



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO



KLIIAMAMUUTUSTE LEEVENDAMINE LÄBI CCS JA CCU TEHNOLOOGIATE (ClimMit) Lõpparuanne

Uuringu teostajad:
Tallinna Tehnikaülikool
Tartu Ülikool

Konsortsiumi juht: professor Alar Konist
Projektijuht: vanemteadur Mai Uibu

Uuringu tellis ja uuringut rahastab Eesti Teadusagentuur Euroopa Regionaalarengu Fondist toetatava programmi „Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamine“ (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ kaudu.

Uuring valmis Eest Vabariigi Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi, Keskkonnaministeeriumi, Rahandusministeeriumi ja Riigikantselei eesmärkide elluviimiseks.



RITA

2021
Tallinn

UURIMISRÜHMADE VASTUTAVAD JA PÕHITÄITJAD

Uurimisrühm RITA1/02-20-01

Andres Siirde, PhD, professor – uurimisrühma juht
Oliver Järvik, PhD, vanemteadur
Dmitri Nešumajev, PhD, vanemteadur
Jülija Gušča, PhD, külalisdotsent
Mai Uibu, PhD, vanemteadur

Uurimisrühm RITA1/02-20-02

Andres Triikkel, PhD, professor – uurimisrühma juht
Tõnu Pihu, PhD, professor
Alar Konist, PhD, professor
Birgit Maaten, PhD, vanemteadur
Martin Liira, PhD, teadur

Uurimisrühm RITA1/02-20-03

Gunnar Nurk, PhD, kaasprofessor – uurimisrühma juht
Mart Loog, PhD, professor
Kaspar Valgepea, PhD, kaasprofessor
Uno Mäeorg, PhD, kaasprofessor
Hannes Kollist, PhD, professor

Uurimisrühm RITA1/02-20-04

Aaro Hazak, PhD, professor – uurimisrühma juht
Kadri Männasoo, PhD, professor
Priit Sander, PhD, kaasprofessor

Kaia Kask, PhD, teadur

Lisaks osalesid projektis Zachariah Steven Baird, PhD, teadur; Liina Jakobson, PhD, teadur; Helen Poltimäe, PhD, lektor; Can Rüstü Yörük, PhD, teadur; Meelis Eldermann, doktorant; Artjom Saia, nooremteadur; Liina Joller-Vahter, nooremteadur; Martin Maide, PhD, teadur; Ove Korjus, doktorant; Kelly Joa, EKUKi kliimaüksuse spetsialist; jt.

Sisukord

Eessõna.....	5
1 Sissejuhatus.....	7
2 CO ₂ emissioonid ja CO ₂ püüdmine	9
2.1 CO ₂ püüdmistehnoloogiate võrdlus ja majanduslikud aspektid	10
2.2 CO ₂ püüdmise sotsiaalmajanduslikud aspektid.....	11
2.3 CO ₂ transpordi aspektid	12
2.4 CO ₂ ladustamise aspektid.....	13
3 CO ₂ kasutamine tööstuses.....	15
3.1 CO ₂ keemiatööstuse lähteainena	15
3.1.1 Lühiülevaade	15
3.1.2 Turu maht ja väärtus	17
3.2 CO ₂ kõrgtemperatuurne elektrolüüs CO ja sünteesgaasi tootmiseks	20
3.2.1 CO ₂ kõrgtemperatuurne elektrolüüs.....	20
3.2.2 CO ₂ ja H ₂ O kõrgtemperatuurne kaaselektrolüüs.....	20
3.2.3 Vedelkütuste tootmine CO ₂ -st ja taastuvenergiast.....	21
3.3 CO ₂ kasutamine biotehnoloogiatööstuses	21
3.3.1 Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamine kütuste ja kemikaalide tootmiseks	21
3.3.2 Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamine metaani ja soojuste tootmiseks	21
3.3.3 CO ₂ fototroofilise muundamine kütusteks ja kemikaalideks.....	22
3.4 CO ₂ kasutamine taimekasvatuses	22
3.5 F-gaaside asendamine CO ₂ -ga	23
3.6 Täiendavad ja täpsustavad kommentaarid kemikaalipuhituse ja toidupuhtusega CO ₂ sobivuse kohta lähteainena kasutamiseks	23
4 CCS tehnoloogiate rakendatavus põlevkivitööstuses.....	26
5 CO ₂ püüdmise, puhastamise, kasutamise, transpordi ja ladustamise majandusanalüüs Eesti põlevkivitööstuse kontekstis	28
5.1 Modelleerimise lähtekohad	28
5.2 CO ₂ püüdmis- ja puhastamistehnoloogia rakendamise kulu	31
5.3 Püütava CO ₂ tööstuses kasutamise majanduslikest aspektidest	33
5.4 Püütava CO ₂ transpordi ja ladustamise kulu	38
5.5 CCU/CCS tehnoloogiate rakendamise toetamise meetmetest	40
5.6 Kokkuvõtte põlevkivitööstuses CCU/CCS rakendatavuse majandusanalüüsist.....	43

6	Uuringu peamised tulemused	47
7	Soovitused ja uuringust ilmnenu lähtekohad edasiste tegevuste üle otsustamiseks.....	53
8	Põlevkivienergeetikaga jätkamise kaalutlused.....	55
	Kokkuvõte.....	57
	Summary	59
	Mõisted ja lühendid.....	61
	Viidatud allikad	62

Eessõna

Käesolev aruanne võtab kokku uuringu „Kliimamuutuste leevendamine CCS ja CCU tehnoloogiate abil“ (ClimMit) raames saadud olulisemad tulemused. Uuringu tellis ja uuringut rahastas Eesti Teadusagentuur Euroopa Regionaalarengu Fondist toetatava programmi „Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamine“ (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ kaudu. Uuring valmis Eest Vabariigi Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi, Keskkonnaministeeriumi, Rahandusministeeriumi ja Riigikantselei eesmärkide elluviimiseks, mis on koos uuringu teostamise muude tingimustega määratletud Tallinna Tehnikaülikooli ja Eesti Teadusagentuuri vahel sõlmitud teenuse osutamise lepingus nr 7.2-2/19/4. Uuring teostati Tallinna Tehnikaülikooli ja Tartu Ülikooli koostöös vastavalt 27. detsembril 2018. a sõlmitud konsortsiumilepingule. Uurimistöö viidi läbi aprillist 2019 kuni märtsini 2021 ning käesolev aruanne peegeldab teadmisi, mis uuringu alateemade täitmise ajaks kasutada olnud andmete põhjal uuringumeeskonnale kättesaadavad olid. Aruandes esitatud seisukohtade ja hinnangute realiseerumine sõltub nende aluseks olevatest eeldustest ning kasutatud informatsioonist, mille täpsuse, õigsuse ja muutumise suhtes ei võta aruande koostajad vastutust. Tegelikud sündmused ja tulemused võivad osutada eeldatust erinevaks, mistõttu ei saa käesolevat aruannet kasutada tulevaste sündmuste tõepärase prognoosina. Seetõttu ei võta aruande koostajad vastutust käesolevas aruandes esitatu põhjal teiste osapoolte tehtavate otsuste ja nende tagajärgede eest. Uuringu koostamisel lähtuti eesmärgist selgitada Eesti põlevkivitööstuse heitmena tekkiva CO₂ püüdmise, ladustamise ja kasutamise rakendatavust. Selleks uuriti olemasolevate CO₂ püüdmise tehnoloogiate sobivust Eesti põlevkivitööstusele, CO₂ püüdmise ning transpordi ja ladustamise tehnoloogilisi võimalusi ning kulu nende rakendamisel ja potentsiaalselt püütava CO₂ puhtust ja selle võimalikke kasutusvaldkondi.

