuuden jatkokehitykseen teollisessa mittakaavassa. (Jordal et al., 2019).

Clean Clinker -projekti (Cleanker) on CEMCAP-projektin pohjalta rakennettu calcium looping-tekniikkaa hyödyntävä tutkimusprojekti, jonka tavoitteina on demonstroida calcium looping-tekniikka TRL 7-tasolla, eli odotetuissa käyttöolosuhteissa. Projekti on valmistunut 31.3.2023, mutta sen tuloksia ei ole vielä julkistettu (CORDIS, 2023). Projekti toteutettiin Italiassa kansainvälisenä yhteistyönä Vernascan sementtilaitoksella. Laitoksella halutaan todistaa sekä menetelmän hiilidioksidin kaappaustehokkuuden olevan yli 90 %, että tuotetun klinkkerin laatu ei huonone teknologian kanssa. Projekti ei pyri kaappaamaan huomattavia määriä demonstraatiolaitoksen päästöistä, mutta testauksessa kaapattua hiilidioksidia käytetään myös varastointijärjestelmän testaamiseen laitoksen lähellä. (Cleanker, 2023).

Decarbonate on suomalainen projekti, jonka tavoite on kehittää CCU-konsepteja teollisuuden päästöjen vähennystä varten. Kehittämisen tavoitteena on mahdollistaa teollisuuden päättäjien informoidun päätöksenteon uuteen teknologiaan investoinnista tai käyttöönotosta. Sementtiteollisuuden kannalta projektin tärkein projekti on VTT:n kehittämä prototyyppi sähkökuumenteisesta rumpu-uunista. Uuni on ensimmäinen kaltaisensa prototyyppi, ja VTT pyrkii demonstroimaan sen toimintaa tarjoamalla sitä yrityksille. (Kokko, 2022).

4 Valmiustason arviointi

Tässä kappaleessa arvioidaan eri CCUS-teknologioiden valmiustaso TRL edellisessä kappaleissa esiteltyjen projektien perusteella. IEA on tehnyt vastaavan TRL-arvioinnin vuonna 2022, mikä toimii suuntaa antavana pohjana taulukkoon 6 kootuille arvioille. Kappaleessa arvioidaan myös, miten vuodessa mahdollisesti tapahtuneet projektien valmistumiset ovat voineet vaikuttaa IEA:n arvion ajankohtaisuuteen. TRL arvioinnissa huomioidaan vain jo valmistuneet osuudet projekteista, sillä julkaistu aikomus ei riitä TRL-tason nostamiseen. Mahdolliset tulevaisuudessa valmistuvat projektit pyritään kuitenkin mainitsemaan osana TRL-arviointia, mutta ne eivät vaikuta taulukossa 6 olevaan arviointiin.

Kemikaalinen absorptio on vanha ja testattu tekniikka, sekä erittäin suosittu uusien sementtiteollisuuden projektien teknologiana. Teknologia vaatii lisää toimivia esityksiä sementtilaitoksessa noustakseen TRL-9 tasolle, mutta jo valmistuneiden pienikokoisten kaupallisten demonstraatioiden ansiosta teknologian valmiustaso on vahvasti tasolla 8. Tulevaisuudessa mahdollisesti valmistuvat suuremman mittakaavan CCS-laitokset, kuten Brevik ja Slite CCS voivat mahdollistaa teknologian siirtymisen TRL-9 tasolle.

Fyysisen adsorption TRL:n määrittää käytännössä Co2ment-projekti, sillä ABSALT on vielä kehitysvaiheessa. Tämä saattaa kuitenkin muuttua vuonna 2024, jolloin ABSALT-projektin on määrä valmistua. ABSALT:in valmistuminen ei kuitenkaan muuttaisi fyysisen adsorption valmiustasoa huomattavasti, sillä projektin tavoitteena on vasta todistaa teknologia pilottilaitoksessa. Co2ment on kuitenkin onnistunut todistamaan teknologian toiminnan oikeassa mittakaavassa, mutta ilman kaupallista toimintaa teknologia jää tasolle TRL-6.

