

Energiatehnoloogia instituut

**CO₂ PÜÜDMISE, KASUTAMISE JA LADUSTAMISE
VÕIMALUSED**

**THE POSSIBILITIES OF CO₂ CAPTURE, UTILIZATION
AND STORAGE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Andree Kool

Üliõpilaskood: 193965EACB

Juhendaja: Alar Konist, energiatehnoloogia
instituudi direktor

Tallinn 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“30” mai 2023. a

Autor: Andree Kool

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“30” mai 2023. a

Juhendaja: Alar Konist

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“22” mai 2023. a

Kaitsmiskomisjoni esimees Oliver Järvik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andree Kool (sünnikuupäev: 20.09.2000)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„CO₂ püüdmise, kasutamise ja ladustamise võimalused“, mille juhendaja on Alar Konist,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andree Kool, 193965EACB

Õppekava, peeriala: EACB, energiatehnoloogia peeriala

Juhendaja(d): Energiatehnoloogia instituudi direktor, Alar Konist, 6203901

Lõputöö teema:

(eesti keeles) CO₂ püüdmise, kasutamise ja ladustamise võimalused

(inglise keeles) The possibilities of CO₂ capture, utilization and storage

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida CCS ja CCU tehnoloogiaid, ning nende võimalusi
2. Tuvastada CCS ja CCU rolli kliimamuutuse vastu võideldes
3. Tuua ülevaade CCS ja CCU tehnoloogiate tulevikupotentsiaalidest

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö ülesande ja eesmärkide seadmine	12.2022
2.	Töö täitmiseks materjalide läbi töötamine ning esmasesse kontrolli esitamine	05.2023
3.	Töö sisulise osa lõpetamine ning töö vormistamine	05.2023

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "30" mai 2023a

Üliõpilane: Andree Kool "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Alar Konist "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: Oliver Järvik "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

EESSÕNA	6
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. MIS ON CCS JA CCU	9
1.1 CO ₂ püüdmine ja ladustamine	11
1.1.1 CO ₂ transport	13
1.2 CO ₂ püüdmine ja kasutamine	15
1.3 Süsiniku püüdmine, kasutamine ja ladustamine	18
1.3.1 CO ₂ -EOR	21
1.4 CCU ja CCS mõju keskkonnale elutsükli analüüsi abil	23
1.4.1 Esimese uuringu elutsükli analüüs	23
1.4.2 Teise uuringu elutsükli analüüs	24
1.4.3 Kolmanda uuringu elutsükli analüüs	25
1.4.4 Neljanda uuringu elutsükli analüüs	26
2. MAAILMAS KASUTATAVAD CCU ja CCS LAHENDUSED	27
2.1 Tomakomai projekt	27
2.2 Drax BECCS	29
2.3 Northern Lights	31
2.4 DAC	32
3. CCU JA CCS POTENTSIAALSED RAKENDUSED TULEVIKUS	36
3.1 CCS väljundid tulevikus	36
3.2 CCU väljundid tulevikus	39
3.3 CCU ja CCS potentsiaalsed mahud	41
3.3.1 Ida-Aasia potentsiaalne CCU ja CCS maht	43
3.3.2 Euroopa potentsiaalne CCU ja CCS maht	45
3.3.3 Lähis-Ida ja Põhja-Aafrika potentsiaalne CCU ja CCS maht	45
4. JÄRELDUSED	47
KOKKUVÕTE	50
SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	52

EESSÕNA

Lõputöö teema valiku põhjal aitas sõnastusega TalTechi energiatehnoloogia instituudi direktori ja käesoleva töö juhendaja Alar Konist. Töö koostamiseks kasutati peamiselt Microsoft Wordi programmi ja suure osa lõputöös kasutatud materjalidest aitas leida ja varustas lõputöö juhendaja.

Käesolev töö annab ülevaate süsinikdioksiidi püüdmise, kasutamise ja ladustamise tehnoloogiatest, kus kirjeldatakse millised on antud tehnoloogiad, tuuakse näited mõningatest käesolevatest projektidest ja käsitletakse nende tehnoloogiate potentsiaalsetest väljunditest tulevikus ja nende rakendamisega kaasnevaid takistusi ja võimalusi nende takistuste lahendamiseks.

Antud teema valiti selle aktuaalsuse tõttu kliimamuutuste vastu võitlemisel. Lisaks sellele pakkusid antud tehnoloogiad lõputöö autorile huvi ning valides käesolev teema tekkis võimalus töö autoril saada põhjalikumad teadmised nendest tehnoloogiatest ning nende rakendusest.

Lõputöö autor soovib esmalt tänada lõputöö juhendajat Alar Konistit, kelle suunava abita poleks lõputöö koostamine olnud võimalik. Lisaks sellele soovib lõputöö autor tänada oma perekonda, kes olid suureks toeks käesoleva lõputöö koostamise ajal. Viimasena soovib lõputöö autor tänada oma ülemusi ja töökollektiivi mõistva suhtumise ja toetamise eest.

Süsinik, süsinikdioksiid, CCU, CCS, bakalaureusetöö

LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

CO₂ – Süsinikdioksiid (Carbon dioxide)

CC – Süsiniku püüdmine (Carbon Capture)

CCU – Süsiniku püüdmine ja kasutamine (Carbon Capture and Utilization)

CCS – Süsiniku püüdmine ja ladustamine (Carbon Capture and Storage)

CCUS – Süsiniku püüdmine, kasutamine ja ladustamine (Carbon Capture, Utilization and Storage)

EOR – nafta täiendav tootmine (Enhanced oil recovery)

BECCS – bioenergia süsiniku püüdmise ja ladustamisega (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)

LCA – elutsükli analüüs (Lifecycle Analysis)

GWP – Globaalse soojenemise potentsiaal (Global warming potential)

bbl- barrel

Gt - gigatonni

Mtpa – miljonit tonni aastas (Million tonnes per annum)

MWh – megavatt-tund (Megawatt hour)

SISSEJUHATUS

Käesoleva töö eesmärk on analüüsida süsinikdioksiidi püüdmise (CC), kasutamise (CCU) ja ladustamise (CCS) ning süsinikdioksiidi püüdmise, kasutamise ja ladustamise (CCUS) tehnoloogiaid ja nende võimalusi. Lisaks sellele soovitakse käsitleda antud tehnoloogiate potentsiaalsed rakendamist tulevikus ja tuua välja probleemid, mis võivad esineda antud tehnoloogiate rakendamisel. Töö kirjutamiseks kasutatud metoodika on kirjandusel põhinev, milleks on kasutatud erinevaid uurimistöid ja artikleid, mis käsitlevad CCU, CCS ja CCUS-iga seonduvaid projekte, tehnoloogiaid ja rakendusi.

Valiti see teema, kuna töö kirjutamise ajal on antud teema ühiskonna seisukohalt aktuaalne. Ajal mis otsitakse potentsiaalseid lahendusi globaalse soojenemise peatamiseks ja selle vastu võitlemiseks on CCU, CCS ja CCUS tehnoloogiad võimalikud lahendused selleks.

Töö esimeses peatükis kirjeldatakse CCU, CCS ja CCUS põhilisi tehnoloogiaid, lisaks sellele kirjeldatakse nende tehnoloogiate mõju keskkonnale. Käsitletakse ka transpordi ja ladustamise võimalusi, ning tuuakse näiteid kasutamise kohta.

Teises peatükis käsitletakse põhjalikult erinevaid projekte, kus on antud tehnoloogiad kasutusel. Projektid mida käsitletakse asuvad Jaapanis, Ameerika Ühendriikides, Ühendkuningriigis ja Norras, ning soovitakse täpsemalt käsitleda nende projektide arengut läbi aja ja tuua välja mis on nende projektide edu saavutamisel olnud võtmeasjaks.

Käesoleva töö kolmandas peatükis käsitletakse CCU, CCS ja CCUS-i tulevikku, ning antakse ülevaade mis võimalused on nende tehnoloogiate rakenduseks lähitulevikus. Lisaks sellele tuuakse välja võimalikud probleemid, mis võivad takistada antud tehnoloogiate rakendamist laiapõhjaliselt.

Antud töö neljandas peatükis tehakse järeldused töö käigus saadud teadmiste kohta. Täpsemalt käsitletakse põhjuseid, miks on CCU, CCS ja CCUS kasutuselevõtt oluline, tuuakse välja antud tehnoloogiate laiapõhjalise kasutuselevõtu suurimad takistused ja proovitakse välja tuua lahendusi, mille abil oleks võimalik ületada need takistused. Lisaks sellele käsitletakse eelmainitud tehnoloogiate võimalikku rakendamist Eestis ja mujal maailmas, ning viise kuidas seda hõlbustada.

1. MIS ON CCS JA CCU

CCU, ehk süsiniku püüdmine ja kasutamine on tehnoloogia, mis spetsialiseerub süsinikheitmete püüdmisele ja kasutamisele eri valdkondades. Antud tehnoloogia abil on võimalik muuta CO₂ jäätmed kasulikeks kemikaalideks ja kütusteks. Lisaks sellele on selline rakendus abiks globaalse soojenemise vastu võitlemisel. [1]

CCS, ehk süsiniku püüdmine ja ladustamine on tehnoloogia, mille eesmärk on sarnaselt CCU-le püüda süsinikheitmeid, kuid erinevalt eelmainitud tehnoloogiast ladustatakse need jäätmed. [1]

CCUS, ehk süsiniku püüdmine, kasutamine ja ladustamine on tehnoloogia, mis hõlmab süsinikdioksiidi püüdmist suurtest punktallikatest, sealhulgas (sh.) elektritootmisest või tööstusrajatistest, mis kasutavad kütusena kas fossiilkütuseid või biomassi. Kui püütud süsinikdioksiidi ei kasutata kohapeal transporditakse see torustiku, laeva, raudtee või veoautoga, et seda saaks kasutada mitmesugustes rakendustes või ladustatakse. [2]

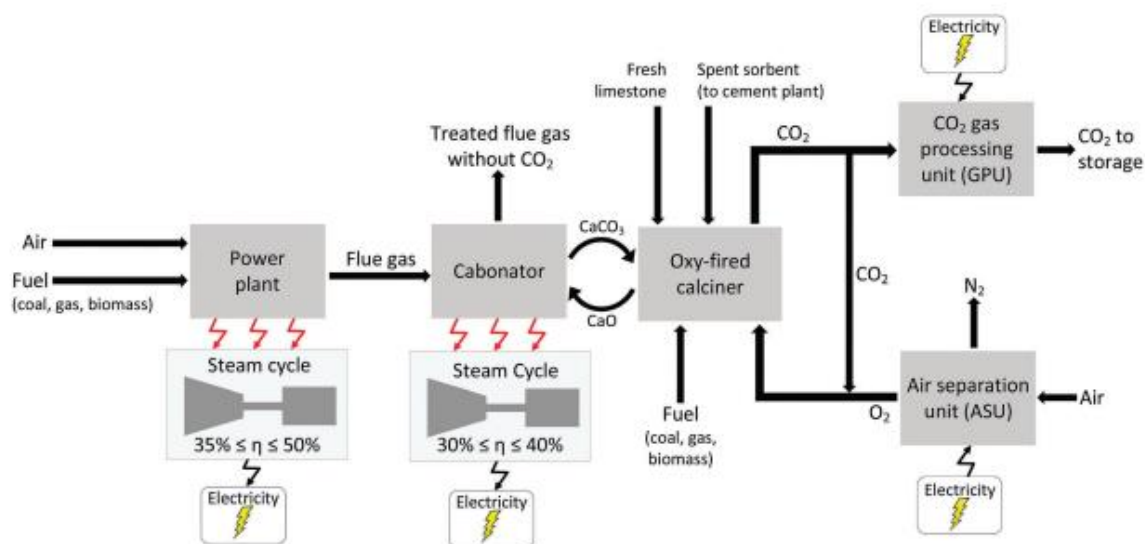
CC-ks ehk süsiniku püüdmiseks kasutatakse järgnevaid protsesse: keemiline absorptsioon, füüsikaline eraldamine, hapnik-kütus eraldamine, membraanlahutus, kaltsiumringlus, hapnikukandja ringlus, otselahutus ja superkriitiline CO₂ energiatsükkel. [2]

Keemiline absorptsioon on laialdaselt kasutatav separatsiooniprotsess, mis antud juhul põhineb CO₂ ja kemikaalil, mida tuntakse solvendi nime all. Antud protsessi on kasutatud aastakümneid energia tootmise, kütuse transformeerimise ja industriaalsetes tootmise valdkondades. [2]

Füüsikalise eraldamise puhul kasutatakse ära erisusi komponentide füüsikalistes omadustes. Täpsemalt võidakse kasutada antud protsessis ära erinevaid füüsikalisi protsesse nagu erikaalu, kuju, magnetilised, elektrilised või optilised omadused. [3] Hetkel on kasutusel põhiliselt maagaasi töötlemisel ja etanooli, metanooli ning vesiniku tootmisel. [2]

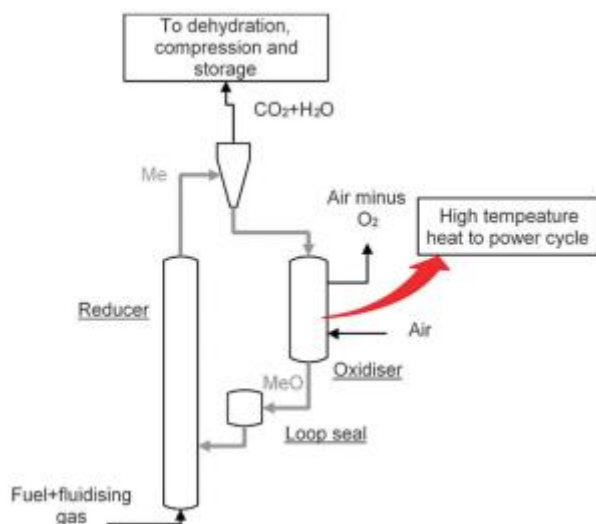
Hapnikus põletamine hõlmab kütuse põletamist hapniku abil, millele järgneb sellest eralduva CO₂ püüdmine. Kuna suitsugaas koosneb peaaegu eranditult CO₂-st ja veeaurust saab viimast hõlpsasti eemaldada dehüdreerimise teel, et saada kõrge puhtusastmega CO₂ vool. Hetkeseisuga on see prototüübi/esitluse eelses etapis. Mitmed projektid on lõpetatud söepõhise elektritootmise ja tsemenditootmise valdkonnas. [2]

Kaltsiumiringluse, mis on tuntud ka taastusüsinikringluse nime all, eemaldab süsinikdioksiidi tsemenditehaste ja teiste elektri- ja tööstusrajatiste suitsugaasidest, kasutades selleks kaltsiumoksiidi sorbenti. Antud protsess põhineb kahel pöörduval keemilisel reaktsioonil, milleks on karboniseerimine ja kaltsineerimine. Karboniseerimise käigus reageerib sorbent suitsugaasis oleva CO₂-ga, moodustades kaltsiumkarbonaadi (CaCO₃). Seejärel juhitakse kaltsiumkarbonaat kaltsineerimisseadmesse, kus seda kuumutatakse umbes 850°C-950°C-ni, mille tulemusena laguneb see peaaegu puhtaks CO₂ gaasivooluks ja tahkeks kaltsiumoksiidiks (CaO). Süsihappegaas eemaldatakse ja puhastatakse täiendavalt, enne kui see saadetakse kas geoloogiliseks ladustamiseks või edasiseks kasutamiseks. Tahke CaO võib saata tagasi taaskasutamiseks protsessi, et püüda rohkem CO₂-te. Käesolevat protsessi on illustreeritud joonisel 1.1 [4]



Joonis 1.1 Kaltsiumiringlus põlemisjärgses püüdmissprotsessis [5]

Chemical looping (vt joonis 1.2), ehk hapnikukandja ringlus on protsess, mis võimaldab söepõletusprotsessides kasutada ainult hapnikku, jättes välja muud gaasid, näiteks (nt.) õhus leiduva lämmastiku. Antud protsess võimaldab toota peaaegu puhtast CO₂ gaasi, mida saab seejärel suhteliselt hõlpsasti ladustada ilma suurema töötlemiseta. [6]



Joonis 1.2 Hapnikukandjaringluse lihtsustatud skeem [7]

Membraanlahutus on protsess, kus membraani kasutatakse lahuses olevate komponentide eraldamiseks, tõrjudes tagasi soovimatud ained ja lastes teistel membraanist läbi pääseda. Membraani roll on ka muuta lahuse koostist suhtelise läbitungimiskiiruse alusel. [8]

Otselahutus hõlmab tsemendi tootmise käigus tekkivate CO₂ heitgaaside püüdmist lubjakivi kaudse kuumutamise teel, kasutades selleks spetsiaalset kaltsineerimisseadet. Antud tehnoloogia eraldab süsihappegaasi otse lubjakivist, segamata seda teiste põlemisgaasidega, vähendades märkimisväärselt gaasi eraldamisega seotud energiakulusid. [2]

Superkriitilised CO₂ energiatsüklid kasutavad süsinikdioksiidi, mis on ülekritilises olekus st. olekut kus temperatuur ja rõhk on üle kriitilise punkti, kus vedel ja gaasiline faas ei ole eristatavad. Selle erinevus tavalistest elektrijaamadest seisneb selles, et seal toodetakse energiat turbiinidest, mis kasutavad töövedelikuna vett või aeru. [2]

1.1 CO₂ püüdmine ja ladustamine

Teadmised CO₂ ladustamise kohta on viimase 10 aasta jooksul märkimisväärselt kasvanud, mida näitab asjaolu, et CCS mahuga üle 1 Mt CO₂ aastas on üksikutes piirkondades juba tehniliselt teostatav. Seda näitavad praegu 14 tööstusprojekti, sh. kolm soolase põhjaveekihi süsteemi. Teadusuuringute tähelepanu on seetõttu liikunud edasi tehnoloogia elujõulisuse tõestamisest ning uuringud keskenduvad aspektidele mis seostuvad termofüüsika, geoteaduse, veehoidlate projekteerimise, seire ja tehnoloogilise potentsiaali hindamisele. Eelmainitud uuringud aitavad iseloomustada ja

ennustada voogude liikumist ja vähendada ebakindlust tehnoloogias. Lisaks sellele annavad antud uuringud võimaluse ennetada lekkeriske ja hinnata CCS-i globaalset rolli energiasüsteemides. [7]