Lühikokkuvõte uuringu olulisematest tulemustest:

- Põlevkivitööstuses lähitulevikus rakendamiseks oleks tehnoloogilisest aspektist kõige sobivamad CO₂ püüdmise tehnoloogiad absorptsioon ja hapnikus põletamine. Veelgi tõhusamaks võivad tulevikus osutada uuemad tehnoloogiad, mis tänasel hetkel pole aga veel valmis tööstuslikus skaalas kasutamiseks.
- Põlevkivielektri CO₂ jalajälg oleks võimalik soovi korral viia negatiivseks, rajades pooles ulatuses põlevkivi ja pooles ulatuses hakkepuitu kasutava elektrijaama koos CO₂ püüdmistehnoloogiaga. Ka tuha kasutusele võtmine aitaks vähendada elektritootmise CO₂ jalajälge ning võimaldaks vähendada tsemenditootmise CO₂ intensiivsust. See temaatika ei olnud antud uuringu fookuses, kuid sellega tegelemine peaks olema ette nähtud tuleviku uuringuteplaanis.
- Kõrge valmidustaseme saavutanud tehnoloogiatest ei ilmnunud kindlalt kulutõhusaid võimalusi põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütava CO₂ kasutamiseks Eesti tööstuses. Potentsiaalselt sobiv lahendus püütavast CO₂-st vabanemiseks on selle ladustamine Põhjamere all.
- CO₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ühikukulu sõltub valitavast tehnoloogiast ja eeldustest ning oleks hinnanguliselt vähemalt 76-88 eurot CO₂ tonni kohta põlevkivielektrijaama täisvõimsusel töötamise jm eeldustel.
- Rahanduslikust aspektist ei osutunud Eesti põlevkivitööstuses CO₂ püüdmise mõttekaks – CO₂ püüdmise, puhastamise, transpordi ja ladustamise rahalised kulud ületaksid oluliselt praegust alternatiivi ehk CO₂ kvooditasu (2021. aasta märtsis ca 40 eurot tonn) ja keskkonnatasusid. Küsitav on CO₂ püüdmise tehnoloogiasse investeerimine või kulude riiklik toetamine, kuna see tähendaks maksukoormust või kulude edasikandmist erasektorisse, mis omakorda vähendaks Eesti

majanduse konkurentsivõimet. Samuti tuleb arvestada, et kasvav CO₂ kvooditasu või CO₂ püüdmise ja sellest vabanemise kulu tähendab elektrienergiaturul lisakulu ja seeläbi konkurentsivõime langust neile turuosalistele (sh põlevkivielektritootmine), mille tootmisprotsessiga kaasneb CO₂ emissioon.

- Jäeb riigi otsustada, kas energia varustuskindluse kaalutlused või muud põlevkivitööstusega kaasnevad välismõjud, mida käesolev uuring ei hõlmanud, kaaluvad üles CO₂ püüdmise kulud – hädavajalik oleks kompleksne tõenduspõhine uuring, mille alusel kujundada Eesti energeetika pikaajaline strateegia, mis looks selguse erainvestoritele, panustaks avalike ressursside optimaalsesse kasutamisse ja energia varustuskindluse tagamisse. Kindlasti peab selline uuring hõlmama erinevad energiatootmise alternatiivid ning nende seosed võrgutasudes vm sisalduvate dotatsioonielementidega.

Eeltoodut on täpsemalt selgitatud aruande järgnevates peatükkides, kokkuvõttes ja lisades.

1 Sissejuhatus

Kliimateadlased on rõhutanud vajadust vähendada kasvuhoonegaaside emissioone, et vältida tõsiseid kliimamuutusega kaasnevaid probleeme [1], [2]. Euroopa Liit (EL) on senini seadnud eesmärgiks vähendada 2030. aastaks kasvuhoonegaaside emissioone 40% võrreldes 1990. aastaga, kuid 2021. aastal plaanitakse liikuda edasi ambitsioonikama kavaga, mille järgi on vajalik vähendada CO₂ emissioone 2030. aastaks 55% võrra [3]. 2014. aastal oli Eesti kasvuhoonegaaside netoemissioon 20,5 miljonit tonni, millest 88,8% pärines energiavaldkonnast [4]. Kasvuhoonegaasidest moodustas süsihappegaas 89,8%, metaan 5,2%, diilämmastikoksiid 3,9% ja freoonid ligikaudu 1% (toodud kogus ja protsendid väljendavad emissiooni CO₂ ekvivalendina¹). Seega tuleks kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamiseks tegeleda peamiselt energiatootmisest pärineva süsihappegaasiga.