Kryogeenisen talteenoton toimintaperiaate on vasta todistettu laboratoriotasolla, joten sen valmiustaso on TRL-4. Vuonna 2022 alkaneen projektin GO4Ecoplanet valmistuessa ensimmäisenä demonstraatiolaitoksena projektilla on mahdollisuus hypätä tasolle TRL-7 tai 8, riippuen laitoksen kaupallisesta kannattavuudesta.

Kalvoerotus on IEA:n mukaan todistettu laboratoriotasolla, mutta vielä julkaistuja projekteja teknologian kehittämisestä suuren prototyypin tasolle ei ole olemassa.

Happipolttotekniikan toimintaperiaate on todistettu oikeassa mittakaavassa Tanskan Danian sementtilaitoksella ja CEMCAP-projektin toimesta. Nämä valmistuneet projektit tarkoittavat happipolton olevan tasolla TRL-6, eli oikean mittakaavan prototyyppitasolla. Julkaistut ja potentiaalisesti vuosikymmenen loppuun mennessä valmistuvat projektit catch4climate ja carbon2business nostavat TRL-tasoa valmistuessaan. Catch4climaten puoliteollinen esitys nostaisi teknologian TRL-7 tasolle, ja carbon2business vastaisi TRL-8 tasoa kaapatun hiilidioksidin määrän ja kaupallisuuden vuoksi.

Suoran erotuksen projektit LEILAC ja decarbonate ovat hieman eri TRL-tasoilla. Decarbonate-projektin sähkökuumenteinen rumpu-uuni on tehdaskäytössä toimiva prototyyppi, joka kuvastaa TRL tasoa 5. LEILAC-projekti toisaalta on esitellyt oikean mittakaavan prototyypin LEILAC-1 laitoksella, ja LEILAC-2 valmistuessaan toimisi TRL-7 vaatimana esikaupallisena esityksenä ilman aikomusta myydä tai muuten hyödyntää kaapattua hiilidioksidia.

Calcium looping-teknologia on demonstroitu esikaupallisesti juuri valmistuneessa Cleanker-projektissa, joka perustuu CEMCAP-projektin pilottihankkeen selvitykseen teknologian toimivuudesta. Taiwan cement-yritys on myös julkistanut aikomuksensa kaupallisesta Calcium looping-laitoksesta vuoteen 2025 mennessä (IEA, 2022). Laitoksen valmistuessa calcium looping-teknologia nousee tasolle TRL-8.

Taulukko 6 Valmiustasoarviointitulokset

Teknologia	**TRL**
Kemikaalinen absorptio	8
Fyysinen absorptio	6
Kryogeeninen kaappaus	4
Kalvoerotus	4
Happipolttoaine	6

Suora erotus	6
Calcium looping	7

IEA:n arvio sementtiteollisuuden TRL-tasoista pitää taulukon 6 perusteella vielä paikkansa vuonna 2023, mutta muutoksia saattaa tulla nopeasti vuosikymmenen edetessä ja projektien valmistuessa.

5 Yhteenveto

Sementti on elintärkeä osa nykyaikaisen yhteiskunnan toimintaa, ja sitä valmistetaan suuria määriä joka vuosi. Sementin valmistamisessa vapautuu kuitenkin huomattava määrä hiilidioksidia osana valmistuksen kemiallista reaktiota. Näin ollen sementtiteollisuus on vastuussa merkittävästä osasta maailman vuosittaisista hiilidioksidipäästöistä. Päästöjen tullessa kalsinointireaktiosta itsestään sementtiteollisuuden tulee kehittää CCUS-teknologioita vähentääkseen alan päästöt nollaan ilmastonmuutoksen pysäyttämistä varten.

Sementtiteollisuuteen sopivat CCUS-teknologiat jaetaan yleisesti kolmeen riippuen sijainnista ja laitoksen toiminnan muutoksen suuruudesta. Prosessin jälkeiset teknologiat muuttavat laitoksen toimintaa vähiten, mutta haasteena on hiilidioksidivirran erottaminen muista savukaasuista, mikä on usein hidasta ja kallista. Happipolttoteknologiat vaativat puhdasta happea polttoaineekseen, mikä nostaa prosessin hintaa. Integroidut prosessit nimensä mukaisesti sijoittuvat ja muuttavat prosessia itseään, jolloin jälkiasennuskulut vanhoihin laitoksiin voivat olla mittavat. Hiilidioksidin kaappaukseen liittyvät kulut voivat olla hyvinkin alhaisia näillä menetelmillä.