CCS mängib eeldatavasti olulist rolli Rahvusvahelise kliimamuutuste paneeli kuuenda hindamisaruande (IPCC6) ja ÜRO kliimamuutuste konverentsi (COP21) poolt seatud globaalse soojenemise eesmärkide saavutamisel. Antud tehnoloogia rakendamiseks ja kasutuselevõtu võimaldamiseks töötatakse välja mitmeid tehnoloogiaid, ning tavaliselt arenevad tehnoloogiad mitmes etapis, milleks on laborimastaabi etapp, pilootprojekti etapp, demonstratsiooniskaala etapp ja viimasena kommertsastaabi etapp. Projektide arendus väljaspool laborietappi vajab täiendavate teadusuuringute rahastamist, samas projektetapid mis ületavad laborietapid ja demonstratsioonietapid vajavad märkimisväärset rahalist investeeringut ja ärihuvi. [7]

Tabel 1.1 Kaubanduslike CCS rajatiste arv ja püüdmismaht 2022. aasta septembri seisuga [9]

	Kasutusele võetud	Ehituses	Edasi-jõudnud arengufaasis	Varajases arengufaasis	Peatatud staadiumis	Kokku
Rajatiste arv	30	11	78	75	2	196
Püüdmismaht (Mtpa)	42,5	9,6	97,6	91,8	2,3	243,9

Märkimisväärse osa kasvuhoonegaasid heitkogustest võib seostada tööstusprotsessidega, mis annavad 25% ülemaailmsest CO₂ heitkogusest, mistõttu on hädavajalik vähendada tööstussektoris süsinikdioksiidi heitkoguseid. Eriti kõrgete emissioonidega on raua- ja terasetööstus, nafta rafineerimine ja tsemenditööstus, tarbides kokku 38% ehk 43 EJ kogu tööstuslikust energiatarbimiseks. CCS-i peetakse sealjuures kulutõhusaks viisiks tööstusprotsesside süsinikheitmete vähendamiseks, kuid antud tehnoloogia rakendamisel võivad esineda mõningad takistused. Nt. peab arvestama füüsikalisi omadusi, koostist ja gaasivoo mahtusid, mis on iga tööstusprotsessi puhul erinevad. Seega oleks CCS tehnoloogia sobivus ja valik sõltuvuses voolu omadustest. Teine takistus mis võib esineda on tööstussektorite rahvusvahelise konkurentsi säilitamine, kuna antud tehnoloogia rakendamisega kaasneb lisaks väiksematele heitmetele ka suuremad kulud. [7]

Võttes arvesse praeguste projektide mahtu kuni 2030. aastani, on tõenäoline, et rohkem kui 50% püütud süsinikdioksiidist ladustatakse spetsiaalsetes ladustamiskohtades. Tänapäeval kasutatakse ligi 75% püütud süsihappegaasist nafta täiendavaks tootmiseks, üle 20% hoitakse seitsmes spetsiaalses ladustamiskohas, ning ülejäänud

leiab muu rakenduse, milleks võib olla kasvuhoonetes kasutus või tööstustoodete tootmises. [10]

Spetsiaalsete CO₂ ladustamiskohtadega seoses on tehtud märkimisväärseid teadusuuringuid, arendustegevust ja innovatsiooni, sh. on ka läbiviidud katsetusi ja kaubandusliku ulatusega tutvustusi. Lisaks sellele arendatakse jätkuvalt seire-, mõõtmis- ja kontrollitehnoloogiaid. See töö võib parandada ladustamise jõudlust ja ohutust, ning sellega võib kaasneda ka kulude vähendamine ja süsihappegaasi ladustamise arendusaega. [10]

Üha enam areneb ka CO₂ mineralisatsioon, kus süsinikdioksiid süstitakse basaltidesse või peridotiitidesse, kuna antud kivimid sisaldavad palju CO₂-ga reageerivaid mineraale, mis võivad kiirendada karbonaatsete mineraalide sadestumist võrreldes tavapärase ladustamisega. Nt. Islandil demonstreerib Carbfix lahustunud CO₂ süstimist mineraliseerimise eesmärgil ja on alates 2014. aastast süstinud ligikaudu 85 000 tonni süsinikdioksiidi. Esimesena testiti süsihappegaasi ülekritilist süstimist basaltidesse Wallula Basalt pilootprojekti käigus Washingtonis, Ameerika Ühendriikides, ning mõlema eelnevaltmainitud projekti numbriline modelleerimine viitab sellele, et märkimisväärne mineraliseerumine võib leida aset kahe aasta jooksul pärast süstimist. [10]

1.1.1 CO₂ transport

Praegu arendavad suur osa projekte transporti ja ladustamist koos. Süsinikdioksiidi transpordi infrastruktuur tegeleb sellega, et viia süsinikdioksiid püüdmiskohast kasutuskohta või ladustamiskohta. CO₂ transpordiks on võimalik kasutada erinevaid transpordi liike, milleks võib olla nt. praam, torustikud, laev, rong või veoauto. Neist suurima potentsiaaliga on torustikud ja laevad, sest neil on madalaim maksumus tonni CO₂ kohta. [10]

Torustikud, mis transpordivad mitmest allikast püütud süsihappegaasi võimaldavad toetada CCUS-i laialdase kasutusvõttu. Nt. Kanadas on 240 km pikkuse Alberta süsinikdioksiidi magistraalliini võimekus tarnida 14,6 miljonit tonni aastas (Mtpa), kuid hetkel on transporditav kogus ainult 1,6 Mtpa. 2020. aastal kasutusele võetud torustik projekteeriti märkimisväärselt suurema transpordivõimekusega, et tulevikus võimaldada selle ühendamist muude rajatistega. Lisaks sellele arendatakse ülemaailmselt mitme kasutajaga torustike võrke, millest mõningad näited on USA-s asuv Midwest Carbon Express, Belgia ja Norra ühendav avamere CO₂ torustik ning Saksamaa ja Madalmaade osasid ühendav Delta koridor. [10]

Kui CO₂ kaubandusliku vedu on demonstreeritud väikeses mahus, milleks on ligikaudu 2000 tonni või vähem, siis suuremahulist süsinikdioksiidi tarnimist pole veel

demonstreeritud. Praegu on Norras asuva Northern Lights projekti raames ehitamisel kaks laeva ja rohkem on hetkel veel projekteerimisjärgus. Mõne projekti mahtu kuulub ka praamid, eesmärgiga transportida CO₂ siseveeteedel. Süsinikdioksiidi transport laevaga nõuab erinevate tingimustega arvestamist võrreldes torustikus transpordiga, nt. peab arvestama faasi, rõhu ja temperatuuriga. CO₂-e transport laevaga eeldab CO₂ terminalide olemasolu, et süsinikdioksiid peale ja maha laadida, ning tagada selle nõuetekohane konditsioneerimine edasiseks transpordiks, süstimiseks või kasutuseks. Arendusjärgus on mitu CO₂ terminali, sh. Antwerpeni sadamas Belgias, Gdanski sadamas Poolas, Dunkerque sadamas Prantsusmaal ja Saksamaal BlueHyNow projekti raames. Lisaks uuritakse laevalt platvormile ja laevalt kaevu kohaletoimetamist, ning võivad tulevikus leida kasutust eesmärgiga vähendada vajadust mahalaadimisterminalide järgi. [10]

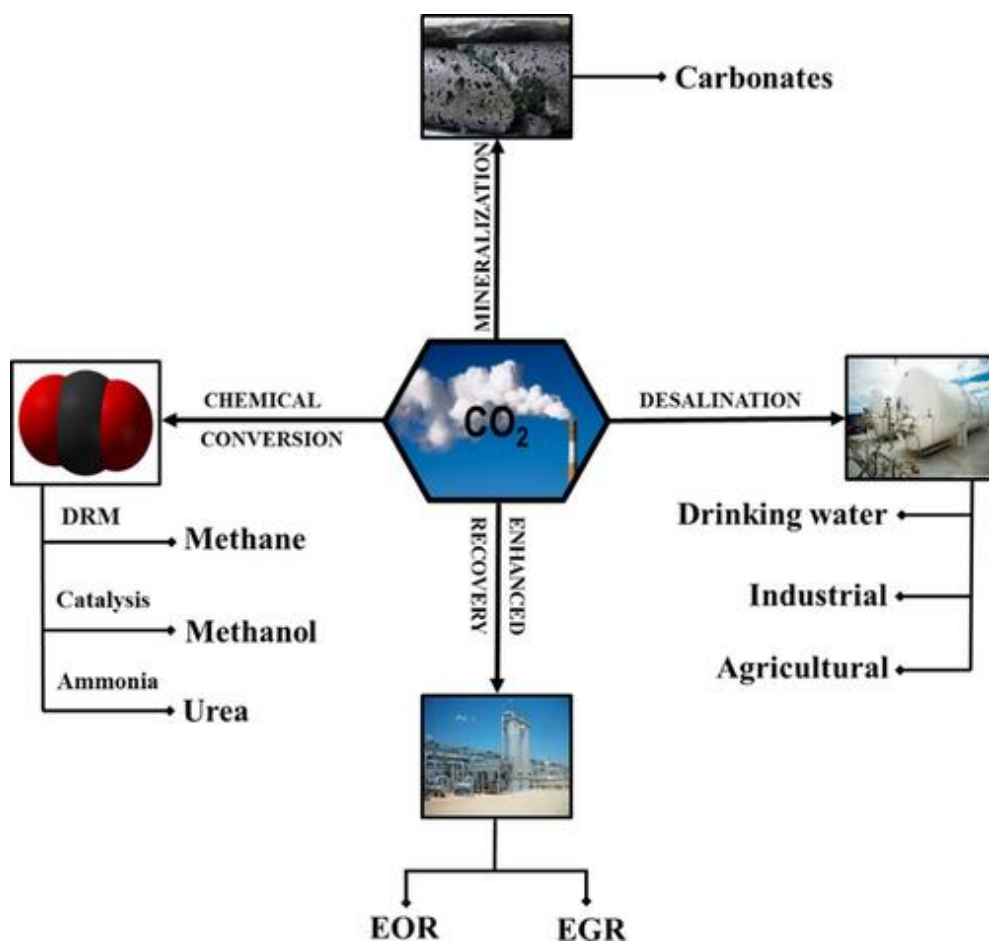
Kasutades ära nii majanduslikku kui ka mastaabisäästu, võib mitme kasutajaga süsinikdioksiidi transpordi ja ladustamise infrastruktuur toetada tervete tööstuspiirkondade süsinikdioksiidiheitmete vähendamist. Viimasel ajal on toimunud areng mitme kasutajaga transpordivõrkude ja ladustamiskeskuste arendamise suunas. Keskeltläbi on üks kolmandik arendatavast CO₂ transpordi ja ladustamise infrastruktuurist mitme kasutajaga. [10]

Mitmed praegu arenduses olevad transpordi- ja ladustamisprojektid on seotud tööstusaladega, nt. neli transpordi- ja ladustamisprojekti mis on ühendatud viie tööstusalaga Ühendkuningriigis, Porthose projekt Hollandis, eesmärgiga süsinikdioksiidi transportida Rotterdam Zuidist avamere ladustamiskohtadesse ja Houstoni CCS-i keskus Ameerika Ühendriikides. Mitme kasutajaga infrastruktuur võib toetada CC kasutuselevõttu väiksemate heitkoguste tekitajate juures ning CCUS-i ärimudelite ja transpordiliikide mitmekesistamist. [10]

Teatud olukordades saab olemasolevaid torustikke ja muid infrastruktuuri CO₂ transportimiseks ja ladustamiseks uuesti kasutada. Taaskasutus võib olla atraktiivne, kuna see võib vähendada infrastruktuuri arendamise üldkulusid ja aega ning pikendada infrastruktuuri kasutusiga enne dekomisjoneerimist ning torustike puhul potentsiaalselt vähendada ka juurdepääsunõudeid ja maaomanikele makstavat hüvitist. Mitmed arenduses olevad projektid, sh. Ühendkuningriigi Acorni projekt, kavatsesid olemasolevat infrastruktuuri taaskasutada. [10]

1.2 CO₂ püüdmine ja kasutamine

CCU viitab mitmesugustele rakendustele, mille kaudu CO₂ püütakse ja kasutatakse kas otse, keemiliselt muutmata, või kaudselt, muundatud kujul, erinevateks toodeteks, mis on välja toodud joonisel 1.3. Praegu kasutatakse igal aastal ligikaudu 230 miljonit tonni süsinikdioksiidi, millest suurem osa on kasutusel väetisetööstuses uurea tootmiseks ja nafta täiendavaks tootmiseks. Lisaks sellele on võimalik kasutada CO₂-te sünteetiliste kütuste, kemikaalide ja ehitusagregaatide tootmiseks. 2030. aastaks eeldatakse, et sünteetiliste kütuste tootmiseks on võimalik püüda umbes 5 miljonit tonni süsinikdioksiidi, ning kuigi see kasutuselevõtu tase on lähedal nullstsenaariumi kohasele 7,5 miljonile tonnile CO₂-le, on pooled väljakuulutatud projektidest alles väljatöötamise varajases staadiumis, ning vajavad tõenäoliselt täiendavat tuge, et edasi liikuda. [11]



Joonis 1.3 Võimalikud süsinikdioksiidi kasutamise viisid [12]

CO₂ kasutamine ei pruugi kaasa tuua heitkoguste vähenemist, sest CCU-ga seotud kliimakasu sõltub CO₂ allikast (looduslik, fossiilne, biogeenne või õhust püütud), mida CO₂-põhine toode välja tõrjub ja muundusprotsessis kasutatud energia süsinikuintensiivsusest. Lisaks sellele on faktoriteks CO₂ säilivusaeg tootes ja selle konkreetse kasutuse turu ulatus. Vähesese süsinikdioksiidiheittega energia kasutamine on

eriti oluline CO₂ kasutusel kütustes ja keemilistes vaheainetes, kuna need protsessid on väga energiamahukad. Net Zero stsenaariumi korral kui fossiilkütuste kasutus väheneb, väheneb lõpuks ka CO₂ väljatõrjumise väärtus ja kogu kasutatav süsinikdioksiid tuleb hankida biomassist või õhust, et saavutada kliimakasu. [11]

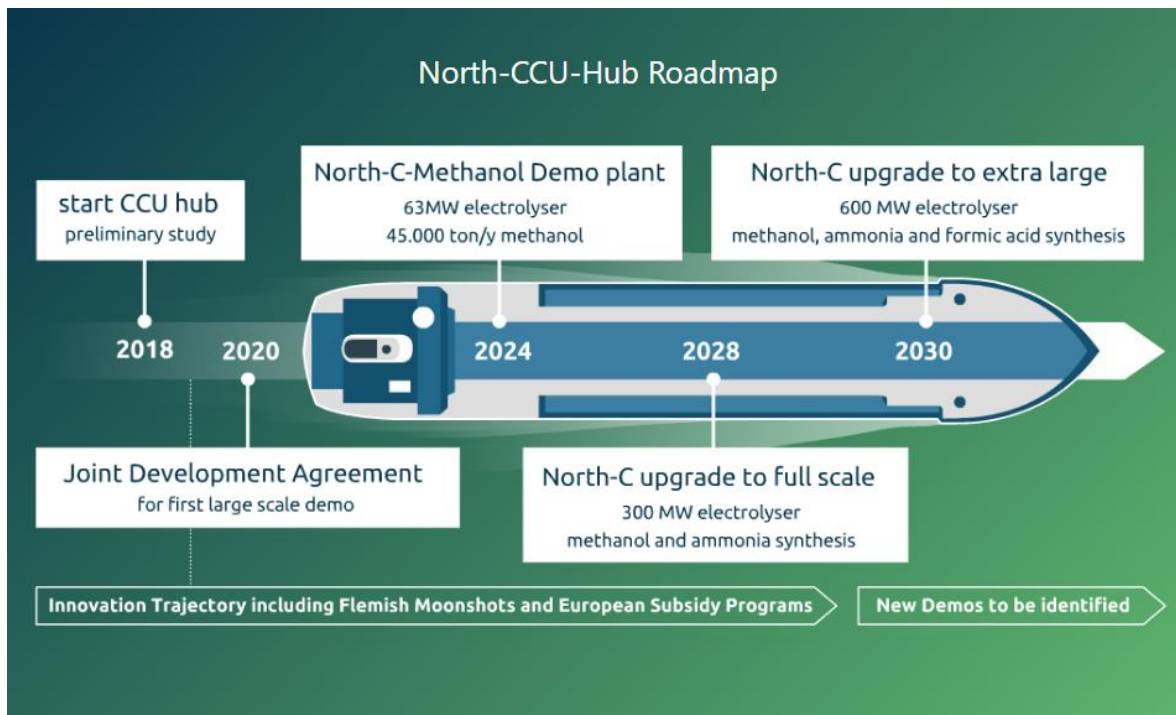
Kuigi mõningane süsinikdioksiidi kasutamine võib tuua märkimisväärset kasu kliimale, tähendab nende rakenduste suhteliselt piiratud turu suurus seda, et CCUS kasutuselevõtu keskmes peaks olema sihtotstarbeline ladustamine. Net Zero stsenaariumi kohaselt ladustatakse üle 95% 2030. aastal püütud CO₂-st geoloogiliselt ja vähem kui 5% kasutatakse ära. Miljonite aastate pikkune säilivusaeg on põhjus, miks ehitusagregaadid võivad olla ainsad CO₂ kasutusviisid, mis võivad kvalifitseeruda püsivaks sidumiseks, erinevalt kütustest ja kemikaalidest, mille CO₂ säilivusaeg on vahemikus üks aasta kuni kümme aastat. [11]

CO₂ kasutamine kujutab endast potentsiaalset tuluallikat tööstusheidete tekitajale. Saksamaal võib projekti HySCALE100 raames metanooli tootmiseks püüda kuni 1 megatonni jagu süsinikdioksiidi aastas, ning CRI arendab Hiinas ja Norras naftakeemia- ja ferrosiliitsiumitehastes kolme CO₂-metanooliks muutmise projekti. [11]

Oluline on ka see, et üha suurem osa kaubanduslikest sünteetilistest kütuseprojektidest plaanivad hankida osa või kogu CO₂ biogeensetest allikatest või õhust, et saavutada süsinikneutraalsus. [11]

Kuigi piiratud arv suuremahulisi püüdmissrajatisi kavatseb kogu kinnipüütud süsinikdioksiidi kasutamiseks saata, on väljaehitamisel ka mitmed väiksemahulised CCU rajatised, mis kavatsevad hankida CO₂ lähedalasuvatest tööstusheiteallikatest. Mõned näited sellest on järgnevad:

2020. aastal välja kuulutatud North-C metanooliprojekt Saksamaal, mis on osa North CCU Hubist, kavatseb metanooli tootmiseks kasutada elektrolüütilise vesinikuga 65 000 tonni tööstuslikku CO₂ aastas. Käesoleva projekti tegevuskava on välja toodud joonisel 1.4 [11]