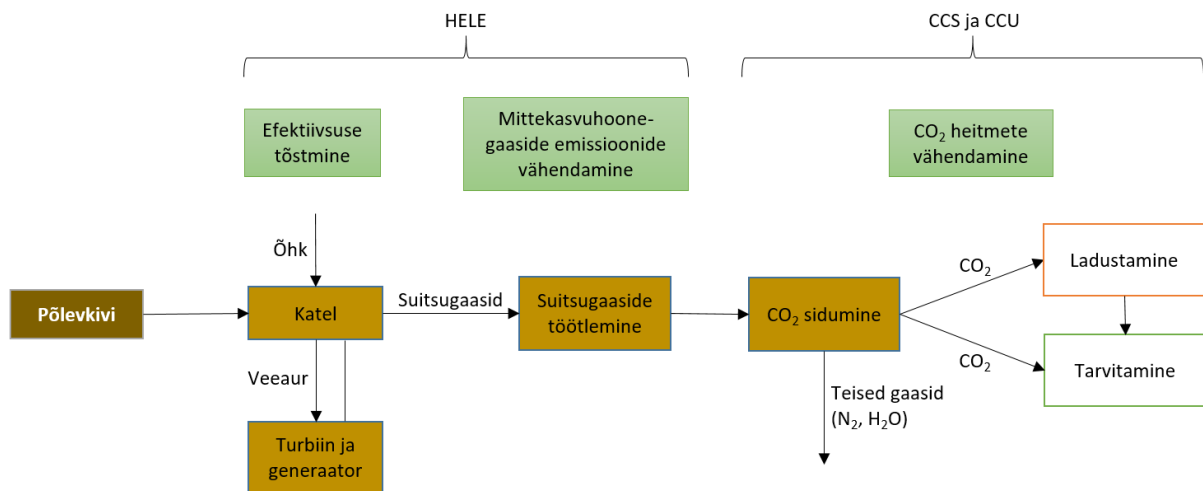
Põlevkivi on Eestis oluline energiaallikas, aga sellest energia tootmisel on märgatav keskkonnamõju. Viimastel kümnenditel on arendatud uusi tehnoloogiaid, millega on põlevkivienergiatööstuse kasvuhoonegaaside heitmeid tunduvalt vähendatud, kuid jätkusuutliku tuleviku jaoks on vaja leida uusi võimalusi põlevkivi tõhusamaks kasutamiseks ning keskkonna jalajälje vähendamiseks. Selle raames tuleks keskenduda suure tõhususe ning madala heitkogusega (ingl *high-efficiency, low-emissions* ehk HELE) põlevkivitehnoloogiate väljatöötamisele ja kasutuselevõtmisele energiatootmisel.

Energeetikas tekkivate CO₂ heitmete vähendamiseks on kolm võimalust:

- juurutada ja edasi arendada HELE põlevkivitehnoloogiaid, s.t kasutada efektiivsemat tehnoloogiat ja jätkata kõrgema efektiivsusega muundamisprotsesside väljatöötamist;
- juurutada CO₂ püüdmise (CC), ladustamise (CCS) ja kasutamise (CCU) tehnoloogiaid. Süsinikdioksiidi püüdmine, ladustamine ja kasutamine on pikemaajalise CO₂ vähendamise eesmärkide saavutamiseks hädavajalik;
- kasutada alternatiivseid, vähem CO₂ heiteid tekitavaid kütuseid või mittefossiilseid energiaallikaid põlevkivist energia tootmise asemel.

Joonis 1 näitab CO₂ heitmete vähendamise võimalusi põlevkivielektrijaamas. Kuigi HELE tehnoloogiate juurutamine on näidanud märkimisväärset potentsiaali heitmekoguste vähendamiseks, on kliimamuutuse leevendamise eesmärkide saavutamiseks vaja saavutada CO₂ püüdmise võimekus ja leida võimalusi püütud CO₂ efektiivseks ladustamiseks ja/või kasutamiseks. Samas tuleb arvestada, et CO₂ püüdmisvõimekuse lisamine olemasolevatele tootmisüksustele tähendab mahukaid investeeringuid, suurendab opereerimiskulusid ning vähendab energiatootmise efektiivsust. Seega on oluline HELE ja CO₂ püüdmise võimekuse tasakaalustatud integreerimine olemasolevatesse tootmisüksustesse.

¹ Ekvivalentse CO₂ emissiooni väärtus leitakse, arvestades iga gaasi puhul tema nn globaalse soojenemise potentsiaali (ingl *Global warming potential*) – nt 1 kg emiteeritud metaani või CF₄ mõju on ekvivalentne vastavalt 28 kg ja 6630 kg CO₂ emissiooniga [91]



Joonis 1. Ülevaade võimalikest CO₂ heitmete vähendamise meetmetest põlevkivienergeetikas

Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus [5] rõhutas oma hiljutises aruandes CO₂ püüdmistehnoloogia rakendamise vajadust põlevkivisektori jätkuvaks toimimiseks:

“Eeldatavalt ei ole KHG heitme täiesti nullini viimine võimalik (nt põllumajanduses, transpordis, tööstuses). Seetõttu on kliimaneutraalsuse eelduseks heidet siduv LULUCF sektor või CCS/CCU kasutuselevõtt. Neid eeldusi täitmata ei mahu põlevkivisektor aastal 2050 pildile.”

Kuna antropogeense CO₂ täielik sidumine biomassiga läbi biomassi juurdekasvu (ehk LULUCF sektoriga) ei ole võimalik, siis CO₂ püüdmistehnoloogiate rakendamine on põlevkivisektori jätkusuutlikkuse tagamiseks vajalik. Seetõttu on oluline uurida CO₂ püüdmistehnoloogiate rakendatavust põlevkivitööstuses.

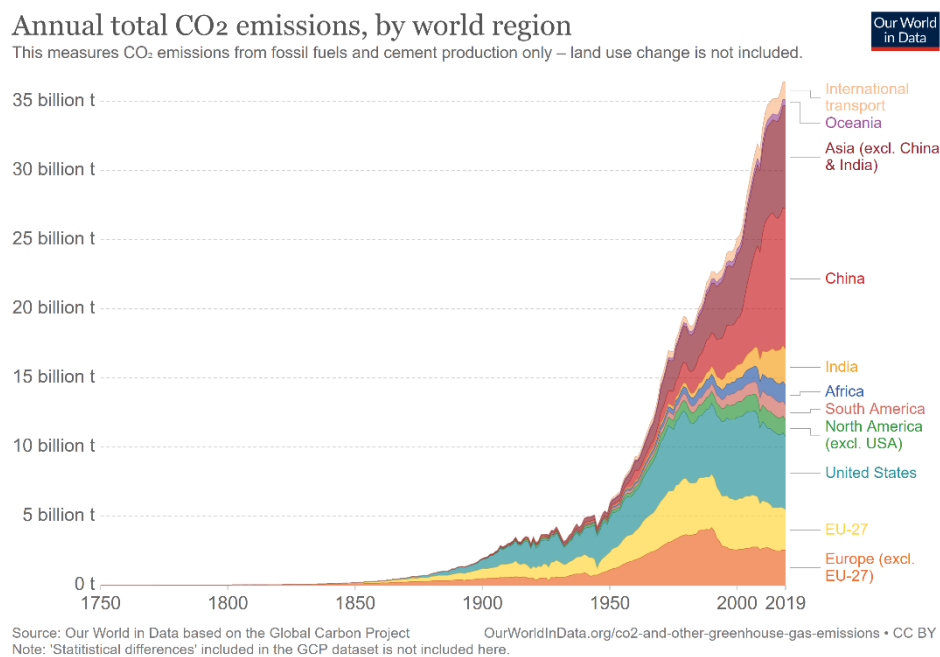
Antud projekti põhieesmärk oli hinnata erinevate CO₂ püüdmistehnoloogiate sobivust põlevkivitööstuses ning tuginedes hetke parimatele teadmistele, töötada välja stsenaariumid nende tehnoloogiate rakendamiseks Eesti põlevkivitööstuses. Projektis analüüsiti leitud sobivaimate lahenduste keskkonnamõju ning Eesti tööstussektori tehnoloogilist ja majanduslikku võimekust püütud CO₂ kasutada. Eesmärgi saavutamiseks moodustati Tallinna Tehnikaülikooli energiastechnoloogia instituudi professori Alar Konisti juhtimisel Tallinna Tehnikaülikooli ja Tartu Ülikooli ühiskonsortsium.