Sementtiteollisuuden kypsin CCUS-teknologia on kemikaalinen absorptio erilaisilla amiineilla. Kemikaalinen absorptio on vanha teknologia muilla teollisuuden aloilla, mutta sitä on sovellettu onnistuneesti myös sementtilaitoksiin. Teknologian ongelmana on korkea energiaintensiivisyys kemiallisen reaktion vaatiman energian vuoksi, mitä ei voi laskea korkean teoreettisen alarajan alle. Tämän vuoksi alalle kehitetään useita korvaavia teknologioita, jotka voivat potentiaalisesti laskea kaapatun hiilidioksiditonnin hintaa huomattavasti alle kemikaalisen absorption alarajan. Sementtiteollisuudessa on useita julkaistuja CCS-projekteja valtioiden ja yritysten pyrkiessä hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Nämä julkaistut projektit eivät kuitenkaan riitä tähän tavoitteeseen, sillä projektien yhteenlaskettu kaappauspotentiaali on vain murto-osa koko teollisuuden alan hiilidioksidipäästöistä.

Lähteet

ABSALT (2022) Accelerating Basic Solid Adsorbent Looping Technology. [Verkkoaineisto] [Viitattu 31.5.2023] Saatavilla: https://absaltresearch.com/.

Anantharaman, Rahul, Fu, Chao, Roussanaly, Simon, & Voldsund, Mari. (2018). Design and performance of CEMCAP cement plant with MEA post combustion capture. D4.2. Zenodo. doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.1150320.

Beumelburg C (2022) Key Contribution to HeidelbergCement's Ambitious New Sustainability Targets: CCS Project in Sweden Takes Next Step. [Verkkoaineisto] [Viitattu 24.4.2023] Saatavilla: https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-30-05-2022.

Beumelburg C (2020) Pilot Project of Four Cement Manufacturers Plans to use Captured CO2 as a Raw Material for the Production of Synthetic Fuels. [Verkkoaineisto] [Viitattu 3.6.2023] Saatavilla: https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-18-11-2020.

Carbon clean (2023) Carbon Solvents. [Verkkoaineisto] [Viitattu 14.5.2023] Saatavilla: https://www.carbonclean.com/carbon-solvents.

Carbon clean (2020) LafargeHolcim and Carbon Clean to Develop Large Scale CCUS Plant. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.5.2023] Saatavilla: https://www.carbonclean.com/news/lafargeholcim-and-carbon-clean-to-develop-large-scale-ccus-plant.

CEMEX (2021) CEMEX and Carbon Clean Work on Carbon Capture Project in Germany . [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.5.2023] Saatavilla: https://www.cemex.co.uk/-/cemex-and-carbon-clean-work-on-carbon-capture-project-in-germany.

Cleanker (2023) Project Contents. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.5.2023] Saatavilla: http://www.cleanker.eu/the-project/project-contents.html.

CORDIS (2023) CLEAN clinKER Production by Calcium Looping Process. [Verkkoaineisto] [Viitattu 3.6.2023] Saatavilla: https://cordis.europa.eu/project/id/764816.

Dalmia Cement (2021) From Grey to Green. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.5.2023] Saatavilla: https://www.dalmiacement.com/sustainability/.

Emissions Reduction Alberta (2021) Lehigh Cement Edmonton CCUS Feasibility Project. [Verkkoaineisto] [Viitattu 5.6.2023] Saatavilla: https://www.eralberta.ca/projects/details/lehigh-cement-edmonton-ccus-feasibility-study-project/

Euroopan komissio (2022) Go4ECOPLANET. [Verkkoaineisto] [Viitattu 14.5.2023] Saatavilla: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-12/if_pf_2022_go4_en_0.pdf.

Halvorsrud T (2023) Brevik CCS. [Verkkoaineisto] [Viitattu 24.4.2023] Saatavilla: https://www.brevikccs.com/en/about-us-5.

Hanifa M, Agarwal R, Sharma U, Thapliyal PC, Singh LP (2023) A review on CO2 capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies. Journal of CO2 Utilization, 67, 102292. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102292

Holcim (2022) Decarbonizing Operations in Germany. [Verkkoaineisto] [Viitattu 3.6.2023] Saatavilla: https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/greening-operations-germany.