Joonis 1.4 North-CCU Hub arenguplaan [13]

Ameerika Ühendriikides asuv ettevõtte Twelve kasutab elektrokeemilist redutseerimist, et muuta CO₂ toodeteks, mis ulatuvad plastist kuni lennukikütuseni. [11]

Šveitsis on Synhelion välja töötanud päikeseenergia põhineva termokeemilise muundamise tehnoloogia, mille plaanides on esimene tehas ühendada võrguga 2023. aastal. [11]

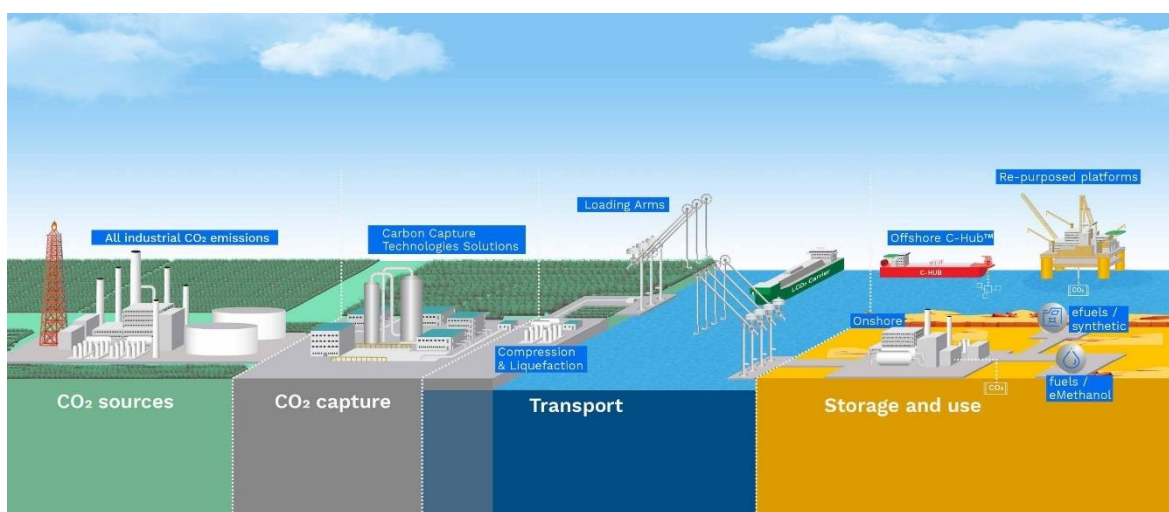
Kaks Põhja-Ameerika ettevõtet, CarbonCure ja Solidia Technologies juhivad betooni CO₂ mineralisatsiooni arendamist ja turundamist. CarbonCure müüb 650 süsteemi betoonitootjatele üle maailma, millest enamik asuvad USA-s. [11]

Ühendkuningriikides asuv ehitusmaterjalide ettevõtte Carbon8 võttis 2020. aastal Prantsusmaal kasutusele oma esimese kaubandusliku CO₂ mahutisüsteemi. [11]

Vesiniku ja CO₂ laialdane kasutamine kütusteks ja kemikaalideks muundamiseks eeldaks suuremahulise transpordi infrastruktuuri, sh. torustike, terminalide, ning laevade ja autode kasutuselevõttu. Ühine või mitme kasutajaga transpordivõrk tooks kasu üksikutele süsinikdioksiidi kasutavatele ettevõtetele, eriti väikestele, kuna see tagab mastaabisäästu ja juurdepääsu vesiniku ja süsinikdioksiidi allikatele, mis ei pruugi asuda nõudluse lähedal. Täiendavat kasu oleks võimalik saavutada, kui kombineerida CO₂ transpordi kasutamiseks toodetes ja geoloogilises ladustamises, eriti osana tulevastest CO₂ sõlmpunktidest ja aladest piirkondades, kus on palju heitkoguseid. [11]

1.3 Süsiniku püüdmine, kasutamine ja ladustamine

Tähelepanu on äratanud ka CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage), kontseptsioon, mis lisab CCS-ile kasutamise aspekti. Eelmainitud tehnoloogia toimib järgnevate sammude abil: CC tehastes tootmisel tekkivatest heitgaasidest, selle transport torustike, laevade, raudteede ja autode abil, CO₂ süstimine maa alla (maismaal/avameres) ja alaliselt ladustamine ning nafta täiendav tootmine (EOR), süstides CO₂ olemasolevatesse naftamaardlatesse või kasutades süsinikdioksiidi toorainena (vt joonis 1.5). [14]



Joonis 1.5 CCUS lihtsustatud skeem [15]

Vedelal kujul transportimine on tõhusaim viis, kui arvestada CO₂ mahtu ja efektiivset maha- ja pealelaadimist. Vedeldatud CO₂-te on Euroopas väikses mahus laevadega transporditud toiduainete ja jookide jaoks tootmiskohtadest rannikualadele. Praegu transporditakse kogu CO₂ keskmiselt -25 °C juures ja rõhul 15-18 bar, ning puuduvad kogemused süsinikdioksiidi transportimise kohta madalama temperatuuri ja rõhu tingimustes või kõrgemal rõhul. Laevatranspordi mõistes on mahutid suurima tähtsusega. CO₂ mahuti peab olema ehitatud kindla paksusega terasplaadist, et hoida CO₂ vedelas faasis püsimiseks vajalikku rõhku. Kõrgete temperatuuride ja rõhkude jaoks on vaja paksemaid plaate, mis on raskemad, mistõttu on kaubamaht ühe tarnimise korra jaoks piiratud. Teisest küljest võivad madala temperatuuri ja rõhu tingimusi arvestades mahutid olla õhukesemad, mis võimaldab mahutite ja laevade suurust tõsta, kuid antud tingimustel lähenevad temperatuur ja rõhk kolmikpunktile, kus CO₂ muutub kergesti tahkeks, vedelaks ja gaasiliseks, mistõttu on oht, et süsinikdioksiid võib muutuda transpordi ajal kuivaks jääks. Nendel põhjustel viiakse praegu CO₂ transporti läbi keskmise temperatuuri ja rõhu tingimustel. [14]

CO₂ levinumad kasutusala on selle kasutamine keevitamises ja sellest kuivjää valmistamine. JIMGA poolt avaldatud statistika järgi oli 2020. aastal Jaapani tehastest tarnitud veeldatud CO₂ saadetiste maht 675 000 tonni, millest kuivjää moodustas veidi üle 288 000 tonni. Suurim osa CO₂ kasutusalasid on tööstuslikud, mille alla kuulub nt. „CO₂ kaarkeevitus“ laevaehituses, lisaks sellele sildade ja tornide keevitamisel. CO₂ kasutatakse lisaks eelnevaltmainitud gaseeritud jookide jaoks, ning veeldatud süsihappegaas on kasutusel ka väetisena (vt. joonis 1.6). [14]

Liquefied carbon dioxide market share by application in Japan 2020



Joonis 1.6 Vedeldatud süsinikdioksiidi turujaotus [14]

Global CCS Institute (GCCSI) andmetel on 2021. aasta septembri seisuga maailmas 135 CCUS-i projekti millest 27 on juba töös. Sama aasta esimese 9 kuu jooksul alustati 71 uue projektiga. Kuigi Põhja-Ameerikas ja Euroopas on selle tehnoloogia rakendamise näidatud initsiatiivi on projektide arv Ida-Aasias ja Lähis-Idas samuti tõusuteel. [14]

Euroopas on praegu arendusfaasis 35 projekti ning uute projektide väljatöötamisel on juhtroll ärimudelite arengul ja riiklike toetuste kättesaadavusel. Riiklike toetuste osas on EL teatanud EL Innovatsioonifondi käivitamisest, millega sooses valiti 2021. aasta novembris välja 7 vähese CO₂ heitega ja süsinikdioksiidiheite vähendamise projekti, mida rahastatakse kokku 1,1 miljardi euro väärtuses, ja 4 projekti neist on seotud CCS/CCUS-iga. Lisaks sellele eraldatakse 2030. aastaks 25 miljardit eurot, mis kiirendab paljude projektide toetuse saamist. [14]

Eelmainitud tegurite kombinatsioon soodustab uute projektide käivitamist lisaks Norra, Madalmaade ja Ühendkuningriigi, kes on seni olnud liidriteks nende tehnoloogiate arendamisel Euroopas, piirkondadesse nagu Itaalias, Taanis ja Rootsis.

Põhja-Ameerikas on Texase lääneosas asuvate Permi basseini naftamaardlate ümber juba paigaldatud umbes 8300 km CO₂ torustikke, lisaks sellele on sealkandis hästi rakendatud CO₂-EOR tehnoloogiat. Alates 2020. aastast on välja kuulutatud enam kui 40 uut CCS projekti, mis on peamiselt tingitud asjaolust et Ameerika Ühendriigid ühinesid ametlikult uuesti Pariisi kokkuleppega ja tugevdasid oma kliimamuutuste

poliitikat. Samuti oli abiks 45Q, mis on maksukrediidisüsteem, laienemine süsiniku sidumisele. [14]

Kuigi nende investeringud CCUS-i jäävad Euroopa ja Ameerika Ühendriigid omadest maha, on viimaste aastate jooksul tehtud Aasias positiivseid edusamme, sest Indoneesias ja Malaisias on välja kuulutatud esimesed kaubanduslikud CCS-I projektid. Austraalias võttis valitsus vastu poliitilised otsused, mille kohaselt lisatakse CCS heitkoguste vähendamise fondi (ERF), mis on Aasia ja Vaikse ookeani piirkonna esimene CCS rahaliste stiimulite süsteem. Hiina on käivitanud heitkogustega kauplemise süsteemi 2225 elektrijaama jaoks, mis hakkavad aastas kaubitsema rohkem kui 4 miljardi tonni süsinikdioksiidiga. Jaapanil oli Aasia CCUS võrgustiku käivitamisel juhtroll, ning eeldavasti on Jaapani uurimisasutustel ja ettevõtetel tugev kohalolek Aasia CCUS turul. [14]

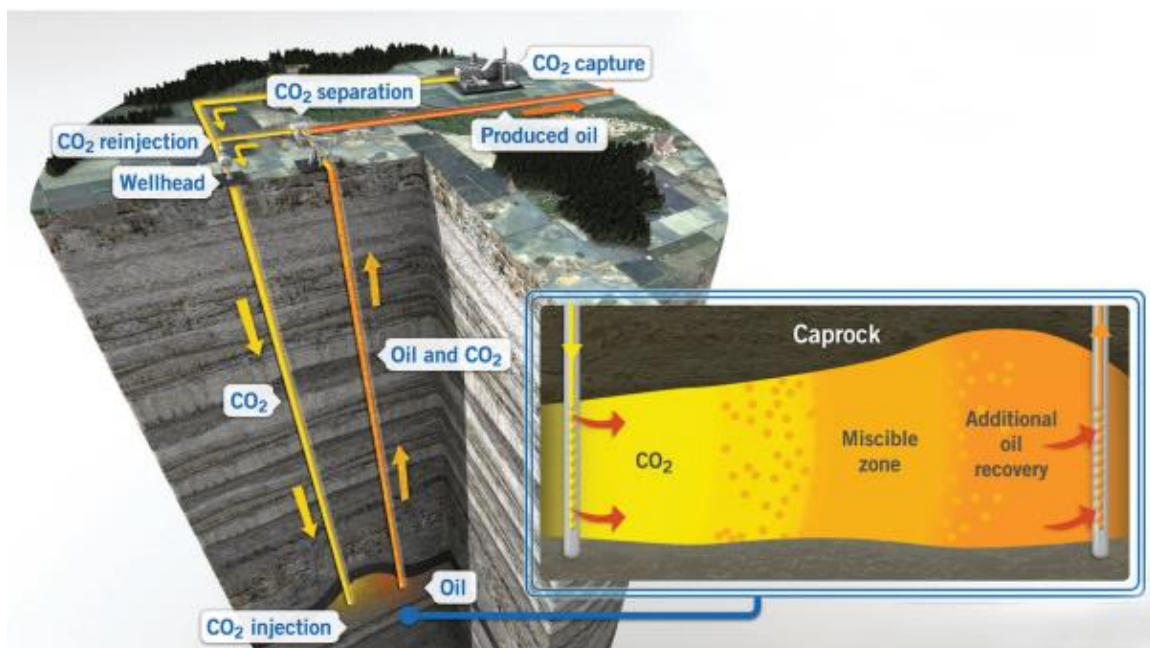
2020. aasta novembris toimunud energiainistrite kohtumisel East Asia Summit (EAS) loodi Jaapani algatusel Aasia CCUS-i võrgustik, mille eesmärk on arendada CCUS-i rakendamiseks piirkonnas võimalusi ja jagada teadmisi. Süsinikdioksiidi ladustamispotentsiaal Aasias on välja toodud joonisel 1.7. [14]



Joonis 1.7 Aasia CO₂ ladustamise potentsiaal miljardites tonnides [14]

1.3.1 CO₂-EOR

Süsinikdioksiidiga täiendatud nafta tootmist on kasutatud juba aastakümneid vahendina, et viia läbi nafta täiendav tootmine tühjenenud reservuaaridest. Protsess on kõige tõhusam, kui see toimub segunemisrežiimis, kus süstitud süsinikdioksiid, mis on tavaliselt vedelas või ülekritilises olekus, seguneb täielikult reservuaaris oleva naftafaasiga, mille tagajärjel väheneb naftafaasi viskoossus, mis seejärel ühefaasilise drenaaziprotsessi käigus kivimi pooridest välja tõrjutakse (vt joonis 1.8). Antud protsess eeldab seda, et temperatuuri ja rõhu tingimused reservuaaris oleksid kõrgemad CO₂-süivesinike segu minimaalsest segunemiserõhust. Kergemate toornaftade puhul on see rõhk tavaliselt 75 bar ja reservuaari temperatuur umbes 70°C ning tõuseb koos temperatuuriga. Kuigi süsinikdioksiidiga segunematu naftahulga välja tõrjumine võib protsessi kasutegurit tõsta, tähendavad need tingimused seda, et võimalused kasutada tõhusamat viisi nafta täiendavaks tootmiseks on piiratud. [7]



Joonis 1.8 CO₂ - EOR lihtsustatud skeem [7]

CCS põhjal nafta täiendav tootmine on sarnane protsess, kuid sellel on kaks eesmärki, milleks on koguda tagasi täiendavad kogused naftat reservuaaridest, mille naftatoodang on langenud alla kriitilise taseme, ladustades samal ajal osa süstitud CO₂-st reservuaaris, selle asemel, et seda pinnale tagasi pumbata. Ajendiks sellele on võimalikult suure hulga tulu teenimine lisa-nafta abil, et kompenseerida CCS protsessi kõrgeid kulusid (kuni 70 dollarit ladustatud süsinikdioksiidi tonni kohta), samas kui CO₂-EOR puhul on eesmärk toota võimalikult palju lisa-naftat, kasutades võimalikult vähe süsinikdioksiidi. Seda põhjusel, et ei oleks vaja muretseda süsinikdioksiidi ladustamise kohta reservuaaris. CCS-EOR puhul peab olema selgelt täiustatud süsivesinike

ja ladustatud CO₂ koguse vahel, mis peab olema oluliselt suurem kui optimaalne kogus tõhusaks segunemiseks, et protsess oleks majanduslikult elujõuline. See tasakaal osutub ka CCS-EOR protsesside elujõulisuse kindlaksmääramisel kriitiliseks. CCS-EOR on üks süsinikdioksiidi kasutamise vorme ja praegu on see ainus lahendus mis annab süsinikdioksiidile väärtuse skaalal megatonni aastas. [7]

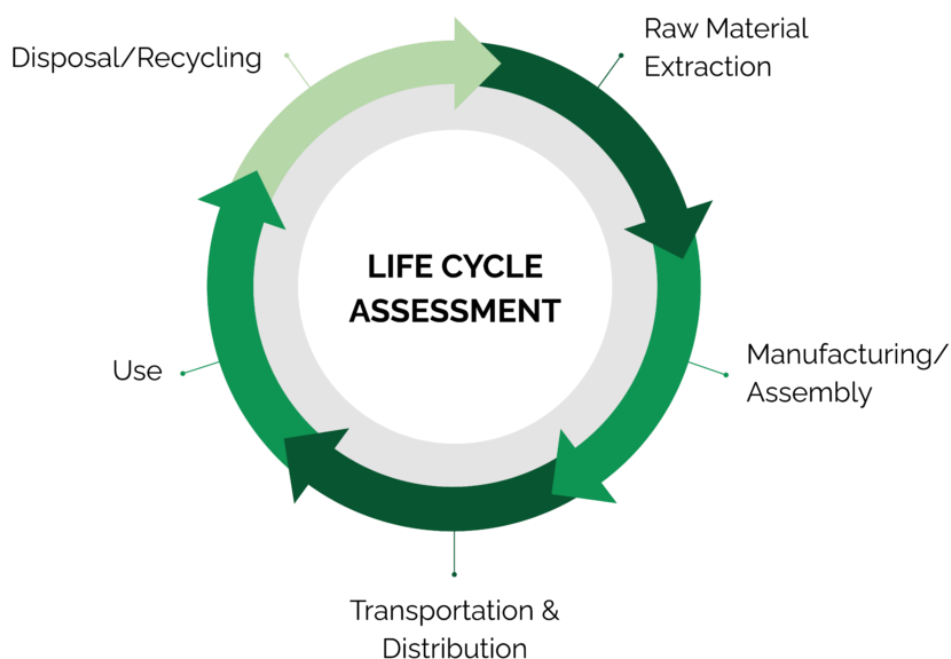
Maailmas on hetkel rohkem kui 140 CO₂-EOR projekti, mis toodavad umbes 300 000 barrelit lisa-naftat päevas, mis vastab umbes 0,35% ülemaailmsest nafta kogutoodangust. Enamik sellest tootmisest toimub Ameerika Ühendriikide kesk-läänealadel, ning eesmärk on peamiselt EOR ja põhiülesanne vähendada süsinikdioksiidi netosissepritset ja maksimeerida nafta tootmist. Selleks, et protsess oleks suuremahulise CCS jaoks elujõuline, on vaja paradigma muutust, kus ärieesmärk on maksimeerida nii nafta tootmist kui ka CO₂ ladustamist. Alates 2000. aastast on tellitud umbes kuus projekti, mis on tõeliselt CCS-EOR, millest kaks suurimat asuvad mõlemad Kanadas Saskatchewanis: üks Weyburn-Midale'is ja teine Estevanis. [7]