Tulenevalt eesmärkidest, käsitleb käesolev aruanne “Kliimamuutuste leevendamine läbi CCS ja CCU tehnoloogiate” põlevkivitööstuses tekkivate CO₂ emissioonide vähendamise võimalusi. Mõistmaks neid võimalusi ja hindamaks CO₂ püüdmise tehnoloogiate rakendatavust põlevkivitööstuses tekkiva CO₂ püüdmiseks ning püütud CO₂ ladustamise ja/või kasutamise võimalikkust, on koondatud aruandesse olulisi aspekte hõlmavad teadmised. Nendeks on CO₂ püüdmise tehnoloogiate kirjeldused; põlevkivitööstuses rakendatavate tehnoloogiate (elektri ja õli tootmise tehnoloogiad) kirjeldused ja seal tekkivate CO₂ sisaldavate voogude parameetrid; CO₂ ladustamise võimalused (nn CCS); CO₂ kasutamise võimalused tööstuses (nn CCU).

2 CO₂ emissioonid ja CO₂ püüdmine

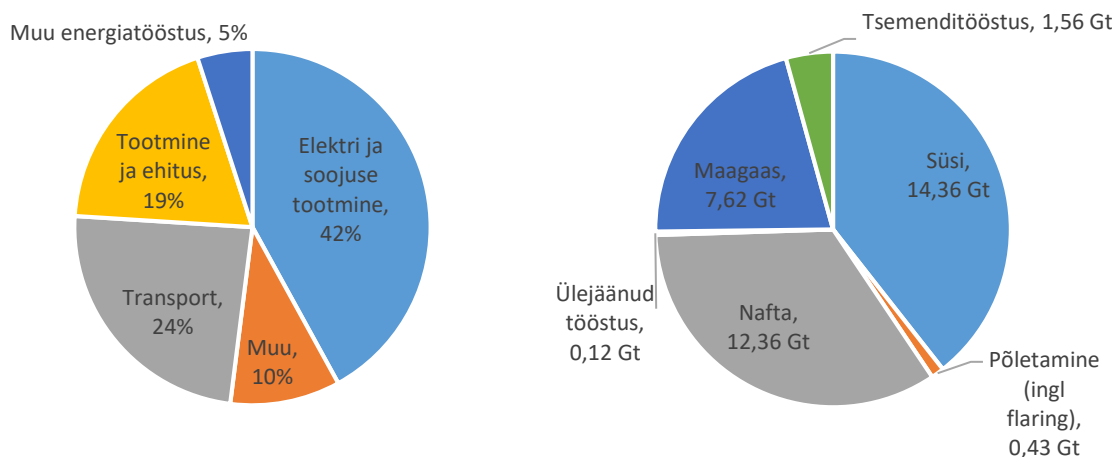
On ilmne, et inimtegevusel on oluline mõju ümbritsevale keskkonnale. Pidevalt suureneva energiavajaduse tõttu on jätkuvas kasvutrendis erinevate kütuste kasutamine. Kui 20. sajandi alguses pärines enamik emissioone Euroopast ja Ameerika Ühendriikidest, siis viimastel aastatel on nendest piirkondadest pärit emissioonid stabiliseerunud või isegi vähenenud. Tulenevalt nn arenevate riikide energia ja fossiilsete kütuste tarbimise kasvust on pidevalt kasvanud ka kasvuhoonegaaside (KHG; CO₂ ekvivalentides) emissioon (Joonis 2) [6], [7] Seejuures on tähelepanuväärne, et hoolimata aastakümneid kestnud teadus- ja arendustööst taastuvenergiaallikate (eelkõige päikesepatareide ja tuuleenergia kasutuse) vallas, ei suuda kasutusele võetavate taastuvenergiaallikate võimsuse kasv pidada sammu elektrienergia tarbimise kasvuga. See omakorda tähendab, et järjest enam suureneb taastumatute fossiilsete kütuste tarbimine. 2018. aastal oli endiselt kõige olulisem energiaallikas süsi, suurima kasvu tegi aga maagaasi tarbimine [8].

2016. aastal kinnitati Pariisi kliimalepe, milles riigid lubasid pühenduda globaalse temperatuuri tõusu hoidmisele vähemalt alla 2°C (ja võimalusel alla 1,5°C) [9]. Selle eesmärgi saavutamiseks on vaja oluliselt vähendada KHG-de emissioone. Valitsustevaheline kliimamuutuste paneel (IPCC) uuris erinevaid stsenaariume ja arvutas nende järgi püstitatud eesmärgi saavutamise tõenäosuse. Antud analüüsi põhijäreldus on, et hoidmaks maakera keskmise temperatuuri tõusu alla 2°C, tuleks järgida rangeimat stsenaariumi, mille järgi 2050 aastaks peab maailma neto kasvuhoonegaaside emissioonid olema nulli lähedal [1].



Joonis 2. Maailma CO₂ heitmed aastate lõikes. Allikas: Our World In Data [6]. Andmete allikas: Global Carbon Project ja Carbon Dioxide Information Analysis Centre [10].

Detailsem ülevaade CO₂ emiteerivatest sektoritest ja emissioonide allikates kasutatavatest kütustest on toodud järgmisel joonisel (Joonis 3). Selgelt suurim osa emiteeritud antropogeenset süsinikdioksiidist tuleb energiatootmisest. Ülejäänud fossiilseid kütuseid kasutavate sektorite (nt transport ja põllumajandus) osakaal on tunduvalt väiksem. Söe osakaal on jäänud muutumatuks, kuid kasvanud on naftast ja gaasist pärineva CO₂ osakaal.