IEA (2023) Energy Technology Perspectives. IEA, Paris Saatavilla: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023, License: CC BY 4.0

IEA (2022) ETP Clean Energy Technology Guide. [Verkkoaineisto] [Viitattu 14.5.2023] Saatavilla: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide.

IEA (2020) Energy Technology Perspectives. IEA, Paris Saatavilla: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020, License: CC BY 4.0

IEA (2018) Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA, Paris, Saatavilla: https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry, License: CC BY 4.0

Jordal K (2018) About. [Verkkoaineisto] [Viitattu 4.6.2023] Saatavilla: https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/about/.

Jordal, Kristin, Abanades, Carlos, Berstad, David, Cinti, Giovanni, Gardarsdottir, Stefania, Hoenig, Volker, Hornberger, Matthias, Monteiro, Juliana Garcia, Ruppert, Johannes, Størset, Sigmund, Sutter, Daniel, van der Meer, Rob, & Voldsund, Mari. (2019). D2.11

CEMCAP Strategic conclusions – progressing CO2 capture from cement towards demonstration. Zenodo. doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.2593135

Kajaste R, Hurme M (2016) Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. Journal of Cleaner Production, 112, 4041-4052, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.055

Kokko P (2022) Sähkökuumenteinen Rumpu-Uuni. [Verkkoaineisto] [Viitattu 25.4.2023] Saatavilla: https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/sahkokuumenteinen-rumpu-uuni.

Lafarge (2023) Project CO2ment. [Verkkoaineisto] [Viitattu 31.5.2023] Saatavilla: https://www.lafarge.ca/en/project-co2ment.

LEILAC (2023) How it Works. [Verkkoaineisto] [Viitattu 25.4.2023] Saatavilla: https://www.leilac.com/technology/#how-it-works.

Markewitz P, Zhao L, Ryssel M, Moumin G, Wang Y, Sattler C, Robinius M, Stolten D (2019) Carbon Capture for CO2 Emission Reduction in the Cement Industry in Germany. Energies, 12(12), 2432, doi: 10.3390/en12122432

Plaza MG, Martínez S, Rubiera F (2020) CO2 Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. Energies, 13(21), 5692, doi: 10.3390/en13215692

Tzinis I (2021) Technology Readiness Level. [Verkkoaineisto] [Viitattu 25.4.2023] Saatavilla: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level.

Walters J (2016) SkyMine Beneficial CO2 Use Project. Saatavilla: https://www.osti.gov/biblio/1241314, doi: 10.2172/1241314

Wang X, Song C (2020) Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A perspective. Frontiers in Energy Research, 8, 560849, doi: 10.3389/fenrg.2020.560849

Wang M, Lawal A, Stephenson P, Sidders J, Ramshaw C (2011) Post-combustion CO2 capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. Chemical Engineering Research and Design, 89(9), 1609-1624, doi: 10.1016/j.cherd.2010.11.005

Liite 1 Teknologian valmiustaso

Taso	**Kypsyys**	**Kriteeri**
1	Idea	Toimintaperiaate määritetty
2	Sovellus muotoiltu	Konsepti ja toimintaperiaatteen sovellus on muotoiltu
3	Konseptin vahvistaminen	Sovellus tarvitsee prototyypin ja sovelluskohteen
4	Aikainen prototyyppi	Prototyyppi testattu testiolosuhteissa
5	Suurempi prototyyppi	Komponentit testattu käyttöolosuhteissa
6	Todellisen mittakaavan prototyyppi	Prototyyppi testattu käyttöolosuhteissa ja oikeassa mittakaavassa
7	Esikaupallinen esitys	Ratkaisu toimii odotetuissa käyttöolosuhteissa
8	Ensimmäinen kaupallinen esitys	Täysimittainen käyttöönotto
9	Kaupallinen toiminta sopivassa ympäristössä	Ratkaisu on kaupallisesti saatavilla, mutta tarvitsee kehitystä kilpailuedun säilyttämistä varten
10	Laajamittaisen integroinnin tarve	Ratkaisu on kaupallinen ja kilpailukykyinen, mutta tarvitsee lisää integraatiota markkinoihin
11	Vakaus todistettu	Kasvu ennustettavissa