Weyburn-Midale projekt, mida juhivad Cenovus ja Apache, oli aastatel 2000-2012 täielikult jälgimise all ja kinnitati CCS-projektina. LISA-nafta kogus projekti eluea jooksul ligikaudu 220 Mbbl ja tootlus oli 3 bbl iga ostetud CO₂ tonni eest. Praeguseks on ladustatud üle 20 Mt CO₂ ja eeldatakse et projekti eluea jooksul ladustatakse kokku 40 Mt CO₂, millest 30 Mt CO₂ ladustatud Weyburni väljal ja ülejäänud Midales. Igapäevane süsinikdioksiidi sissepritse koosneb 13 000 tonnist CO₂-st, millest pool on värske ja ülejäänud taaskasutatud. CO₂ toide tuleb Põhja-Dakota Beulah sünteetiliste kütuste gaasitehasest 320 km pikkuse torustiku kaudu. Antud projekt on pikendanud naftamaardla eluiga üle 25 aasta. [7]

Seevastu SaskPoweri piiritammi integreeritud CCS-projekt on väga hiljutine. See avati 2014. aasta oktoobris maailma esimese täielikult kaubandusliku CCS tehase ja maksis umbes 1,3 miljardit dollarit, millest 300 miljoni dollari jagu rahastas valitsus. Antud projekt hõlmab 110 MW söeküttega töötava elektriijaama CO₂ põlemisjärgset püüdmist, mille tõhusus on 90%, eesmärgiga säilitada püüdmise kogus 1 Mt CO₂ aastas püsirežiimil. 2016. aasta augustis saavutati kogumahtuvuse 1 Mt CO₂ ning see töötab nüüd kavandatud ladustamiskiruste juures. Eelmainitud andmeid saab võrrelda 250 000 auto poolt tekitatud heitmetega. Süsinikdioksiid pumbatakse 66 km pikkuse torustikuga Weyburni ammendunud naftareservuaaridesse, tõstes sellega püütud CO₂ kogust märkimisväärselt. Ülejäänud osa püütud süsinikdioksiidist hoitakse 3,4 km sügavuses Deadwoodi soolases põhjaveekihis, mis on vaid 2 km kaugusel naftatehnoloogia uurimiskeskuse (PTRC) poolt hallatud Aquistore projektist. [7]

1.4 CCU ja CCS mõju keskkonnale elutsükli analüüsi abil

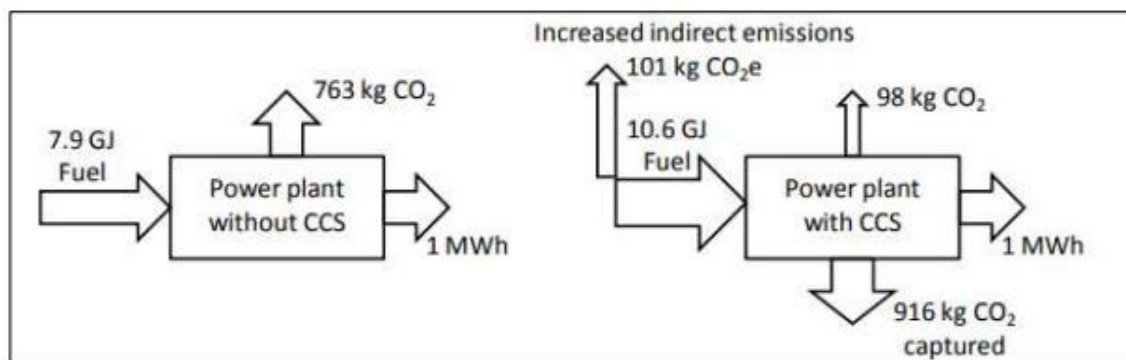
Elutsükli analüüs põhineb toote või teenuse keskkonnamõju hindamisel kogu selle olelusringi vältel, alates teenuse loomisest, kuni selle eluea lõppu analüüsid ka kasutajapoolset kasutamist. LCA mõõdab kõigi toodete ja teenuste loomise ja kasutamisega seotud osade keskkonnamõjusid, nagu tootmises kasutatav energia, transpordis kasutatav kütus ja kasutuselt kõrvaldatud ökoloogilised kulud. See meetodika aitab võrrelda kasutatud tooteid, materjale ja meetodeid, pakkudes kasulikku teavet keskkonda säästvate otsuste tegemiseks. Elutsükli analüüsi on kirjeldatud joonisel 1.9 [16]



Joonis 1.9 LCA lihtsustatud skeem [17]

1.4.1 Esimese uuringu elutsükli analüüs

Esimene töö analüüsis elektri jaamade tööd ja mõju keskkonnale koos ja ilma süsiniku püüdmistehnoloogiatega. Töös käsitletud elektri jaamadest 13 olid kivisöe põhjal, 6 olid pruunsöe põhjal ja 4 maagaasi põhjal, ning kahte süsiniku püüdmistehnoloogiat, mis olid amiinipõhistel lahustitel. [18]



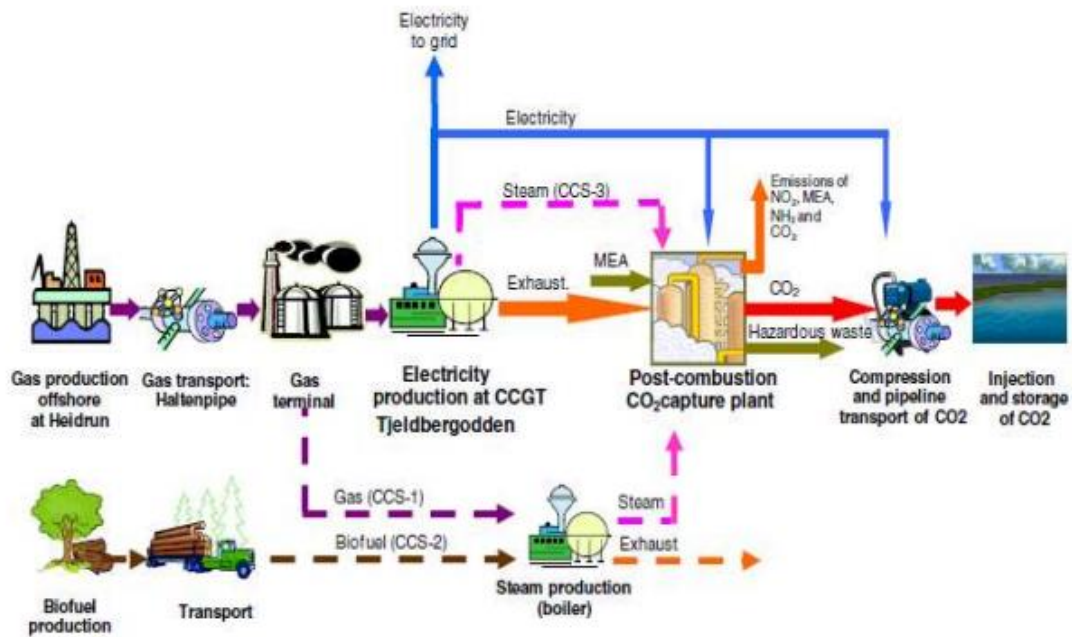
Joonis 1.10 Energia ja kasvuhoonegaaside vood, mis kaasnevad 1 MWh elektri tootmisega [18]

Esimese töö käigus leiti, et elektri tootmine koos CCS süsteemidega nõudis 2,7 GJ ehk 34% rohkem kütust kui ilma nende süsteemideta, kuid süsteem ilma CCS süsteemita paikas kogu kütuses sisalduva süsiniku atmosfääri samal ajal kui süsteemid CCS-iga püüdsid pea 90% kütuses sisalduvast süsinikust. Protsessiga kaasneva energia ja kasvuhoonegaaside voog on välja toodud joonisel 1.10. Oluline on märkida, et emissioonid sisaldasid ka muid kasvuhoonegaase, mis ei olnud süsinikdioksiid nagu nt. metaan, ning CO₂ heitmete kogus tõuseb kui arvestada ka muid faktoreid, milleks on CCS infrastruktuur, kaevandamine ja transport. Lisaks sellele kaasnevad emissioonid ka muudest suitsugaasidest, nagu lämmastikoksiidi (NO_x) ja vääveloksiidi (SO_x) ühenditest. NO_x ühendite heitkogus näitas CCS-i süsteemide rakendamisel üldiselt kasvutendentsi, samal ajal kui SO_x heitkoguste hulk vähenes. Välja on toodud see, et vähete uuringute arvu ja vaatluste suurte erinevuste tõttu ei ole mitte-kasvuhoonegaaside heitkoguste arv reaalselt käegakatsutav. [18]

Antud tulemuste järgi saab täheldada seda, et kasvuhoonegaaside netovähenevamine varieerub 59% ja 83% vahel. Mittekliimamõjude analüüs, nagu toksilisuse ja hapestumise tulemused võivad näidata võimalikku kasvu CCS-süsteemiga seoses, kuid töös pole arvestatud püüdmistehnoloogiate täiustamist, sh. kasutamise ja kõrvaldamise mõjusid, mis võivad vähendada kaudseid mitte-kasvuhoonegaaside mõjusid. [18]

1.4.2 Teise uuringu elutsükli analüüs

Teine töö analüüsis Norras, Tjeldbergoddenis gaasielektrijaama mõju keskkonnale, lisades sellele põlemisjärgne CCS (vt joonis 1.11).



Joonis 1.11 Tjeldbergoddeni gaasielektrijaama korpuse lihtsustatud konstruktsiooni skeem koos CO₂ püüdmise, transpordi ja ladustamisega [18]

Töös analüüsiti nelja stsenaariumit:

1. Gaasielektrijaam ilma CCS süsteemita;
2. Gaasielektrijaam koos CCS süsteemiga, kus oli lisaks sellele veel eraldi gaasikütel töötav aurukatel amiinide regenererimiseks;
3. Gaasielektrijaam koos CCS süsteemiga, millel oli biomassil töötav aurukatel amiinide regenererimiseks;
4. Gaasielektrijaam koos CCS süsteemiga, kus amiini regenererimiseks tarnitakse auru madalrõhu auruturbiinist elektrijaamast.

Mõju hinnati vastavalt GWP, AP, EP, POPC ja CED seisukohalt, ning uuringu käigus selgus, et CCS-i rakendamine vähendas heitmete kogust ainult GWP kategoorias, kus esimese nn. võrdlusstsenaariumi kogusumma oli 395 220 tonni süsihappegaasi. Esimese CCS-i süsteemiga vähenesid CO₂ heitkogused 47%, teise stsenaariumiga 71-76% ja viimase stsenaariumi puhul 77%. Lisaks sellele mainiti uuringus, et CCS-is võib olla oluline aspekt ka inimese tervisega seotud.[18]

1.4.3 Kolmanda uuringu elutsükli analüüs

Kolmandas uuringus võeti 1 kWh (kilovatt-tund) elektritootmist funktsionaalseks ühikuks, ning kasutatud püüdmistehnoloogiad olid järelpõletus, hapnikkütus ja eelpõletus. Elektritootmiseks kasutati kolme võimalust, milleks olid kivisüsi, pruunsüsi ja maagaas, ning toimivuse hindamiseks kasutati netoenergia ja energiatrahvi parameetreid.[18]

Uuringus leiti, et kivisöe järelpõletamise netoefektiivsus oli vahemikus 29,6%-49% ning pruunsöel oli vahemikus 26,3%-49%, kuid hapnikkütuse protsess nõudis rohkem energiat, mis on tingitud hapniku tootmise vajadusest. [18]

Lisaks sellele nähti tulemustest seda, et niipea kui CCS võeti elektrijaamas kasutusele vähenes GWP oluliselt, samas kui teised NGHG mõjukategooriad suurenesid erinevate tegurite tõttu. AP väärtused ei olnud nii homogeenised kui GWP. Ootuspäraselt oli pruunsöel põhineva elektrijaama GWP ilma CCS-ita suurem kui kivisöel.[18]

Uuring näitas, et CC tehnoloogia rakendamise tulemuseks on GWP vähenemine, kuid mõneti kaasnesid ka negatiivsete keskkonnamõjude suurenemised. Võrreldavalt teiste uuringutega viidati vajadusele arendada tehnoloogiaid ja meetodeid, mis vähendavad negatiivset keskkonnamõju ja vähendavad CO₂ sidumiseks vajaliku energia hulka.[18]

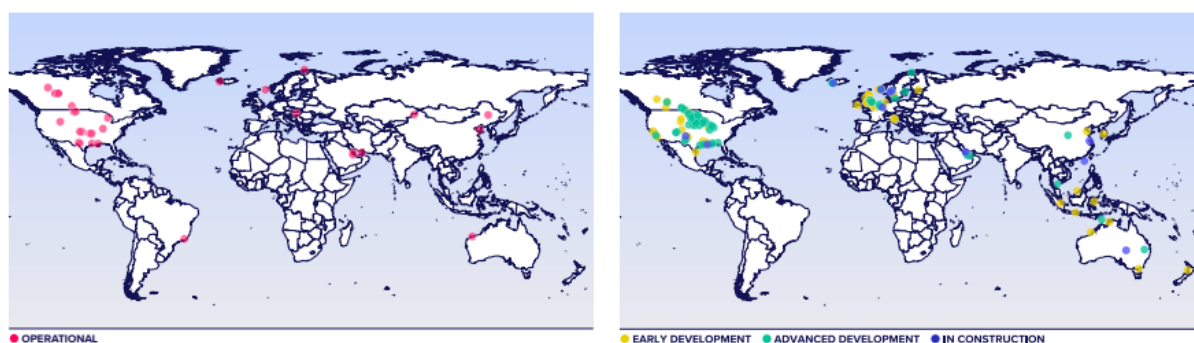
1.4.4 Neljanda uuringu elutsükli analüüs

Selles analüüsis vaadeldi CO₂-EOR-st pärineva sekvesteerimisega seotud heitkogused viie erineva projekti raames, ning nende eesmärk oli leida hinnang kasvuhoonegaaside heitkoguste kohta. Viis projekti, mida uuringu jaoks kaaluti olid Northeast Purdy üksus, SACROC üksus, Ford Geraldine'i üksus, Joffe Vikingi üksus ja Weyburni üksus.[18]

Kõrge soojusväärtusega kivisööelektrijaama kasutegur 32% annab tulemuseks 55 kg CO₂/MWh ülesvoolu heitkoguseks ja 975 kg CO₂/MWh kogutoodangu puhul. Eeldatava püüdmismäära 90% puhul eraldab CCU süsteemi kasutus 97,5 kg CO₂/MWh ja püüab 878 kg CO₂/MWh. Uurijad vaatlesid esmalt CO₂-EOR projektide tekitatud süsinikdioksiidi heitkoguseid. Nende eesmärk oli püüda välja mõelda süsteem kui ainus projekt, et näha kas sellega kaasneb CO₂ üldine vähenemine atmosfäärist. Tulemustest avaldati, et positiivsete netoheitmete tõttu, siis kasvuhoonegaaside heitkogused on suuremad, kui neid ei süstita reservuaari ja seal ei hoita. Avastati, et SACROCi üksus ja Weyburni üksus olid suurima netoheitmega. Suurim kasvuhoonegaaside allikas oli seotud nafta põletamisega tootmise eesmärgil seotud, ning iseenesest olid põlemisel tekkivad heitkogused suuremad kui heitkogused mis kaasnesid süsihappegaasi sidumisega.[18]

2. MAAILMAS KASUTATAVAD CCU ja CCS LAHENDUSED

Käesolevas peatükis kirjeldatakse, ning analüüsitakse Norras, Jaapanis, Ameerika Ühendriikides ja Ühendkuningriigis kasutusel olevaid lahendusi. Tuuakse välja antud lahenduste areng läbi aja ning kirjeldatakse nende potentsiaalset rakendust tulevikus. Joonisel 2.1 on näidatud CCS projektide mahtu 2022. aasta seisuga.



Joonis 2.1 CCS projektide arengufaase kirjeldav kaart [9]

2.1 Tomakomai projekt

Alates selle projekti loomisest 2008. aasta mais, mille eesmärk oli varajaselt CCS-i rakendada Jaapanis, viis Japan CCS majandus, kaubandus- ja tööstusministeeriumi (METI) juhtimisel läbi CCS näidisprojekti eeluuringu ning esitas 2011. aasta oktoobris eelmainitud ministeeriumile „Tomakomai reservuaari põhjaliku hindamise“ ja „Tomakomai objekti näidisprojekti kava“. [19]

Vastuseks eelmainitule kuulutas METI 2012. aasta veebruaris välja „Tomakomai rajatise näidiskatsekava“ ning korraldas kuni 2020. majandusaastani kestva näidiskatsete esimese etapina avaliku konkurssi „CO₂ vähendamise tehnoloogia näidiskatseprojekt“. 2015. majandusaastal valiti töövõtjaks Japan CCS, kes oma nelja-aastase lepinguperioodi jooksul tegi esialgseid ettevalmistusi, sh. CCS-i demonstratsioonkatsejaama projekteerimist ja ehitamist Tomakomais, Hokkaidol, süstekaevude puurimist ning seiresüsteemi loomist, et jälgida CO₂ käitumist ning pinnasest allapoole jäävaid tingimusi pärast CO₂ süstimist alates 2016. majandusaastast. Eelmainitud demonstratsioonkatsejaam on näidatud joonisel 2.2. [19]



Joonis 2.2 Tomakomai CCS-i demonstratsioonehitised [19]

2016. aasta veebruaris esitas Japan CCS tutvustuskatse teise etapina rakenduskava CO₂ süstimiseks mere alla ning pärast METI läbivaatust anti korraldus viia läbi „2016. majandusaasta CO₂ vähendamise tehnoloogia tutvustuskatseprojekt“. [19]

2017. aasta aprillis anti Japan CCSile korraldus viia läbi „2017. majandusaasta suuremahuline CCS tutvustuskatse projekt“. Ning 2018. majandusaastal anti uue energia ja tööstustehnoloogia arendamise organisatsioonilt (NEDO) korraldus läbi viia „CCS teadus- ja arendustegevuse projekt“ ning „suuremahuline CCS-i näidiskatse Tomakomais“ ja on alates sellest hetkest jätkanud projekti rakendamist. [19]

Nelja aasta jooksul 2012. majandusaastast kuni 2015. majandusaastani kavandas ja ehitas Japan CCS rajatise kõrge puhtusastmega CO₂ püüdmiseks seoses rafineerimistehase vesinikutootmisüksuses tekkivast CO₂ sisaldavast gaasist ja süsinikdioksiidi süstimisest maapinnale. Lisaks muudeti üks olemasolev uuringukaev vaatluskaevuks ning puuriti kaks vaatluskaevu ja kaks süstekaevu. [19]