Joonis 3. Maailma CO₂ heitmed aasta 2016 sektori järgi (vasakpoolne diagramm; andmete allikas: IEA [6]) ja aastal 2019 kütuse liigi järgi (parempoolne diagramm; [10])

Arvestades maailmas tarbitavat energiakogust ja energia tarbimise kasvu kiirust, ei ole võimalik lähitulevikus täies mahus asendada töökindlaid ja usaldusväärseid fossiilsetel kütustel põhinevaid energiatootmisvõimsusi taastuvenienergipõhiste tootmisvõimsustega. Iga-aastase KHG-de emissiooni kasvu pidurdamiseks ja ideaalis KHG-de summaarse emissiooni vähendamiseks on vaja panustada mitmeti [1]. Kõige käegakatsutavamad meetmed energeetikavaldkonnas on energiakasutuse efektiivsuse parandamine, fossiilkütuste asendamine taastuvate kütustega ja CO₂ püüdmise tehnoloogiate arendamine [8]. Ka valitsustevaheline kliimamuutuste paneel (*Intergovernmental Panel on Climate Change* ehk IPCC) on leidnud [1] et ilma CO₂ püüdmistehnoloogiateta oleks oluliselt väiksem tõenäosus hoida globaalset temperatuuri tõusu alla 2 kraadi. Just seetõttu on oluline panustada CO₂ püüdmistehnoloogiate arendamisse, mis on osaliselt rakendatavad ka tootmisprotsessides (nt terase- ja tsemenditööstus), kus CO₂ tekib kõrvalproduktina [11].

CO₂ püüdmiseks arendatakse erinevaid tehnoloogiaid, sealhulgas näiteks ka CO₂ püüdmist otse õhust/atmosfäärist². Kuna aga CO₂ kontsentratsioon atmosfääris on üsna madal (umbes 400 ppm ehk 0,04 mahu%), siis ei ole selle atmosfäärist püüdmise otstarbekas [12] sest loodusseadustest tulenevalt on protsesside läbiviimine (aine eraldamine) seda energiamahukam, mida madalam on aine kontsentratsioon. Seega on CO₂ püüdmiseks sobivam CO₂ kontsentratsioon õhuheitmete allika gaasis, mis elektri ja gaasi suitsugaasis on tavaliselt vahemikus 3–15 mahu% [13]. Erinevad CO₂ püüdmistehnoloogiad on kirjeldatud lisa „CO₂ püüdmistehnoloogiad“.

2.1 CO₂ püüdmistehnoloogiate võrdlus ja majanduslikud aspektid

Järgnevas tabelis (Tabel 1) on kirjanduse andmetele tuginedes esitatud kokkuvõtlik ülevaade CO₂ püüdmistehnoloogiatest nende põhiparameetrite järgi. CO₂ püüdmistehnoloogiate korral on hinnatud nende sobivust kasutamiseks põlevkivitööstuses olemasolevatletus seadmete korral, lähtudes tehnoloogia rakendamiseks vajalikest tehnilistest eeldustest. Kirjandusandmetele tuginedes on hinnatud tehnoloogiate valmidustasemed (TVT), energiatarve, saadava CO₂ voo puhtus ja CO₂ püüdmise ligikaudne kulu. Täiendavad andmed on esitatud lisa „CO₂ püüdmistehnoloogiad“. Nagu tabelis on välja toodud, kaasneb CO₂ püüdmistehnoloogiate rakendamisega oluline lisaenergiakulu,

² <http://www.climeworks.com/our-technology/>

mis on väljendatud antud tabelis energialõivuna ehk energiatootmise suhtelise kasuteguri vähenemisena. Energialõivu põhjused on nimetatud lisas „CO₂ püüdmistehnoloogiad“. Oluline aspekt CO₂ kasutamise (CCU) tehnoloogiate korral on saadava CO₂ voo puhtus, mis määrab tema edasise kasutamise võimalused.

Tabel 1. CO₂ püüdmistehnoloogiate võrdlus

Tehnoloogia	Sobivus olemasolevale põletusseadmele*	Efektiivsuse langus [‡] , %	Saadava CO ₂ oodatav puhtus	Ligikaudne kulu (2019 EUR/t CO ₂)**	TVT
Membraanprotsess	jah	8-14	50–99%***	45–90	7
Hapnikus põletamine	jah	5-12	70%	25–70	7
Absorptsioon	jah	6-14	>98%	30–90	9
Mitmefaasiline absorptsioon	jah	~9	>98%	25–70	7
Adsorptsioon	jah	~10	50–99%***	40–70	7
Hapnikukandja ringlus	ei	~2	~75%	15–30	6
Kaltsiumi ringlus	jah	3-11	~70%	15–40	6
Krüogeenne püüdmine	jah	5-14	>99%	20–60	6

* Tehnoloogiat saab rakendada olemasoleva põletusseadme korral, ilma et oleks vaja seadet ennast muuta

** Kulu ei sisalda transpordi ja ladustamise kulu, aga sisaldab seadmete kulu ja kokkusurumise/komprimeerimise kulu

*** Kõrgem puhtus saavutatakse separatsioonistmete lisamisel

‡ Mitu protsendipunkti elektrijaama efektiivsus langeks püüdmise tõttu; näitab püüdmistehnoloogia energiatarvet

2.2 CO₂ püüdmise sotsiaalmajanduslikud aspektid

Võttes arvesse CCS/CCU olulisust kasvuhoonegaaside tekke vähendamisel, on nende tehnoloogiate rakendamise juures lisaks erasektori majanduslikele kaalutlustele oluline ka avalik huvi ja sotsiaalmajanduslikud kaalutlused. CCS/CCU tehnoloogiate kasutuselevõtmisega kaasnevad potentsiaalselt olulised positiivsed välismõjud (*externalities*) kasvuhoonegaaside vähendamise näol, mis tähendab, et kui vastavate tehnoloogiate kasutuselevõtt ei osutu turutingimustel erasektori ettevõtete jaoks tasuvaks, võib avalikul sektoril siiski olla huvi CCS/CCU tehnoloogiate kasutuselevõttu regulatiivsete või toetavate meetmetega soodustada ja erasektori jaoks atraktiivse(ma)ks või kohustuslikuks muuta. Regulatsioonide (sh erasektorile potentsiaalsete piirangute ja kohustuste seadmisel) ja toetusmeetmete kavandamisel on seejuures äärmiselt oluline silmas pidada põlevkivitööstuse ja sellega seonduvate majandusvaldkondade konkurentsivõimelisust maailmaturul. Näiteks ei pruugi olla mõttekas pikas perspektiivis toetada äritegevusi, mis küll täidavad keskkonnavalaseid eesmärgi, kuid ei ole oma põhitegevuses konkurentsivõimelised, samas kui maailmaturul konkurentsivõimeliste põhitegevustega ettevõtete toetamine võib olla mõttekas,

soodustamaks nendes CCS/CCU tehnoloogiate kasutuselevõttu, kui see turutingimustel ei oleks tasuv. Arvestama peab kindlasti ka sellega, et CCS/CCU tehnoloogiate kasutuselevõtuks majanduslike stiimulite loomisel CO₂ püüdiskohustust seades või toetusmeetmeid pakkudes kandub CO₂ püüdmisega seonduv täiendav kulu tootjale või maksumaksjale, vähendades muude tingimuste samaks jäädes majanduse konkurentsivõimet. Seetõttu on poliitikameetmete kujundamisel äärmiselt oluline võrdlevalt kaalutleda, milline on teatud keskkonnaalast välismõju adresseerivate alternatiivsete meetmete (nt CO₂ püüdiskohustus, taastuvenergia soodustamine vm) majanduslik kulu.

Käesolev projekt katab CCS/CCU tehnoloogiate Eesti põlevkivitööstuses rakendamise ühikukulu (CO₂ tonni kohta) analüüsi ning diskussiooni toetusmeetmete osas (vt ptk 5). Enne CCS/CCU tehnoloogia kasutuselevõtu üle otsustamist oleks vaja teha Eesti energeetika pikaajaliste strateegiliste alternatiivide võrdlevas kontekstis eri tehnoloogiate kasutuselevõtu laiem sotsiaal-majandusliku tasuvuse analüüs. Majanduslike mõjude ja välismõjude (nt keskkonna-, tööhõive-, energiapuudulikkused) koondanalüüs oleks oluline sisend nii eratööstuste kui valitsusasutuste investimisotsuste lähtekoha ja poliitika kujundamise jaoks, sh seonduvate teadus- ja arendussuundade määratlemiseks, asjakohaste regulatsioonide ja seadusandluse väljatöötamiseks ning keskkonna ja energeetikaga seotud sekkumismeetmete üle otsustamiseks [14].

2.3 CO₂ transpordi aspektid

Arvestades CO₂ püüdmisel tekkivat CO₂ kogust, siis kaks peamist viisi CO₂ transportimiseks on torustik või spetsiaalne laev [12], kuid võimalik on kasutada transpordiks ka rongi või veoautot. CO₂ transportimisel üle riigipiiride tuleb arvestada asjakohaste seadustega. Euroopa Liidu praeguse seadusandluse järgi loetakse laevadega transporditav CO₂ emissiooniks [15], [16].

Selleks et CO₂ efektiivselt/optimaalselt transportida, on vaja see kokku suruda või veeldada. CO₂ viimine transportimiseks vajalikele tingimustele (madal temperatuur ja kõrge rõhk) nõuab energiat. Lisaks on vajalik, et CO₂ niiskusesisaldus ja teiste gaasiliste komponentide sisaldus oleks väike. Täpsed tingimused ja piirangud on esitatud lisas „CO₂ transport ja ladustamine“.

CO₂ transpordi maksumus sõltub nii kasutatavast transpordi liigist, transporditavast CO₂ kogusest, kui ka vahemaast. Torujuhtme kaudu CO₂ transportimise kulud erinevate uuringute järgi on esitatud Tabel 2 ja CO₂ transportimise kulud sõltuvalt veokaugusest Tabel 3.

Tabel 2. CO₂ torujuhtmega transportimise tasandatud kulud varasemate uuringute põhjal

Töömaht, Mt CO ₂ /aastas	Pikkus, km	Kulud, valuuta/tCO ₂ /pikkus	Valuuta	Allikas
2,5	180	5,4	2009 EUR	ZEP (2011) [17]
3,0	250	3,0–5,0	2002 USD	IPCC (2005) [13]
				Rubin jt (2015) [18]
3,0	250	4,3–7,2	2013 USD	modifikatsioon IPCC (2005) [13]
3,0	250	10,9	2013 USD	ZEP (2011) [19]
3,0	250	4,9	2013 USD	USDOE (2014) [20]
3,2	~160	3,1	2011 USD	USDOE (2014) [20]
10	250	1,5–2,6	2002 USD	IPCC (2005) [13]
10	180	1,5	2009 EUR	ZEP (2011) [19]
10	250	3,3	2013 USD	ZEP (2011) [19]
				Rubin jt (2015) [18]
10	250	2,2–3,7	2013 USD	modifikatsioon IPCC (2005) [13]
30	250	0,9–1,5	2002 USD	IPCC (2005) [13]
30	~160	1,1	2011 USD	USDOE (2014)
				Rubin jt (2015) [18]
30	250	1,3–2,2	2013 USD	modifikatsioon IPCC (2005) [13]
30	250	1,7	2013 USD	USDOE (2014) [20]

Tabel 3. CO₂ transportimise kulud sõltuvalt veokaugusest [21]

Kaugus, km	<50	50–200	200–500	500–2000	>2000
USD ₂₀₀₅ /tCO ₂	0,05–3,2	0,11–18	0,68–49	1,6–200	6–216
USD ₂₀₀₅ /tCO ₂ /km	0,002–0,130	0,001–0,144	0,002–0,139	0,001–0,160	0,002–0,072

2.4 CO₂ ladustamise aspektid

Süsinikdioksiidi ladustamise viisid saab liigitada nn looduslikeks või tehisliseks. Looduslik ladustamine hõlmab atmosfäärist süsiniku eemaldamist fotosünteesi teel ja erinevate karbonaatsete mineraalide keemiline ja /või biokeemiline sadenemise teel. Ülevaade ladustamise võimalustest on esitatud lisas „CO₂ transport ja ladustamine“

Energeetikas tekkiva CO₂ püüdmisel ja järgneval ladustamisel tuleb kasutada tehislise ladustamisviise. Nende all vaadeldakse peamiselt eraldatud ja eel-kontsentreeritud süsinikdioksiidi ladustamist maa-alustes geoloogilistes struktuurides ja selle sidustamist geokeemiliselt-mineraalselt silikaatsete tard- ja moondekivimite töötlemisel või kasutades mineraalset sidustumist tööstusjäätmetega.

Suuremas mastaabis kasutatakse geoloogilist ladustamist. CO₂ geoloogilise ladustamise kulud on väga varieeruvad olenevalt reservuaari eripäradest [18]. Veelgi enam, ladestuskoha tüüp, sügavus ja geoloogilised omadused mõjutavad puuraukude arvu, paigutust ja maksumust, samuti seotud rajatiste maksumust [13]. Ligikaudne kulu ühe tonni CO₂ ladustamiseks on varasemate uuringute põhjal

vastavate uuringute koostamise ajal ja valuutas taustainfoks toodud Tabel 4 – kuna tegemist on eri ajal, tingimustel ja eeldustel (sh järelhoolduse ja seire vajaduse osas) koostatud ladustamise kulu hinnangutega, ei ole need omavahel üheselt võrreldavad ega üle kantavad tänapäeva Eesti oludesse. Täpsem ülevaade ladustamise hetkeolukorrast on toodud lisas „CO₂ püüdmise ja ladustamise hetkeolukord“.