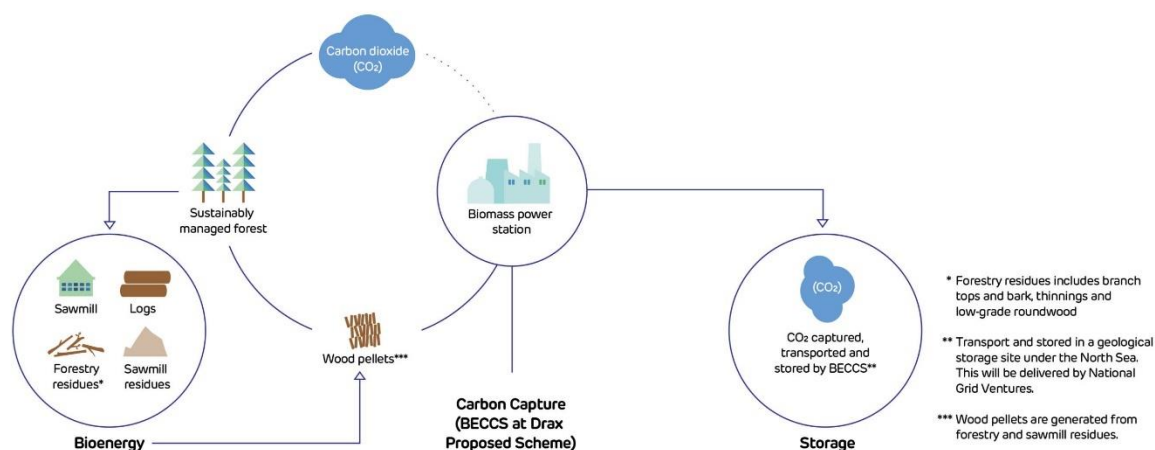
Samal ajal, eesmärgiga kinnitada, et CO₂ süstimine reservuaari ei mõjuta ümbritsevat keskkonda, paigaldas Japan CCS tekke- ja maavärinaandmete seiresüsteemi, ning hankis enne süstimist lähteandmed. Lisaks sellele, kuna kiht, kus CO₂ hoitakse, on merepõhja all, viidi läbi merereostuse ja merekatastroofide ennetamise seaduse kohaselt läbi merevee ja mereelustiku eeluuringu. [19]

Pärast selle ettevalmistustöö lõpuleviimist alustas Japan CCS alates 2016. aasta aprillist süsinikdioksiidi süstimist umbes 1000 meetri sügavusele merepõhjast Tomakomai sadamaalal asuvasse kihistusse ning jälgimist sissejuhtimise ajal eesmärgiga saavutada 300 000 tonni kumulatiivset süstimist. Seiretöö hõlmas endast CO₂ lekke puudumise kinnitamist sisse süstitud süsihappegaasi käitumise jälgimise, mikroseismilisuse ja looduslike maavärinate pideva jälgimise ning merekeskkonna uuringute läbiviimise kaudu. 22. novembril 2019 saavutati CO₂ sissepritse eesmärgi, milleks oli 300 000 tonni, ja sissepritse lõpetati samal päeval. Seiretöö jätkus pärast süstimise lõppu. [19]

Lisaks eelmainitule levitatakse ajakohast teavet Tomakomai projekti kohta paneelnäituste ja ettekannete kaudu, samuti Tomakomai raekojas ja Japan CCS-i veebilehel kuvatava monitori kaudu. Jaapani valitsus on kehtestanud eelnõu Tomakomai projekti kasutamiseks süsiniku ringlussevõtu näidisbaasina ning edendab uuringuid, mille eesmärk on CCS-i ja CCUS-i koostöömimine. [19]

2.2 Drax BECCS

2018. oktoobris alustati Draxi elektri jaamas katsetama esimest omataolist bioenergia süsiniku püüdmise ja ladustamise (BECCS) projekti Euroopas. C-Capture tehnoloogiaga pilootprojekt püüdis Ühendkuningriigi suurimas taastuvelektri jaamas 2019. aasta alguses oma esimese koguse süsinikku. Antud tehnoloogiat on kirjeldatud joonisel 2.3. [20]



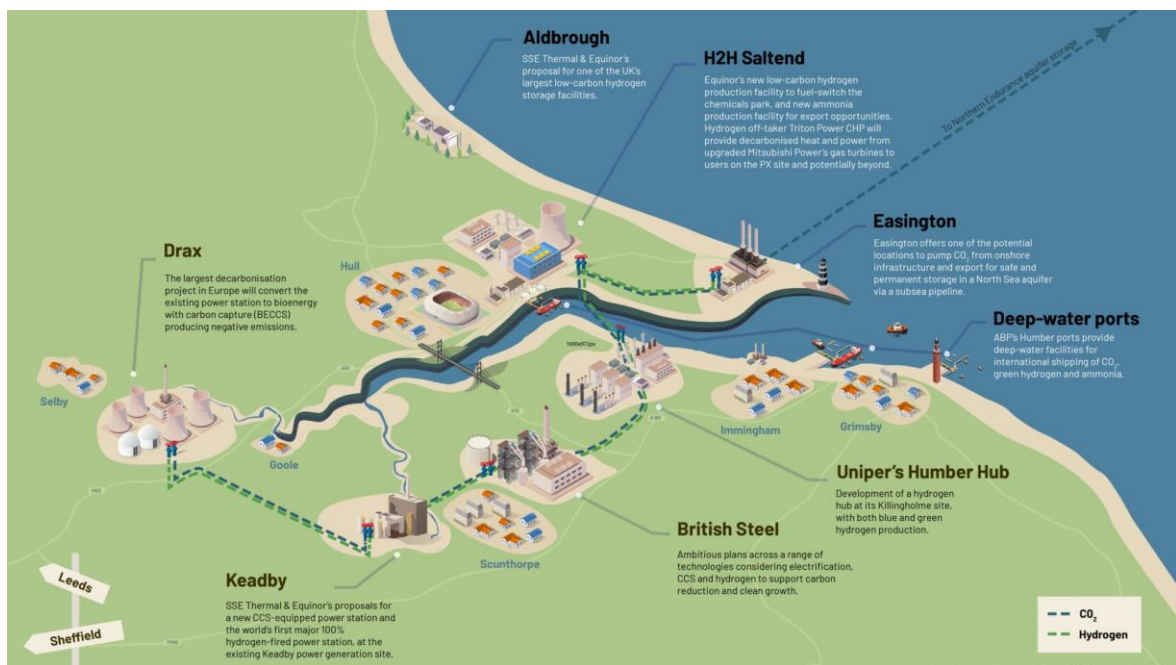
Joonis 2.3 BECCS süsteemi kirjeldav lihtsustatud skeem [21]

Teine BECCS-i pilootrajatis, mille Mitsubishi Heavy Industries (MHI) paigaldas Põhja-Yorkshire'i elektri jaama CCUS inkubatsioonipiirkonda 2020. aasta sügisel, suurendas Draxi tehnilist arusaama negatiivsete heitkoguste tarnimise kohta. Pilootprojekti edu oli

ajendiks kahe ettevõtte jaoks, et sõlmida Draxiga pikaajalise lepingu, et kasutada MHI CC tehnoloogiat, milleks on Advanced KM CDR protsess. [20]

Drax teeb koostööd Worleyga, kes pakub eeltoiteteenuseid kahe biomassi BECCS-i üksuse uuendamiseks. Leping hõlmab tehase paigutuse väljatöötamist, kulude kalkulatsiooni ja FEED graafikuid, lisaks eelmainitule ka üksikasjalikku projekteerimist, hankeid ja ehitust. [20]

Lisaks eelmainitule on Drax pannud endale eesmärgiks saada maailma esimeseks süsiniknegatiivseks elektrijaamaks, millega kaasneks ka Ühendkuningriigi esimese nullsüsiniku tööstusala sõlmpunktiks, mis aitaks Põhja-Inglismaal vähendada süsinikehitmeid (vt joonis 2.4). Koostööd on tehtud ka Bechteliga, et uurida võimalusi ja asukohti uute BECCSi tehaste ehitamiseks kogu maailmas. [20]



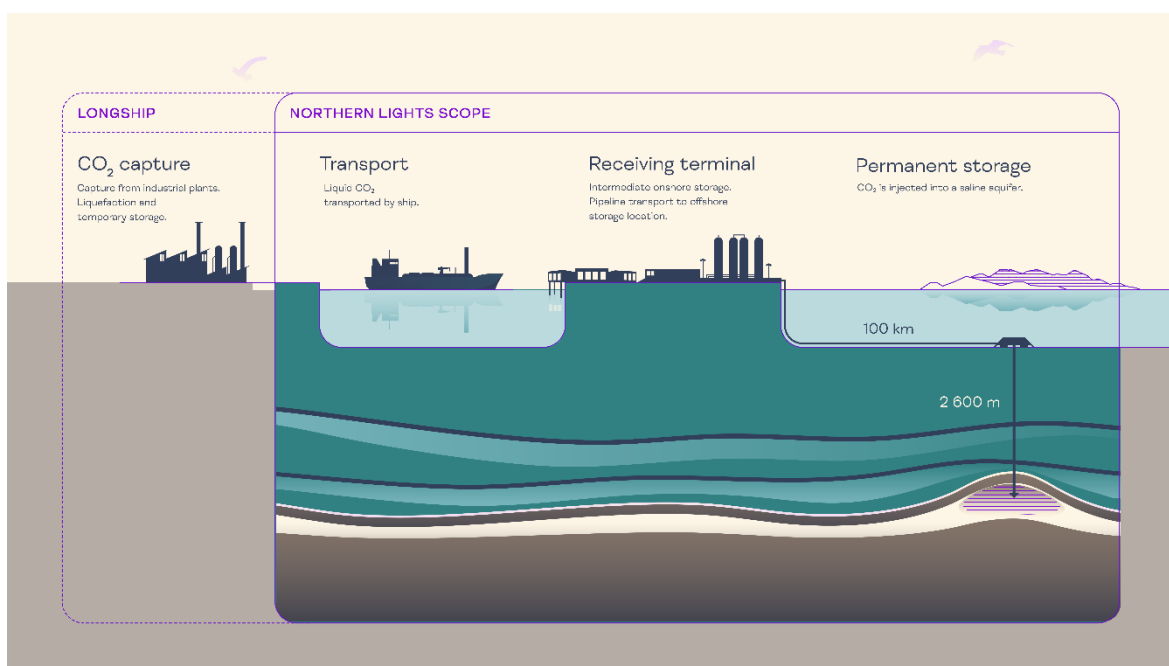
Joonis 2.4 Ühendkuningriigi esimese nullsüsiniku tööstusala sõlmpunkti skeem

Draxi elektrijaama CCUS-i inkubatsioonialal korraldatakse ka teostatavusuuring, milles uuritakse kuidas süsinikdioksiidi heitmeid püüda ja kasutada säästvate loomasöödatoodete valkude valmistamiseks. Teostatavusuuring on osa REACT-FIRST-i algatusest, mille eesmärk on koguda kriitilisi andmeid kala- ja linnusöödas kasutatava uue üherakulise valgu kohta, mille eesmärk on jätkusuutlikult muuta Ühendkuningriigi vesiviljelust ja linnukasvatust. [20]

Teises CCUS-i projektis uuriti sulakarbonaadist kütuseelementide kasutamise teostatavust CC tehnoloogiana, samal ajal energia tootmiseks ja kasvuhoonegaaside tarnimiseks naabruses asuvasse aiandusladesse, et parandada saagikust. [20]

2.3 Northern Lights

Northern Lights on Norra valitsuse projekt, mis käsitleb CCS-i täismahus Longshipi projekti osana (vt joonis 2.5). Projekt on avatud kolmandatele isikutele CO₂ transpordi- ja ladustamisrajatise arendamise ja käitamise eesmärgil. Antud projekt on kõigi aegade esimene piiriülene avatud lähtekoodiga CO₂ transpordi ja ladustamise infrastruktuuri võrk ning pakub ettevõtetele üle euroopa võimaluse ladustada oma süsinikheitmeid ohutult ja püsivalt maa all. Projekti esimene etapp valmib 2024. aasta keskel ladustamismahuga kuni 1,5 Mtpa. [22]



Joonis 2.5 Northern Lights projekti kirjeldav skeem [22]

Longshipi projekt hõlmab endast Oslo lähisel fjordi piirkonnas tööstuslikest allikatest pärit CC-d, ning vedela süsihappegaasi transportimist nendest tööstuslikest püüdmiskohtadest Norra läänerannikul asuvasse maismaaterminali. Sealt transporditakse veeldatud CO₂ torujuhtme kaudu Põhjameres asuvasse avamere ladustamiskohta alaliseks ladustamiseks. Northern Lights vastutab projektis transpordi- ja laokomponentide eest. [22]

Longshipi projekt peegeldab Norra valitsuse ambitsiooni arendada 2024. aastaks Norras välja täiemahuline CCS-i väärtusahel, näidates selle abil süsinikdioksiidi jäätmete vähendamise potentsiaali Euroopas ja maailmas. Norra valitsus on näidanud üles tugevat ja pikaajalist juhtrolli täielik CCS-i elluviimisel. Norra valitsuse toetusega võib Northern Lightsi projekt pakkuda realistlikke võimalusi Norra ja Euroopa tööstusalades süsinikdioksiidi vähendamiseks. [22]

Norra valitsus andis 2016. aastal välja püüdmis-, transpordi-, ja ladustamislahenduste teostatavusuuringud. Need uuringud näitasid väärtusahela osade kokkupaneku ja ladustamise projekti teostatavust. Eelmainitud tulemuste põhjal otsustas valitsus jätkata arendustööd lepingu kaudu, mis hõlmas endast kontseptsiooni- ja FEED-i (Front-end engineering and design) uuringuid. Gassnova esindab Norra riiki ja tegutseb koordineeriva organina. Uuringud hõlmasid endast CC-d Norcemi (Heidelbergi kontsern) tsemenditehases Brevikis, CC-d Oslos asuvas jäätmeenergiatehases Hafslund Oslo Celsio ja Kombineeritud transpordi ja ladustamise lahendus, mida haldab Northern Lights JV DA. [22]

Eelprojekti reguleeris Gassnova ja Equinori vaheline uuringuleping. Equinori, Shelli ja Totali vaheline koostööleping reguleeris uuringu ja toetamise ettevalmistamist ning ühisettevõtte lepingu sõlmimise ettevalmistusi. 2020. aasta mais võtsid kolm ettevõtet vastu investeerimisotsuse, mis põhines 2020. aasta alguses „Eos“ kinnituskaevu puurimisel omandatud veehoidla kvaliteedi ja mahu andmetel ning riigiga sõlmitud kommertslepingul, ning pärast ajaloolist hääletust parlamendis tegi Norra valitsus 2020. aasta detsembris oma rahastamisotsuse ja nimetas projekti Longshipiks. [22]

2.4 DAC

DAC ehk Direct Air Capture tehnoloogia põhineb CO₂ eraldamisel otse atmosfäärist. Süsihappegaasi saab püsivalt ladustada sügavates geoloogilistes formatsioonides, saavutades seeläbi süsinikdioksiidi eemaldamise (CDR). DAC ja CDR on hinnatud, kuna geoloogilise ladustamisega kaasneb kõrge salvestuse püsivus, kuid piiratud maa- ja veejalajalg. Lisaks sellele on võimalik kasutada püütud süsihappegaasi ka nt. toiduainete töötlemisel või kombineerida vesinikuga sünteetiliste kütuste tootmiseks. Netoheitevabale üleminekul tuleks sünteetiliste kütuste tootmiseks kasutatav CO₂ üha enam püüda säästvatest bioenergiaallikatest või atmosfäärist, et vältida kütuste põletamisel tekkivate heitkoguste tekkimist. Seetõttu on DAC üks alternatiiv selle saavutamiseks. [23]



Joonis 2.6 1Pointfive DAC tehase fotorealistlik pilt [24]

Kaheksateist DAC-i tehast töötavad praegu Euroopas, Ameerika Ühendriikides ja Kanadas. Kõik need tehased on väikesemahulised ja enamik neist püüab süsinikdioksiidi kasutamise eesmärgil, milleks on nt. jookide karboniseerimine, ning ainult kaks tehast salvestavad kinnipüütud CO₂ geoloogilistesse formatsioonidesse eemaldamiseks. Püütud süsihappegaasi müümiseks või ladustamiseks on sõlmitud vaid mõned kaubanduslepingud, ning ülejäänud tehaseid kasutatakse katsetamise ja tutvustamise eesmärgil. Üks neist tehastest on välja toodud joonisel 2.6. [23]

Riigid ja piirkonnad, mis on DAC-i uurimis-, arendus-, tutvustamise ja kasutuselevõtu toetamisel varakult juhtrolli võtnud on Ameerika Ühendriigid, Euroopa Liit, Ühendkuningriik, Kanada ja Jaapan.

Ameerika Ühendriigid on kehtestanud mitmeid poliitikaid ja programme, et toetada DAC teadus- ja arendustegevust, sh. 45Q maksukrediit, mis annab 35 000 USD iga tonni süsinikdioksiidi kohta, mida kasutatakse nafta täiendavaks tootmiseks ja 50 000 USD iga tonni ladustatud CO₂ kohta ning lisaks sellele veel California madala süsinikusaldusega kütusestandardi krediidi eeldusel, et DAC projekt vastab süsinikdioksiidi püüdmise ja sidumise protokolliga nõuetele. Samal ajal hõlmab investeeringute ja töökohtade seadus rahastamist nelja suuremahulise DAC-i sõlmpunkti ning sellega seotud transpordi- ja ladustamisinfrastruktuuri rajamiseks. [23]

Euroopa Komisjon on DAC-i toetanud erinevate teadus ja innovatsiooniprogrammide kaudu, sh. programm Horizon Euroopa ja innovatsioonifond, mis käivitati 2020. aastal

kümnendiks kuni 2030. aastani esialgse eelarvega umbes 11,8 miljardit USD ja laiemalt süsinikdioksiidi eemaldamise kaudu. Oma esimeses teatises säästvate süsinikutsüklite kohta, mis avaldati 2021. aasta detsembris, sooviti, et 2030. aastaks tuleks igal aastal maa- ja tehnoloogiapõhiste lähenemisviiside nagu DAC abil atmosfäärist eemaldada 5 miljonit tonni CO₂. [23]

Täiustatud investeerimiskeskond tõi 2021. aastal teateid mitmetest uutest DAC-projektidest, sh. Storegga Dreamcatcher Project Ühendkuningriikides ja HIF Haru Oni eFuelsi piloottehas Tšiilis. Norras asuv Norsk e-Fuel AS konsortsium kavatseb 2024. aastaks toota ka kuni 3 miljonit liitrit sünteetilisi kütuseid, sh. kasutades DAC-ga püütud süsinikdioksiidi. 2022. aasta juunis teatasid 1PointFive ja Carbon Engineering kavatsusest võtta 2035. aastaks kasutusele 70 suuremahulist DAC-rajatist, millest igalühel on püüdmismaht 1 Mtpa arvestades praeguse poliitika, vabatahtlike ja vastavuse turutingimuste kohaselt, samal ajal kui Climeworks teatas et ehitab nende seni suurima tehase Mammoth püüdmismahuga kuni 36 000 tonni süsinikdioksiidi aastas, mis peaks tööks valmis olema 2024. aastaks. Kokku üheteistkümne DAC-rajatise plaanid on välja arendatud. Kui neist kõik projektid ellu viiakse, ulatuks DAC-i kasutuselevõtt 2030. aastaks ligikaudu 5,5 miljoni tonni CO₂-ni, mis on üle 700 korra rohkem kui tänane püüdmismäär, kuid vähem kui 10% kasutuselevõtu tasemest, mis on vajalik Net Zero Stsenaariumiga õigele teele jõudmiseks. [23]

Praegu kasutatakse õhust CC-ks kahte tehnoloogilist lähenemisviisi: tahket ja vedelat DAC-i. Tahke DAC, mida tuntakse ka S-DAC nime all põhineb tahketel adsorbentidel, mis töötavad ümbritseva madala rõhu ehk vaakumi abil ning keskmisel temperatuuril 80-120 °C. Vedel DAC ehk L-DAC põhineb aluselisel vesilahusel, milleks võib olla nt. kaaliumhüdrosiid, mis vabastab kinnipüütud CO₂ kõrgel temperatuuril 300-900 °C juures. [23]

CC õhust on energiamahukam ja seetõttu ka kulukam, kui CC punkt- või heiteallikast. Seda seetõttu, et atmosfääris olev süsihappegaas on palju väiksema kontsentratsiooniga kui nt. elektrijaama või tsemenditehase suitsugaasides. Seetõttu on DAC-i energiavajadus ja -kulud suuremad võrreldes teiste tehnoloogiate ja rakendustega. [23]

Praeguste DAC-seadmete konfiguratsioonides mõjutab soojuse osakaalu kogu vajalikus energias tehnoloogiate töötemperatuur. Nii S-DAC kui ka L-DAC olid algselt kavandatud töötama soojuse ja elektriga, kuid paindlikud konfiguratsioonid võimaldavad ainult soojust. [23]

Kui S-DAC ja L-DAC innovatsioonialased jõupingutused keskenduvad enamasti uuenduslikele sorbentidele ja lahustitele ning optimeeritud protsessidele ja paigutustele, siis uued DAC-tehnoloogiad hõlmavad elektro-swing adsorptsiooni (ESA) ja membraanipõhist DAC-i mida kutsutakse m-DAC-iks. ESA põhineb Elektrokeemilisel elemendil, kus tahke elektrood adsorbeerib negatiivse laengu korral CO₂ ja vabastab selle positiivse laengu rakendamisel. M-DAC on pakutud teise teostatava võimalusena süsinikdioksiidi õhust kinnipüüdmiseks, kuid see tehnoloogia on algusjärgus ning ees ootab suurte väljakutsete ületamine, sh. vajadus väga suure hulga välisõhu kalli kokkupressimise järele, et CO₂ eraldamise tõhusust tõsta. [23]

Kuigi S-DAC-i saab toita mitmetest vähese süsinikdioksiidiheitega energiaallikatest (nt. soojuspumbad, geotermilised, päikesesoojus- ja biomassil põhinevad kütused), ei võimalda praeguse L-DAC-i konfiguratsiooni praegused kõrged temperatuurivajadused seda taset piisaval paindlikult, ning võiks parimal juhul kasutusel olla madalate süsinikusisaldusega kütustega. Tulevikus võib L-DAC minna üle täielikult elektrilisele tööle. Suuremahulised L-DAC jaamad on loodud maagaasi kasutamiseks soojuse saamiseks ja gaasi põletamisel tekkiva CO₂ kaaspüüdmiseks, ilma vajaduseta täiendavate püüdmiseadmete järgi. See integreerimine vähendab oluliselt L-DAC tehase üldisi heitkoguseid ja võib siiski võimaldada süsiniku eemaldamist. Taastuenergia tulevane võime pakkuda kõrge temperatuuriga soojust võib aga vähendada protsessi heitkoguseid peaaegu nullini, maksimeerides süsiniku eemaldamise potentsiaali ja sellega seotud tuluvooge. Suuremahulise elektrilise kaltsineerimistehnoloogia kaubandusliku kättesaadavuse kiirendamist peetakse esmatähtsaks, et võimaldada L-DAC jaamadel töötada puhtalt taastuenergiaga. [23]

DAC-i suur eelis on selle paindlikkus asukoha määramisel: teoreetiliselt võib DAC-jaam asuda mis tahes kohas kus on vähe süsinikdioksiidiheiteid tekitavat energiat ja CO₂ ladustamise ressursi või CO₂ kasutusvõimalus. Selle paigutuse paindlikkusega võivad esineda siiski teatud piirangud, nt. kliima. Praeguseks on DAC tehased edukalt töötanud mitmesugustes kliimatingimustes Euroopas ja Põhja-Ameerikas, kuid veel on vaja täiendavaid katseid kohtades, mida iseloomustab nt. eriti kuiv või niiske kliima, või saastunud õhk. [23]

Kuigi ülemaailmne tehniline suutlikkus süsinikdioksiidi maa-aluseks ladustamiseks on tohutu, on paljudes piirkondades siiski vaja üksikasjalikku ala iseloomustamist ja hindamist. Töötava CO₂ ladustamiskoha arendamine projekti kontseptsioonist kuni CO₂ süstimiseni võib kesta kolm kuni kümme aastat. See võib osutada DAC-i ja ka üldiselt CCUS-i kasutuselevõtu kitsaskohaks ilma kiirendatud jõupingutusteta CO₂ ladustamiskohtade tuvastamiseks ja arendamiseks.[23]

3.CCU JA CCS POTENTIAALSED RAKENDUSED TULEVIKUS

Käesolevas peatükis käsitletakse CCS-i ja CCU potentsiaalseid rakendusi tulevikus. Lisaks sellele käsitletakse probleeme mis võivad esineda antud tehnoloogiate kasutuselevõttuga.

3.1 CCS väljundid tulevikus

Integreeritud hindamismudelid (IAM) on olnud valitsustevahelise kliimamuutuste paneelihinnangu keskmes, eesmärgiga hoida keskmine globaalne soojenemine sellel sajandil alla 2 °C. CCS on üks väga atraktiivsetest võimalustest IAM-i leevendamise portfellis, kuna sellel esineb mitmeid eeliseid. Esiteks saab CCS-i integreerida olemasolevatesse energiasüsteemidesse, ilma et see nõuaks suuri muudatusi antud süsteemides. Lisaks sellele on CCS elujõuline võimalus suurte heitemahtudega tööstusharude süsinikdioksiidi heite vähendamiseks. CCS-i saab kombineerida ka vähese süsinikdioksiidheitega või süsinikneutraalse bioenergiaga (BECCS), eesmärgiga tekitada negatiivseid heitkoguseid. [7]

Kuigi CCS mängib süsinikehitmete vähendamise stsenaariumides keskset rolli, on kasutuselevõtt vaevu jõudnud Rahvusvahelise Energia Agentuuri (IEA) direktiivides ja tegevuskavade prognoosides näidatud tasemeni. Tuleviku vaatepunktist on CCS prioriteetne valdkond vaid mõnes INDCs (Intended Nationally Determined Contribution), mida Pariisi kliimaläbirääkimistel osalenud riigid lubasid. IEA hiljutises CCS-i aruandes anti ülevaade viimase 20 aasta edusammudest ning jõuti järeldusele, et praeguste edusammude määr ei vasta nõutavale, et saavutada kliimaeesmärgid. Seda rõhutavad ka asjaolud, et Pariisi lubadustel põhinevad riiklikud ja ülemaailmsed stsenaariumid näitavad CCS-i vähest kasutuselevõttu, ning CCS-i osakaal elektritootmises USA, Hiina, Jaapani ja Euroopa liidu puhul 2030. aastal on vaid 3%. Seda süvendab veelgi vastuseis CCS-i vastu, mis on ajendatud tajutavast ebakindlusest selle ohutuse osas ja kartusest, et see pikendab sõltuvust fossiilkütustes ja takistab taastuvenergia suuremat kasutamist. [7]

Olemasolevad uuringud näitavad, et CCS mängib olulist rolli kõigis uuritud mudelite leevendusvõimalustes. Kuigi püütud süsinikdioksiidi vahemik varieerus mudelite lõikes suuresti, olles mõnel juhul kumulatiivselt aastani 2100 kuni 3050 Gt CO₂. Lisaks eelmainitule ei püüdnud ükski mudel alla 600 Gt CO₂. Kuigi ei ole võimalik üksikute mudelite eelduste järgi hõlpsasti seletada mudelite suurt ulatust, on tõsiasi, et mudelid

püüavad kuni 2100. aastani pidevalt kokku vähemalt 600 Gt CO₂-te, mis oleks rohkem kui pool nõutavast heitmete vähenemise kavast. On leitud ka, et CCS-i roll aja jooksul ei vähene, ning CCS-i osakaal primaarenergias on sajandi teisel poolel enamasti suurem võrreldes sajandi esimese poolega. Ettenähtud püüdmismäärade vahemikud 5-23 Gt CO₂ aastas 2050. aastal ja 8-50 Gt CO₂ aastas 2100. aastal. Antud tulemused rõhutavad CCS-i tähtsust IAM-ides, mille eesmärk on saavutada ambitsioonikad kliimaeesmärgid. Selle tähtsust suurendavad veelgi pessimistlikud oletused taastuvenergia tehnoloogilise arengu kohta antud kliimaeesmärgi jaoks, mis viitab vähesele paindlikkusele alternatiivide kuluoptimaalsel kasutuselevõtul. [7]

CCS-i väärtus tuleneb asjaolust, et see on ainus tehnoloogia, mis suudab samaaegselt täita süsinikdioksiidi heiteid tekitavates majandussektorites, ilma et see kahjustaks nende kulutõhusat teenusepakkumist. Nende sektorite hulka kuuluvad elektritootmine, tööstus, transport ja küte. Paljude tööstuslike rakenduste jaoks ei ole praegu CCS-ile alternatiivi tootmisprotsessidega kaasnevate CO₂ heitmete vähendamiseks. Transpordi, sh. maanteetranspordi, süsinikdioksiidheite vähendamine toob paratamatult kaasa elektrisõidukite arvu suurenemise, millest tuleneva elektrinõudluse saab osaliselt katta CCS-i toega elektrijaamadest. CCS koos vesiniku tootmisega võib pakkuda odavat teed kütte süsinikdioksiidheite vähendamiseks ning toetada vesinikumajanduse muude aspektide, sh. kütuseelementide kasutamise arendamist. CCS on ka ainus tehnoloogia, mis suudab eemaldada atmosfäärist tööstusliku koguse CO₂, kui seda kombineeritakse energia tootmisega biomassi säästval põletamisel (nn. BECCS), luues süsinikdioksiidi eelarves ruumi raskemini dekarboniseeritavatele sektoritele, nagu lennundus. [7]

CCS-i, nagu kõigi vähese CO₂-heittega tehnoloogiate, arendamine toob kaasa mõningaid lisakulusid, kuid CCSA ja TUC1150 koostööga koostatud aruandes hinnati, et kogulisandväärtus saab kasu CCS-ist. Lisaks sellele kaasneb antud tehnoloogia rakendamisel uute töökohtade tekkimine. Lühiajalises perspektiivis CCS-i kulused elektritootmisel võrreldakse jätkuvalt madala süsinikusisaldusega elektritootmise alternatiivsete vormidega, kuigi nende alternatiividega ja nende vahelduva väljundi tõttu kaasnevad pikemas perspektiivis kogu süsteemi hõlmavad kõrgemad kulud. Selle väljakutsega toimetulekuks peavad kõik uued lähenemisviisid CCS-i turule toomisel aitama lühiajaliselt vähendada esimesena tegutseva projekti kulusid. [7]

CCS-i rahastamine eeldab prognoositava ja turvalise tuluvoo olemasolu, et katta CCS-i kulud ja võimaldada arendajal täita kõik oma rahalised vajadused. See nõuab alati turuväliseid tuluallikaid ja/või soodsaid maksusoodustusi CCS-i abil vähese süsinikuheittega energia tootmiseks ja süsinikdioksiidi pikaajaliseks ladustamiseks. Ühendkuningriigi näitel on hetkel elektritootmine ainuke sektor, kus kehtivad

olemasolevad regulatsioonid ja finantsraamistikud, et toetada vähese CO₂ heitega tehnoloogiat turuhinna toetusmehhanismide kaudu, mis loodi elektrituru reformi kaudu ja on sätestatud 2013. aasta energiaseaduses. Sarnaste õigusaktide vastuvõtmise vajaduse minimaliseerimine on aga oluline tegur CCS-i kasutuselevõtu hõlpsamaks tegemisel. [7]

Pärast seda kui Pariisi kliimakokkuleppes kinnitati ülemaailmne eesmärk võidelda kliimamuutuse vastu, peaks CCS-i kiire arendus olema ülioluline. Siiski on CCS-i tehnoloogiate väljavaated problemaatilised, mis on tingitud nii fossiilkütuste süsinikdioksiidi heitkoguse vähendamise poliitmajanduslikust väljakutsest, kui ka tehnoloogilistest või majanduslikest probleemidest. Vaatamata sellele on eksitav kirjeldada probleeme kui peamiselt kulu- või majanduslikke probleeme, kuna mõned vähese süsinikheitega tehnoloogiad, saavad suuremahulisi toetusi, mis oleks vajalikud CCS-i jaoks. Teised tehnoloogiad, nagu tuumaenergia, on eksisteerinud juba aastakümneid, kuid mõned valitsused annavad endiselt suuri toetuseid. Kahtlemata on olulisi tehnilisi, majanduslikke ja kaubanduslikke väljakutseid, mis aitavad CCS-i aeglast kasutuselevõttu, kuid poliitökonoomia, mis näis esialgu paljulubav, on osutunud oodatust problemaatilisemaks. [7]

Mõned ressursirikkad riigid, nagu Kanada, USA, Austraalia ja Norra, on CCS-i kasutuselevõttuga edasi liikunud peaaegu sõltumatult nende pühendumuse tasemele seoses kliimamuutusega. 2007-2008. aastal esinenud majanduskriis ja sellele järgnenud ergutuskulutused tõid kaasa CCS-i kaasamise, mis võimaldas vaatamata arvukatele tagasilöökidele alates 2014. aastast tekkida poolekümnel suurel integreeritud rajatisel. Ometi kahaneb uute projektide portfell isegi kaugelearenenud planeerimisetapis. Arvestades sellega seotud pikki ajavahemikke ja märkimisväärset võimalust, et valitsused või ettevõtted võivad kohustustest loobuda, on arendusi vähe. Kuid vaatamata sellele on tärkavate projektidega kaasnev areng, ning ülemaailmne teadus- ja arendustegevus näitab kasvatendentsi. Seetõttu toimub tehnoloogiline areng, kuid kitsaskohaks võib esineda poliitökonoomia dünaamika muutuse puudumine. [7]

Lõppkokkuvõtteks näitab CCS seda, kui tõsiselt võetakse valitsuste poolt vastu sügava süsinikheitmete vähendamise väljakutse, kuid kui tehakse tõsiseid jõupingutusi ambitsioonikate kliimaeesmärkide saavutamiseks, võib sellele järgneda CCS-i laiaulatuslik kasutuselevõtt. [7]

3.2 CCU väljundid tulevikus

Süsinikdioksiidi sidumine ei võimalda mitte ainult CO₂ ladustamist, vaid ka püütud süsinikdioksiidi kasutamist ja keemilist muundamist. Sellest tulenev süsinikdioksiidi taaskasutamise (CDR) või CO₂ muundamise ja kasutamise kontseptsioon on viimastel aastatel pälvinud märkimisväärset tähelepanu. Süsihappegaasil on ajalooliselt olnud mitmesuguseid rakendusi, alates gaseeritud jookidest kuni karbamiidi tootmiseni. Viimase aja huvi CCU-s on ajendatud kliimamuutuste leevendamistest kui ühiskondlikust probleemist aga ka hiljutisest läbimurdest CO₂ katalüüsis, mis võimaldab selle aktiveerimist tehnoloogiliseks juhiks. Juba töötavad mitmed tehased, mis näitavad uusi süsinikdioksiidi taaskasutamise viise. [7]

CCU ulatus sõltub põhiliselt CO₂ põhiste kütuste laiaulatuslikust kasutulevõtust, kuna CO₂ taaskasutamise potentsiaal kütustes on umbes 12-14 korda suurem kui kemikaalide puhul. On näidatud, et CO₂ põhised kütused suudavad vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguste hulka oma elutsükli jooksul. Kuigi mitmed CO₂-põhise metaani ja metanooli katsetehased töötavad, ning Islandil asuv George Olah'i taastuvmetanoolitehas toodab 4000 tonni aastas, nõuab nende kütuste kasutuselevõtt veel mitmete probleemide ja väljakutsete ületamist. [7]

Potentsiaalsete kütuste nagu metaani ja metanooli tootmine Fischer-Tropschi sünteesi teel nõuab endiselt suuri edusamme katalüüsis ja tõhusate protsessid kavandamises. Süsinikdioksiidi põhine metaneerimise tagajärjel tõuseb eeldatavasti maagaasihind 2,4 korda, kuid halvimad hinnangud ennustavad suuremat tõusu. Metanooli puhul tõstab CO₂-põhine tootmine müügihinda hinnanguliselt 1,8 korda. Arvestades eelmainitud, tuleb tegeleda kulutõhususega kõikides aspektides, millest kõige olulisem vesinikuallikaga seoses, kuid ka läheaineks kasutatava süsinikdioksiidiga ja investeerimiskuludega seoses. On väidetud, et CO₂-põhised kütused võivad olla oluliseks lüliks energiasektoriga, pakkudes keemilise energia salvestamise võimekust ja sellega kaasnevat paindlikkust elektrivõrgule. Seega võib CO₂-põhiste kütuste tootmine pakkuda võimalusi, kuid nõuab uudsete tehnoloogiate arendamist. Sel juhul võib vesiniku ladustamine muutuda kulu- ja disainiteguriks. Kuid nt. metaneerimisel toimuv tugev eksotermiline reaktsioon annab võimalusi soojuse integreerimiseks. Raskendav asjaolu on see et metanooli tootmiseks vajaliku metanooli ja vee segu jaoks on vaja väga selektiivseid ja pikaajaliselt stabiilseid katalüsaatoreid ning tõhusamaid eraldustehnoloogiaid. [7]