Tabel 4. CO₂ ladustamise kulu varasemate uuringute põhjal

Asukoht	Kulu valuuta/tCO ₂	Valuuta	Hoiukoha tüüp	Allikas
Maismaal	0,5-8,0	2002 USD		IPCC (2005)
Maismaal	1,9-6,2	2002 USD	Soolane kihtkond	Allinson et al. (2003) [22], IPCC (2005) [13] kaudu
Maismaal	2-18	2013 USD	Ammendunud nafta/gaasi- maardla – puuraukude taaskasutamine	ZEP (2011) [19]
Maismaal	1-7	2009 EUR		ZEP (2011) [19]
Maismaal	1-10	2009 EUR	Ammendunud nafta/gaasi- maardla – puuraukusid ei taaskasutata	ZEP (2011) [19]
Maismaal	2-12	2009 EUR	Soolane kihtkond	ZEP (2011) [19]
Maismaal	7-13	2011 USD	Soolane kihtkond	USDOE (2014) [20]
Maismaal	6-13	2010 USD		GCCSI (2011) [23]
Maismaal	1,64-4,02	2017 USD	CO ₂ -EOR käigus	Godec et al. (2017) [24]
Maismaal	9,02-21,13	2017 USD	Pärast CO ₂ -EOR	Godec et al. (2017) [24]
Avamerel	4,7-12,0	2002 USD	Soolane kihtkond	Hendriks et al. (2002) [25], IPCC (2005) [13] kaudu
Avamerel	2-9	2009 EUR	Ammendunud nafta/gaasi- maardla – puuraukude taaskasutamine	ZEP (2011) [19]
Avamerel	3-14	2009 EUR	Ammendunud nafta/gaasi- maardla – puuraukusid ei taaskasutata	ZEP (2011) [19]
Avamerel	6-20	2009 EUR	Soolane kihtkond	ZEP (2011) [19]
Avamerel	0,79-2,36	2017 USD	CO ₂ -EOR käigus	Godec et al. (2017) [24]
Avamerel	5,21-12,09	2017 USD	Pärast CO ₂ -EOR	Godec et al. (2017) [24]

3 CO₂ kasutamine tööstuses

3.1 CO₂ keemiatööstuse lähteainena

3.1.1 Lühiülevaade

Alternatiiviks ladustamisele on CO₂ kasutamine. CO₂ võib kasutada otse või muundada teisteks ühenditeks [26]. Muundamise all mõistetakse CO₂ keemilist ja/või füüsikalist muutmist erinevateks süsinikku sisaldavateks aineteks/materjalideks. CO₂ kasutamise tehnoloogiad on tavaliselt jaotatud kolme rühma: keemilised, bio-põhised ja mineraliseerivad.

Selliste tehnoloogiate hindamisprotsess põhineb paljudel kriteeriumitel, mis hõlmavad tehnoloogia valmidust, skaleerimise potentsiaali, ökonoomilisi näitajaid, CO₂ vähendamise potentsiaali ja keskkonna-, tervise- ning sotsiaalseid mõjusid. Need kriteeriumid ei ole tehnoloogia hindamisel sama kaaluga. Kaalud sõltuvad veel geograafilisest piirkonnast (turgude tooraine kaugusest ja muudest erisustest), riigist jms. Kõiki neid faktoreid on arvesse võetud väljatöötatud matemaatilistes hindamismudelites [27]. Erinevate kemikaalide tootmisega kaasnev potentsiaalne CO₂ sidumine on esitatud tabelis 5.

CO₂-st hüdrogeenimise teel saadava taastuva **metanooli** tehnoloogiat on rakendatud George Olah CRI (Carbon Recycling International) tehases Islandil [28].

CO₂-st ja vesinikust **metaani** valmistamine (metaniseerimissüntees) on Audi poolt ehitatud tehases viidud kommertsiaalse tootmiseni (Audi e-gas process) [29].

Sünteesgaas (ingl *syngas*) on süsinikoksiidi ja vesiniku segu, mis on oluline vaheprodukt paljude kemikaalide saamisel. Väidetavalt pole see siiski eraldi müügiartikkel [30]–[32].

Kuigi CO₂-st **dimetüülkarbonaadi** valmistamise meetodeid on kirjeldatud mitmeid, ei ole seda tööstuslikus mahus eraldi toodetud, vaid on kasutatud edasises tehnoloogilises protsessis. Välja on arendatud meetod, mis põhineb metanooli ja etüleenoksiidi kasutamisel [33]. Samuti valmistatakse dimetüülkarbonaati vaheproduktina Asahi Kasei Corporation'i polükarbonaatide valmistamise tehnoloogias [30]. Tegemist on märkimisväärse tööstusliku tootmiseni viidud kompleksse fosgeenivaba **polükarbonaatide** tootmise tehnoloogiaga, kus kasutatakse etüleenoksiidi ja CO₂ [30]. Asahi Kasei Corporation'i meetodit on müüdnud paljudesse riikidesse.

Mõnede oluliste kemikaalide (**metaanhape, etüleenglükool**) tootmise jaoks on loodud labori-prototüübid ja ka pilootprojektid [27].

CO₂-st **metaanhappe** elektrokeemilise valmistamisega on Norra firma DNV jõudnud pilootfaasi [34].

Firma Bayer (Covalesto) on keskendunud mitmesuguste monomeeride tootmisele polümeeride tööstuse jaoks, nagu näiteks **polüoolid polüuretaanide tootmiseks** [26], [35], [36].

Paljude CO₂-l baseeruvate ühendite (**karboksüülhapped, karbamaadid, formaldehüüd, isotsüanaadid** jt) tootmise tehnoloogiad on praegu veel arendusfaasis [37].

Mitmete oluliste ühendite tootmine CO₂-st eeldab vesiniku kasutamist. Väidetavalt on 96% praegu toodetavast vesinikust saadud fossiilsete kütuste baasil [38]. Seetõttu sõltuvad CO₂-e tööstuses rakendamise mahud oluliselt taastuvenergia baasil toodetud vesiniku hinnast ja tootmisvõimekusest [39]. Seda olukorda parandavad vee elektrolüüsi alal tehtavad intensiivsed arendustööd [31], [38]–[41].

Mitmete CO₂ rakenduste korral on ka teisi olulisi, enamasti fossiilsel toorainel (või energial) põhinevaid lähteaineid nagu ammoniaak, epoksiidid jmt, kuid nende asendamine taastuvate lähteainetega (keemilised, biotehnoloogilised meetodid) pole praegu veel jõudnud tööstuslike rakendusteni.

Ka keemiatööstuse vajadusteks piisava puhtusega CO₂ saamine võib olla probleemiks. Põlemisgaasid ei ole enamasti otseselt kasutatavad või neid tuleb põhjalikult puhastada. Samas on olemas ka tehnoloogiaid, mille jäägina saadakse puhast CO₂, näiteks ammoniaagi, vesiniku ja epoksiidide tootmine.

Järgnevas tabelis on andmed erinevate kemikaalide tootmisega kaasneva CO₂ sidumise potentsiaali kohta.