Süsinikdioksiidi integreerimine muundamisega võib suurendada tõhusust, mistõttu on oluline välja töötada sobivad reaktsioonisüsteemid, mis võimaldavad CO₂ muundamist otse amiinide vesilahustesse, mida kasutatakse CC jaoks. Suurem tõhusus ei ole aga

garanteeritud sest lahusti tuleb eraldada lõpptootest süsinikdioksiidi asemel, mis võib osutada keerulisemaks. Teadustööde tasandil on elektrokatalüütiliste protsesside vastu üha suurem huvi, kuna need võimaldavad taastuenergia sihipärast integreerimist muundamisetappidesse, kuid isegi tulevaste elektrokatalüütiliste protsesside palju täiustamise korral jääb taastuenergia hind eeldatavasti peamiseks takistuseks rakendamisel. [7]

Süsinikdioksiidi saab ka uuesti kasutada ladustades samal ajal süsinik oksüdatsiooniaset. Kasutades sellist lahendust, on võimalik toota uuread, polümeere ja anorgaanilise karbonaate. Tahkete anorgaaniliste karbonaatide tootmine CO₂ teel tundub eriti paljutootav sihtmärk CO₂ põhiste toodete turule tulekul. Mineraalse karboniseerimise teel on võimalik luua sobivaid silikaate muundades ehitusmaterjale, ning antud protsessiga on võimalik ka jäätmeid muundada väärtuslikeks ehitusmaterjalideks. Mineraalide karboniseerimisega seotud suurimateks väljakutseteks on energiakasutus, aeglane reaktsioon, kõrge hind ja materjalide käitlemine. Samas suurendab süsinikdioksiidi ladustamine tahketes karbonaatides eeldatavasti üldsuse heakskiitu, kuna see ladustamisviis on kontrollitav ja püsiv. [7]

CCU-l on kõrge potentsiaal mängida rolli ka taastuva süsiniku lähteainena keemiatööstuses. Kuigi keemiatööstuse panus fossiilkütuste põletamisel tekkivatesse kasvuhoonegaaside heitkogustesse on maailmas vaid 4%, siis võrreldes teiste tööstusharudega on heitkogused suured. Seega on keemiatööstuse pärast energiasektorit kindlasti üks järgmiseid kasvuhoonegaaside vähendamise väljunditest. Keemiatööstus võiks CCU abil vältida mitme miljoni tonni jagu CO₂-ga kaasnevaid heitmeid, vähendades samal ajal sõltuvust fossiilkütustest kui süsinikuallikast keemiatööstuses. Fossiilse tootmise asendamine süsinikdioksiidipõhise tootmisega ei mõjuta üldist kasvuhoonegaaside heitkogust välja arvatud juhul, kui ülemaailmne fossiilkütuste nõudlus tegelikult väheneb. Nende vastastikuste sõltuvuste tabamiseks ja tulevaste pöördepunktide tuvastamiseks on vaja kogu süsteemi hõlmavat olelusringi hindamist, mistõttu uuritakse praegu paljusid võimalikke keemiatoteid mida süsinikdioksiidist toota. Lisaks sellele oodatakse esimesi rakendusi protsessidele, kus CCU parandab väljakujunenud toodete tootmist. [7]

Keemiatööstusest tuleneb võimalus ka sipelghappe tootmisest, mida saab sünteesida otse CO₂-st ja H₂-st, samas kui tavapärasel tootmisel on vaja mitut protsessietappi. Seetõttu töötavad mitmed ettevõtted süsinikdioksiidi põhise sipelghappe tootmise kallal. Hetkeseisuga on kulud hinnanguliselt 2,5 korda kõrgemad kui fossiilsete lähteainetega tootmisel. Lisaks sellele võimaldab CCU seenevastase aine butenafiini tootmisel minna

üle odavamatele reagentidele, vältida potentsiaalselt ohtlikke reagente ja jäätmeid ning vähendada protsessietappide arvu ühele. [7]

Orgaanilised karbonaadid pakuvad laia valikut potentsiaalseid tooteid alates madala molekulmassiga toodetest, kuni polümeerideni. Lisaks praeguste toodete tõhusamale tootmisele võivad täiustatud meetodid CO₂ muundamiseks luua ka uudseid tooteid mis võimaldavad erinevaid eeliseid. Arendustöö toetamiseks projekteerimise varajases staadiumis tuleb välja töötada ennustavad mudelid, mis võimaldaksid hinnata uudsete radade ja toodete potentsiaali. Mudelipõhiste teadmiste kaasamine keemilise projekteerimise protsessi kiirendaks uudsete CCU-tehnoloogiate väljatöötamist. Tulevaste toodete olulusringi hindamine võib aidata suunata uurimisvajadusi ja seada tulemuslikkuse eesmärgid. Oluline on see, et LCA ei piirduks ainult mõjuga kliimamuutustele. Selle asemel tuleks kaaluda mitmesuguseid keskkonnamõjusid et vältida probleemide nihkumist muudele mõjukategooriatele, nagu ressursside ammendumine. [7]

Suurt rolli vähese süsinikdioksiidiheitega kütustele üleminekul mängib poliitika. Kuna paljud viisid selleks ei ole veel majanduslikult elujõulised, oleks vaja stimuleerida vähese CO₂ heitega kütuste arendust ja kasutust. Süsinikdioksiidi maksusoodustused või CO₂ sertifikaadid võiks olla seotud süsinikdioksiidi taaskasutamise seoses kliimamuutuste leevendamise vahendina. Selleks et anda oma potentsiaalne osa kliimamuutuste leevendamisse, peab süsinikdioksiidi taaskasutamine üle elama perioodi, kus ootused võivad olla ülepaisutatud. Seda põhjusel, et CCU tehnoloogiate eeliste ja puuduste usaldusväärne ja erapooletu hindamine peaks aitama tuvastada tootlikkuse platoo. [7]

3.3 CCU ja CCS potentsiaalsed mahud

Varasemate aastate jooksul kalduti enamikke CCS projekte välja töötama selliselt, et eelistati CC tehase ühendamist oma spetsiaalse transpordi- ja ladustamissüsteemiga, mis tähendas seda, et nende süsteemide püüdmismahtu kirjeldades käsitleti neid kui ühtset integreeritud süsteemi. Tänapäeval on CCS-i võrgustikud muutumas valdavaks CCS-i kasutuselevõtmise viisiks. CCS võrgustikud hõlmavad endas jagatud transpordi ja ladustamisinfrastruktuuri kasutamist. Mõned CCS arendused, nagu laevandusprojektid, torustikud või uued hoidlad, ei hõlma üldse CC-d ja kasutavad kolmandate isikute poolt püütud süsinikdioksiidi. [9]

Projektide arv, arvestades rajatiste arvu ja püüdmismahtu on nüüd rekordiliselt kõrge, ning alates 2017. aastast on püüdmismaht kasvanud liitmääraga üle 34 protsendi aastas. Lisaks sellele on CCS-i püüdmismaht kasvanud viimase 12 kuu jooksul oluliselt,

mis hõlmab endast ka edasijõudnud projektide püüdmismahu suurenemist ligi kahekordselt 2021. aastal olevast 49,4 miljonilt tonnilt aastas 97,6 miljoni tonnini 2022. aastal. Mõned suurimatest panustajatest viimastel aastatel on välja toodud tabelites 3.1 ja 3.2. [9]

Rajatiste arvu kasvu järgi on Ameerika Ühendriigid endiselt maailmas juhtpositsioonil, alustades alates 2021. aastast 34 uue projektiga. Teised juhtivad riigid on Kanada (19 uue projektiga), Ühendkuningriik (13 uue projektiga), Norra (8 uue projektiga) ning Austraalia, Holland ja Island (6 uue projektiga). [9]

Tabel 3.1 Olulised panustajad varajases arengufaasis aastatel 2021-2022 [9]

Projekt	Riik	Valdkond	Püüdmismaht (Mtpa)
Illinois Clean Fuels	Ameerika Ühendriigid	Keemiatööstus	8,1
Drax BECCS	Ühendkuningriik	Energiatööstus	8
Medway HUB jõujaamad	Ühendkuningriik	Energiatööstus	7,6
Net Zero Teesside- BP H2Teesside	Ühendkuningriik	Vesinikutootmine	2
Cyclus elektritootmine	Ameerika Ühendriigid	Bioenergeetika	2
Kagu-Austraalia Carbon Capture Hub	Austraalia	Maagaasi töötlemine	2

Tabel 3.2 Märkimisväärsed panustajad edasijõudnud arenduste kasvule aastatel 2021-2022 [9]

Projekt	Riik	Valdkond	Püüdmismaht (Mtpa)
Bayu-Undan CCS	Timor-Leste	Maagaasi töötlemine	10
Deer Park Energiakeskuse CCS	Ameerika Ühendriigid	Energiatööstus	5
Federated Co-operatives Ltd.	Kanada	Etanooli tootmine	3
Huaneng Longdong energiabaasi CCS	Hiina	Energiatööstus	1,5
Federated Co-operatives Ltd.	Kanada	Naftatööstus	1

3.3.1 Ida-Aasia potentsiaalne CCU ja CCS maht

CCS Aasia ja Vaikse ookeani piirkonnas on osana laiemast kliimamuutuse leevendamisest jätkuvalt kontrast olulise arengu ja mahajäänud kasutuselevõtu vahel. Vaatamata sellele on hiljuti tehtud märkimisväärsed edusamme mida kirjeldatakse järgnevalt:

Malaisias on Kasawari Ph2 Fieldiga seotud projekt osa strategiast, mille eesmärk on suuri koguseid CO₂ gaasivarusid hakata kaubanduslikult kasutama. Projekti raames tahetakse alates 2025. aastast püüda umbes 4,5 miljonit tonni süsinikdioksiidi ning transportida see torustiku kaudu 135 km kaugusele M1 väljal asuvasse ammendatud veehoidlasse. Teine Malaisias tekkiv projekt on Lang Lebah CCS projekt, mis on Tai riikliku naftaoperaatori PTTEP suurim avastus. Antud projekti eesmärk on rakendada naftareservuaaridele CCS, kuna need sisaldavad hinnanguliselt 17% CO₂. [25]

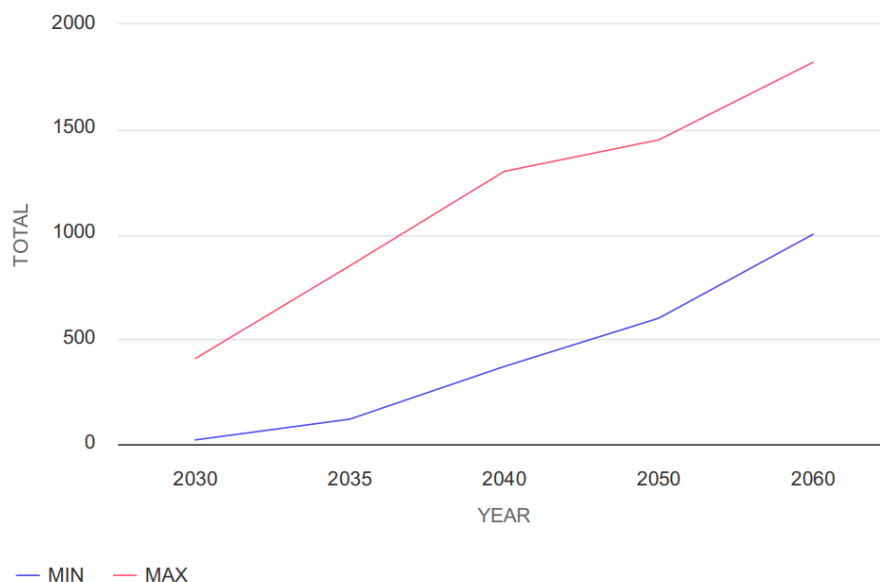
Indoneesias teatas 2021. aasta lõpus BP, et Indoneesia nafta- ja gaasiregulaator SKK Migas kiitis heaks Tangguh LNG projekti laiendamise ja Vorwata CCUS projekti arendamise. Projekti eesmärgiks on alates 2026. aastast suunata gaasi taaskasutamiseks ja ladustamiseks kuni 4 miljoni tonni jagu aastas. [25]

Repsol plaanib oma esimest süstimist Sakekamangi CCS-i projekti 2027. aastaks, mis hinnanguliselt suudab püsivalt ladustada 2,5 Mtpa. [25]

2022. aasta maikuu teatas Pertamina, et teeb koostööd Air Liquide Indoneesiaga, et arendada CCUS-i tehnoloogiat Balikpapani rafineerimistehase töötlemisüksuses, kus CCU ja CCS rakendatakse Kutai basseinides. [25]

Austraalias teatas 2021. aasta novembris Santos lõplikult investeerimisotsusest oma Moomba CCS projekti kohta, mis alustab tegevust 2024. aastal ja püüab 1,7 miljoni tonni jagu süsinikdioksiidi aastas. Santos alustas märtsis kavandatava Bayu-Undani süsinikdioksiidi püüdmise ja ladustamise projekti FEED-faasi, mis asub Ida-Timorist eemal avamerel ja suudab ladustada kuni 10 miljonit tonni CO₂, toimides piirkondliku ladustamiskeskusena. [25]

Hiinas läks kasutusele esimene integreeritud 1 Mtpa CCUS-i projekt, mille on välja töötanud SINOPEC, läks täiemahuliselt tööle 2022. aasta augusti lõpus. Quilu naftakeemiatehasest püütud süsinikdioksiid transporditakse Shengli naftaväljale EOR eesmärgil. Huaneng on alustanud Ordose jõgikonnas 1,5 Mtpa kivisöeenergia CCUS projekti ehitamist, mida peetakse laialdaselt maailma suurimaks kivisöeenergia CCUS projektiks. CNPC kavatab alates 2025. aastast alustada kuni 5 miljoni tonni süsinikdioksiidi ladustamisega. CNOOC alustab Hiina esimest CO₂ avamerehoidlat Pärlijõe suudmes. Hiina potentsiaalne CCUS kasutuselevõtu maht on välja toodud joonisel 3.1. [25]



Joonis 3.1 Potentsiaalne CCUS kasutuselevõtt Hiinas skaalal miljonites tonnides aastas [25]

3.3.2 Euroopa potentsiaalne CCU ja CCS maht

Mitmed Euroopa riigid, sh. Bulgaaria, Poola ja Soome, sisenevad CCS-i turule esimest korda. EL Innovatsioonifondi toetusprogrammi eesmärk on selliste projektide võimaldamine, ning mõned näited sellistest projektidest on järgnevad:

Holcim Deutschlandi projekt Carbon2Business moderniseerib oma Saksamaa tsemenditehase CCS-iga, et püüda üle 1 Mtpa CO₂. [25]

Täismahus ANRAV-i projekt püüab Bulgaarias asuvatest tsemenditehastest ja ladustab selle Musta mere avamerehoidlas. [25]

Carbfixi Coda Terminal arendab Islandil mineraalide ladustamise sõlmpunkti, mis suudab ladustada 880 miljonit tonni CO₂. [25]

Perstorpi Project Air arendab Rootsis täismahus fossiilivaba metanoolitehase. Lisaks sellele hakatakse Rootsis Shelli projekti HySkies raames tootma säästvat lennukikütust CCUS-i abil. [25]

Poolas püütakse ja ladustatakse Larfarge Cementi Kujawy tsemenditootmisest pärit süsinikdioksiid GO4ECOPLANET projekti raames. [25]

Kairos-at-C vähendab heitmete hulka 14,2 miljoni tonni jagu läbi piiriülese CCS väärtusahela Belgias, Hollandis ja Norras, mis hõlmab CC-d vesiniku- ja keemiatehastest. [25]

K6 programm Prantsusmaal püüab oma tsemenditehasest 8,1 miljonit tonni süsinikdioksiidi mida seejärel ladustatakse Põhjameres. [25]

SHARC-i jõupingutused Soomes vähendavad roheline ja sinise vesiniku tootmise kaudu diisli rafineerimistehase süsinikdioksiidi heitkoguseid. [25]

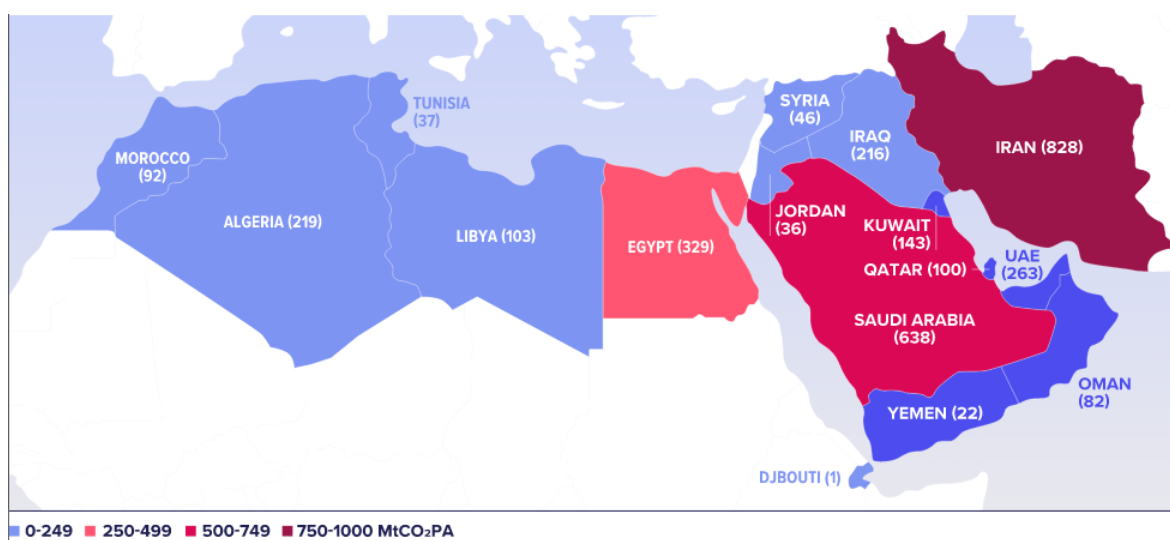
BECCS@STHLM eesmärk on CCS-i abil 10 aasta jooksul ladustada 7,8 miljonit tonni süsinikdioksiidi Exergi biomassitehasest, mis asub Stockholmis. [25]

3.3.3 Lähis-Ida ja Põhja-Aafrika potentsiaalne CCU ja CCS maht

Lähis-Ida ja Põhja-Aafrika piirkonda peetakse üheks suurima süsinikuintensiivsusega piirkonnaks, kusjuures riigid nagu Kuveit, Araabia Ühendemiraadid (AÜE), Bahrein ja Saudi Araabia on maailmas suurima süsinikuheitega inimese kohta skaalal esikümnes. Joonisel 3.2 on välja toodud Lähis-Ida ja Põhja-Aafrika piirkonna kasvuhooonegaaside emissioonide hulk. Suured kasvuhooonegaaside hulgad piirkonnas tulenevad suurtest nafta- ja gaasivarudest piirkonnas ning seetõttu on sellel piirkonnal olnud

energiageopoliitikas võtmeroll. Selle positsiooni säilitamiseks peab piirkonnas investeerima süsinikheitmete vähendamisse ja puhta energia tehnoloogiatesse. [25]

CCS pakub piirkonnast võimalust süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamiseks. Kolm töötavat CCS rajatist asuvad AÜE-s, Saudi Araabias ja Kataris, mis moodustavad umbes 10% igal aastal püütud ülemaailmsest süsinikdioksiidist. Lisaks on piirkonnas ulatuslikud kogemused CCS vallas, kuna Alžeeria keskosas asuv In Salah CCS projekt on maailmas teedrajav CCS maismaaprojekt, kust on saadud hulgaliselt kogemusi, millel on suur relevantsus CCS projektide jaoks kogu maailmas. [25]



Joonis 3.2 Lähis-Ida ja Põhja-Aafrika kasvuhoonegaaside emissioonide hulk [25]

Kolme eelmainitud CCS rajatise kombineeritud püüdmismaht on ligikaudu 3,7 miljonit tonni CO₂ Mtpa ning see jaguneb järgmiselt:

Qatar Gas püüab aastas 2.2 Mtpa süsinikdioksiidi Ras Laffani gaasiveeldamistehasest, ning Saudi Aramco ladustab oma Hawiyah Naturals Gas Liquids tehases 0,8 miljonit tonni süsinikdioksiidi. Lisaks sellele kasutatakse süsinikdioksiidi EOR elujõulisuse demonstreerimiseks Utmaniyah naftaväljal. [25]

Lisaks sellele on kaks piirkondliku CCU rajatist:

Saudi Basic Industries Corporation püüab oma Jubaili etüleenitehases 0,5 Mtpa süsinikdioksiidi, et seda kasutada metanooli ja karbamiidi tootmiseks. Qatar Fuel Additive Company püüab oma metanooli rafineerimistehases 0,2 Mtpa süsinikdioksiidi. [25]

4. JÄRELDUSED

Käesolevas peatükis tuuakse järeltusi eelmainitud tehnoloogiate potentsiaalsete rakenduste kohta tulevikus. Lisaks sellele käsitletakse antud tehnoloogia rakendamise mastaapi ja probleeme mis võivad esineda antud tehnoloogiate rakendamisel ning nende probleemide võimalikke lahendusi.

Kliimamuutuseks defineeritakse kui muutust tavapära kliimaoludes, mille põhjuseks on peamiselt kasvuhoonegaaside heitkogused, mis põhjustavad olukorra kus soojus ei saa hajuda maakera atmosfäärist välja, ning see on olnud globaalse soojenemise peamine liikumapaneev jõud. Selliste heitmete peamised allikad on looduslikud süsteemid ja inimtegevus, millest looduslike süsteemide hulka kuuluvad maavärinad, ookeanid, igikelts, vulkaanid, jpm. samas kui inimtegevus on peamiselt seotud energiatootmise, tööstustegevuse ning metsanduse, maakasutuse ja maakasutuse muutustega. Kuna maakera loodusliku süsteemi võib pidada isetasakaalutavaks, siis saab järeldada, et inimtekkelised heitmed lisavad maasüsteemile lisarõhku. [26]

Pariisis 12. detsembril 2015 aset leidnud ÜRO kliimamuutuste konverentsi (COP21) kohaselt 196 osapoole poolt vastu võetud Pariisi kokkulepe eesmärk on piirata kliimamuutuste teket. Täpsemalt on antud lepingu üldeesmärk hoida „maailma keskmise temperatuuri tõus tunduvalt alla 2°C võrreldes industriaalajastu eelse tasemega“ ja teha jõupingutusi et „piirata temperatuuri tõus 1,5°C võrra võrreldes industriaalajastu eelse tasemega“. Viimastel aastatel on aga rõhutatud vajadust piirata globaalne soojenemine selle sajandi lõpuks 1,5°C-ni. Selle põhjuseks on asjaolu, et ÜRO valitsuste vaheline kliimamuutuste paneel näitab, et eelmainitud künnise ületamine võib vallandada palju tõsisemad kliimamuutuste mõjud. Globaalse soojenemise piiramiseks antud eesmärgini peavad kasvuhoonegaaside heitkogused saavutama haripunkti hiljemalt enne 2025. aastat, ning vähenema 2030. aastaks 43% võrra. [27]

Eelnevast saame järeldada, et kliimamuutuse peatamine on tõsine ülesanne, ning antud probleemi lahendamiseks tuleb tõsiselt tegeleda kõikidel osapooltel. Mõned potentsiaalsetest lahendustest võivad olla CCU, CCS ja CCUS. Erinevalt teistest võimalikest lahendustest, nt. tuumaenergiast ja taastuvenergiast, ei ole käesolevate tehnoloogiate töhustamiseks, uurimiseks ja laialdaselt rakendamiseks olnud samasugust aega ja rahastust, kuid varajased uuringud näitavad, et võttes kasutusele antud tehnoloogiad on võimalik olla suureks faktoriks kliimamuutuse peatamisel.

Põhilisteks takistusteks antud tehnoloogiate rakendamisel võib olla rahastus ja avaliku huvi puudumine.

Rahastuse probleemi võimalikeks lahendusteks on esmalt valitsuste poolne abi. Lisaks sellele, et toetada teisi rakendusi, mis on praeguses hetkes juba arengufaasist väljas ning tuumaenergia puhul juba ligi kuus kümnendit kasutuses olnud, peaks rõhku pöörama ka uute tehnoloogiate teadus- ja arendustöö rahastamisele. Kuna antud tehnoloogiate väljaehitamine praegusel hetkel on kallim võrreldes eelmainitud alternatiividega, valitakse tihtilugu teised lahendused, kuid kliimamuutust ei ole võimalik piirata ainult ühel viisil. Lahenduse kliimamuutuse takistamiseks peab valima sõltuvalt asukoha, selle omaduste, tavapärase kliima ja muude parameetrite järgi.

Üks potentsiaalne lahendus oleks ergutada tööstusettevõtteid võtma kasutusele antud tehnoloogiat, pakkudes soodsamat maksustamist. Antud tehnoloogia esmane rakendamine võib tunduda finantsiliselt kulukas, kuid andes tööstus- ja energiaettevõtetele tasuvaid ja ahvatlevaid hüvesid oma heitmete vähendamisega seoses võib see olla vajalik käesoleva tehnoloogia laialdaseks rakendamiseks. Lisaks sellele on üks potentsiaalne ja vajalik lahendus laialdane ettevõtete, valitsuste ja teadusrühmade vaheline koostöö. Selline koostöö võimaldaks arendada tehnoloogiat ja leida potentsiaalset võimalust kulude vähendamiseks.

Avaliku huvi puudumise probleemi lahendamiseks on samuti mõningaid valikuid. Esmalt üks potentsiaalsetest lahendustest, mis seostub rahastamisega osaliselt, on see, et juba mõningate suuremate tööstus- ja energeetikaettevõtete CCS ja CCU tehnoloogiate kasutuselevõtt võib anda vajaliku tõuke selleks, et käesolevad lahendused võetaks laialdasemalt kasutusele. Lisaks sellele oleks vaja teadvustada inimesi käesolevate tehnoloogiatega seoses. Tõstes avalikkuse teadmisi käesolevate tehnoloogiate kohta, sarnaselt nagu seda on tehtud tuumaenergiaga ja taastuvenergiaga, on avaliku huvi tõus antud tehnoloogiate suhtes paratamatu.

Antud probleemidele lahendused leides ja ületades takistused mis võivad esineda nende tehnoloogiate rakendamisega võib CCU ja CCS tulevikus potentsiaalselt olla laialdaselt kasutusel üle terve maailma. Esmalt on üks võimalik kasutus eelmainitud tehnoloogiatele igasugustes tööstuslinnakutes üle terve maailma, kuid oluliseks probleemiks võib osutada süsinikdioksiidi ladustamise võimalused. Antud rakendust on planeeritud ka Drax BECCS projektiga Ühendkuningriigis. Lisaks sellele on planeeritud käesolevaid tehnoloogiaid kasutusele võtta mujal Euroopas, nt. Norras Longship projektiga ja Hollandis North CCU-Hub projektiga. Mujal maailmas oleks võimalik peale Jaapanis asuva Tomakomai projekti leida projekt kasutust laialdaselt Indias, Hiinas ja mujal asuvates tööstusaladel. Lisaks eelmainitud piirkondadele on suur potentsiaal läbilöögiks Põhja-Ameerikas, kus on samuti kasutusel mitmeid CCS ja CCU tehnoloogiaid rakendavad tööstus- ja energiasektori ettevõtted.

Eesti näitel on käesolevate tehnoloogiate rakendamine raskem võrreldes eelmainitud piirkondadega, kuid mitte võimatu. Seda seetõttu, et Eestis puuduvad süsinikdioksiidi ladustamise võimalused, ning kasutamiseks puudub infrastruktuur. Hetkeseisuga kõige tõenäolisem lahendus, kuidas antud tehnoloogiat rakendada, oleks Norrasse seda laevadega tarnida. Antud lahendust soodustab asjaolu, et Norral on suur ladustamise potentsiaal ja tegeletakse CO₂ ladustamise infrastruktuuri arendamisega, mis võimaldaks laevadega transportides süsinikdioksiidi ladustamist, mis oleks samuti ka sobivaim viis süsinikdioksiidi transportimiseks Eestist Norra. Käesolevat lahendust oleks võimalik rakendada ka teistel Euroopa riikidel, ning teoreetiliselt võiks ka mujal maailmas suure ladustamispotentsiaaliga riigid ja piirkonnad võimaldada teistest riikidest süsinikdioksiidi transporti. Lisaks sellele võiks võimaldada selle tehnoloogia kasutuselevõtt võimaldada põlevkivi suuremat kasutust, mis oleks praeguse energiakriisi mõistes leevendav meede, kuni on võimalik leida potentsiaalne alternatiiv põlevkivile.

CCU laialdasem rakendamine nõuab antud tehnoloogia arendamist. Potentsiaalne turg on suur, kuna võimalusi süsinikdioksiidi tootmisel lähteainena kasutada on palju, kuid hetkeseisuga on antud tehnoloogiaga toodetud produktide hind kõrge. Seevastu teadus- ja arendustöö käigus saadavad teadmised ja kasutustehnoloogiate arendamine ja võimaluste laienemine antud tegevuste abil, võivad tõsta käesoleva tehnoloogia kasumipotentsiaali, mis on hetkel takistuseks laialdasele CCU kasutuselevõtule. Võtmeülesanne antud tehnoloogia tähenduses on teadus- ja arendustöö jätkamine, et oleks võimalik lahendada hetkeseisuga CCU laialdast kasutust piiravad tegurid, ning tõsta selle atraktiivsust, võimaldades süsinikdioksiidi kasutamist rohkemate toodete lähteainena, nt. sünteetilisestel kütustel, ning vähendada CCU põhjal saadud toodete hinda.

KOKKUVÕTE

Kokkuvõtteks saab öelda seda, et CCU, CCS ja CCUS projektide kasutuselevõtt on olulise tähtsusega kliimamuutuse vastu võideldes, ning nende arendamine ja potentsiaalsete väljundite leidmine peaks olema suure tähtsusega. Vaatamata sellele võib esineda mitmeid takistusi.

CCS-i laialdase kasutuselevõtu potentsiaal on hetkel kõrge, mida saab järeltada mitmest suure mastaabiga projektidest, ning CCS-i infrastruktuuri arengu järgi. Vaatamata sellele peab seda tehnoloogiat toetama riiklikutel tasanditel, kuna just see annab sellele parima võimaliku võimaluse saavutada edu ja olla suureks faktoriks kliimamuutuse vastu võitlemiseks.

CCU laialdase kasutuselevõtu võimaldamiseks on vaja teha suurt teadus- ja arendustööd mille abiga on võimalik vähendada tehnoloogia rakendamisega kaasnevaid kulusid ja saavutada võimekus kasutada süsinikdioksiidi rohkemate toodete tootmisel lähteainena.

Ületades need takistused on tõenäosus, et need tehnoloogiad on ühed suurimad faktorid kliimamuutuse vastu võitlemiseks ja Pariisi kliimakokkuleppes sätestatud eesmärkide saavutamiseks. Edu võtmeks antud kontekstis saab CCU ja CCS tehnoloogiate arenduseks rahastuse ja avaliku huvi tagamine, mis nõuab tugevat koostööd valitsusorganite, tehnoloogiate arendusrühmade ning tööstus- ja energiasektori ettevõtete, kus oleks võimalik antud tehnoloogiaid rakendada, vahel.

SUMMARY

In conclusion, the introduction of CCU, CCS and CCUS projects is of great importance in the fight against climate change, and their development and finding potential outputs should be of great importance. Despite this, there may be several obstacles.

The potential for widespread adoption of CCS is currently high, as can be inferred from several large-scale projects and the development of CCS infrastructure. Nevertheless, this technology needs to be supported at national levels, as this is what gives it the best possible chance to succeed and be a major factor in the fight against climate change.

In order to enable the widespread adoption of CCU, it is necessary to carry out major research and development work, with the help of which it is possible to reduce the costs associated with the implementation of the technology and to achieve the ability to use carbon dioxide as a raw material in the production of more products.

By overcoming these obstacles, these technologies are likely to be one of the biggest factors in combating climate change and achieving the goals set out in the Paris Climate Agreement. The key to success in this context will be securing funding and public interest for the development of CCU and CCS technologies, which requires strong cooperation between government bodies, technology development groups, and industrial and energy sector companies where these technologies could be applied.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. M. Cuéllar-Franca and A. Azapagic, "Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts," *Journal of CO2 Utilization*, vol. 9. Elsevier Ltd, pp. 82–102, 2015. doi: 10.1016/j.jcou.2014.12.001.
- [2] "About CCUS - Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- [3] "Physical separation | CTP." <https://www.ctp.be/en/expertise/mineral-processing/physical-separation/#:~:text=The%20physical%20separation,exploited%20either%20intrinsicly%20or%20differentially.>
- [4] "Calcium looping : GCCA (gccassociation.org)." <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/carbon-capture-and-utilisation/calcium-looping/>
- [5] "Energies | Free Full-Text | A Critical Review of CO2 Capture Technologies and Prospects for Clean Power Generation (mdpi.com)." <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/21/4143>
- [6] "What Are Supercritical CO2 Power Cycles? (powermag.com)." <https://www.powermag.com/what-are-supercritical-co2-power-cycles/#:~:text=While%20conventional%20power%20plant%20cycles,gas%20phases%20are%20not%20distinguishable.>
- [7] M. Bui *et al.*, "Carbon capture and storage (CCS): The way forward," *Energy and Environmental Science*, vol. 11, no. 5. Royal Society of Chemistry, pp. 1062–1176, May 01, 2018. doi: 10.1039/c7ee02342a.
- [8] "Membranes Separation - an overview | ScienceDirect Topics." <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/membranes-separation#:~:text=Membrane%20separation%20process%20is%20a%20process%20where%20a%20membrane%20is,basis%20of%20relative%20permeation%20rates.>
- [9] "Global Status of CCS - Global Carbon (globalccsinstitute.com)." <https://status22.globalccsinstitute.com/2022-status-report/global-status-of-ccs/>
- [10] "CO2 Transport and Storage – Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/co2-transport-and-storage>
- [11] "CO2 Capture and Utilisation – Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/co2-capture-and-utilisation>
- [12] "Carbon Capture and Utilization Update - Al-Mamoori - 2017 - Energy Technology - Wiley Online Library." <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.201600747>

- [13] "About us – North-CCU-hub (northccuhub.eu)." <https://northccuhub.eu/about-us/>
- [14] "What is CCUS and how is it expected to be Carbon Neutral? (2) (mol-service.com)," <https://www.mol-service.com/blog/ccus-2>. <https://www.mol-service.com/blog/ccus-2> (accessed May 27, 2023).
- [15] "Carbon Capture, Utilization and Storage Services | Technip Energies." <https://www.technipenergies.com/en/markets/carbon-capture-utilization-storage-services>
- [16] "Life Cycle Analysis (LCA) - A Complete Guide to LCAs (bpf.co.uk)." https://www.bpf.co.uk/sustainable_manufacturing/life-cycle-analysis-lca.aspx#:~:text=In%20short%2C%20a%20life%20cycle,final%20end%20of%20life%20destination.
- [17] "Life Cycle Assessment Explained - STiCH (culturalheritage.org)." <https://stich.culturalheritage.org/life-cycle-assessment-explained/>
- [18] T. B. Naess and M. Belayneh, "Life Cycle Assessment of CO2 Capture, Storage and Utilization Technologies."
- [19] "TOMAKOMAI CCS DEMONSTRATION PROJECT | PROJECTS | Japan CCS Co., Ltd." <https://www.japanccs.com/en/business/demonstration/index.php>
- [20] "BECCS and negative emissions - Drax Global." <https://www.drax.com/about-us/our-projects/bioenergy-carbon-capture-use-and-storage-beccs/#our-beccs-projects-and-partnerships>
- [21] "How BECCS works – Beccs Consultation Drax (beccs-drax.com)." <https://beccs-drax.com/how-beccs-works/>
- [22] "About the Longship project - Northern Lights (norlights.com)." <https://norlights.com/about-the-longship-project/>
- [23] "Direct Air Capture – Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- [24] "Ector County, TX | 1PointFive." <https://www.1pointfive.com/ector-county-tx>
- [25] "Regional Overview – Global Carbon (globalccsinstitute.com)." <https://status22.globalccsinstitute.com/2022-status-report/regional-overview/>
- [26] S. Fawzy, A. I. Osman, J. Doran, and D. W. Rooney, "Strategies for mitigation of climate change: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 18, no. 6. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 2069–2094, Nov. 01, 2020. doi: 10.1007/s10311-020-01059-w.
- [27] "The Paris Agreement | UNFCCC." <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>