Tabel 5. Erinevate kemikaalide tootmisega kaasnev potentsiaalne CO₂ sidumine [27]

CO ₂ -l põhinev ühend	Toodang, Mt aastas	Erimass tCO ₂ /t produkt	CO ₂ sidumise potentsiaal, Mt aastas
Metaan ^a	1100-1500	2,750	3000-4000
Uurea	180,00	0,735	132,300 ^b
Kaltsiumkarbonaat	113,90	0,439	50,002
Etanool	80,00	1,911	152,880
Metanool	65,00	1,373	89,245
Naatriumkarbonaat	62,00	0,415	25,730
Mikrovetikad ^c	35,00	1,800	63,000
Metanaal	21,00	1,450	30,450
Magneesiumkarbonaat	20,50	0,261	5,350
Polüuretaan	15,00	0,300	4,500
Dimetüüleeter	11,40	1,911	21,785
Etaanhape	10,25	0,733	7,513
Akrüülhape	5,85	0,611	3,574
Polükarbonaadid	5,00	0,173	0,865
Dimetüülkarbonaat	1,60	1,466	2,346
Metaanhape	1,00	0,956	0,956
Etüleenkarbonaat	0,20	0,499	0,099
Propüleenkarbonaat	0,20	0,431	0,086
Salitsüülhape	0,17	0,319	0,054 ^b
Kokku ligikaudu 460 Mt aastas ^d			

^a metaan: maagaasi turg (2017): 3764 bcm (miljardit kuupmeetrit). Metaanisisaldus varieerub 70% ja 90% mahuprotsendi vahel.

^b uurea ja saltsüülhape: toodetakse praegu CO₂-st, järelikult puudub CO₂ vähendamise potentsiaal.

^c mikrovetikad: 35 Mt aastas (kuivmass).

^d välja arvatud CO₂ metaani, uurea ja salitsüülhappe rakendusteks.

Globaalselt ei ole praegu oluline osa emiteeritavast CO₂-st praktikas kinnipüütav. Raskesti püütav on CO₂ transpordisektoris (ligikaudu 25%), elamute ja mitmesuguste teenuste korral (ligikaudu 30%), samuti põllumajanduses, metsanduses ja energiatööstuses (mitte elektri ja soojuste tootmine) (15%) [42].

Hinnanguliselt on võimalik kasutada (CCU) ca 10–12% kogu emiteeritavast CO₂-st [43], [44]. Viimasel ajal on otsesed CO₂ õhust püüdmise tehnoloogiad teinud edusamme, võimaldades võtta kasutusse ka mitmesuguste hajusalt paiknevate või mobiilsete emiteerijate poolt genereeritud CO₂ [45], [46].

CO₂ kasutamise tehnoloogiate valmidust võib hinnata sama skaalaga nagu CO₂ püüdmistechnoloogiate puhul (ingl *Technology Readiness Levels* ehk tehnoloogia valmidustasemed, TVT). Tulenevalt vajadusest vähendada põlevkivisektori CO₂ heitme kogust lähimas tulevikus, võeti käesolevas aruandes vaatluse alla ainult sellised kemikaalide tootmise tehnoloogiad, mille TVT oli 8–9. Kemikaalid mille tootmistehnoloogiaid vaadeldakse on järgnevad: salitsüülhape, urea, tsüklilised karbonaadid, dimetüülkarbonaat, polüoolid, polükarbonaadid, metanool.

Vastavalt tehnoloogiate CO₂ sidumise potentsiaalile järjestuvad need järgmiselt (Mt CO₂ aastas):

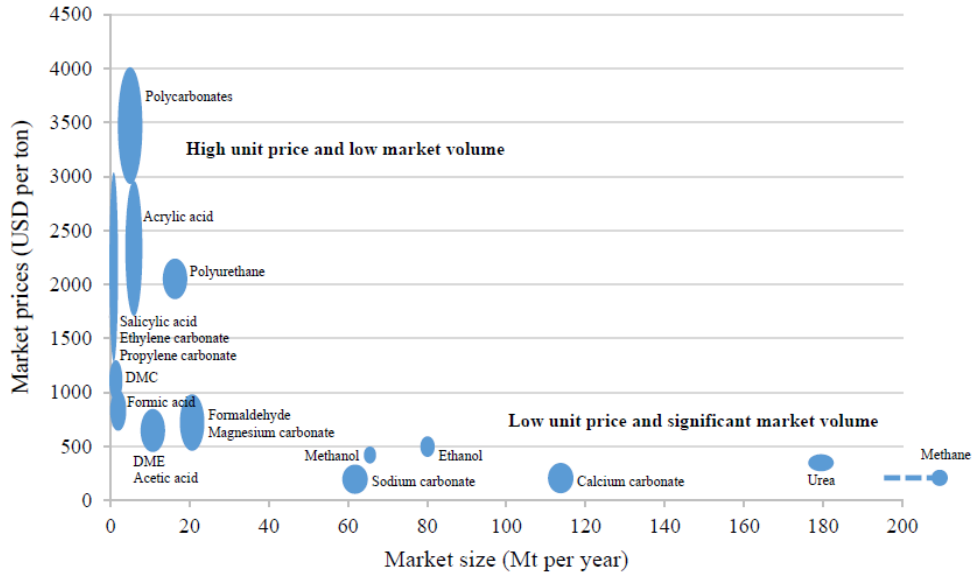
urea:	132,30
metanool:	89,245
polüuretaan:	4,50 (polüoolide kohta võrreldavaid andmeid pole leitud)
dimetüülkarbonaat:	2,346
polükarbonaat:	0,865
etüleenkarbonaat:	0,099
propüleenkarbonaat:	0,086
salitsüülhape	0,054

Kuna ureat ja salitsüülhapet toodetaksegi praegu CO₂ baasil, siis nende tootmisel on CO₂ sidumise kasvupotentsiaal suhteliselt väike ja väljendub ainult aastase toodangu kasvus. Praegu kasutatakse ligikaudu 130 Mt CO₂ aastas urea, polükarbonaatide ja salitsüülhappe tootmiseks, millest põhiosa kuulub urea tootmisele [47].

Kokku on CCU tehnoloogiate rakendusest tuleneva CO₂ sidumise prognoositav ulatus ca 500 Mt aastas, millest on välja jäetud CO₂ kasutamine metaani, urea ja salitsüülhappe tootmiseks (kuna see on juba tootmises). Samas on prognoositav seotav (CCU) CO₂ kogus väga väike, võrreldes inimtegevusega igal aastal genereeritava ca 37 Gt CO₂ kogusega (1,4%), kuid see on siiski oluline (mõnedel andmetel on see protsent väiksem) [27].

3.1.2 Turu maht ja väärtus

Toodete turu maht ja väärtus on eraldi hinnatavad olulised parameetrid. Seda kirjeldab CO₂-l baseeruvate ühendite jaoks järgmine joonis 4 [27], [43].



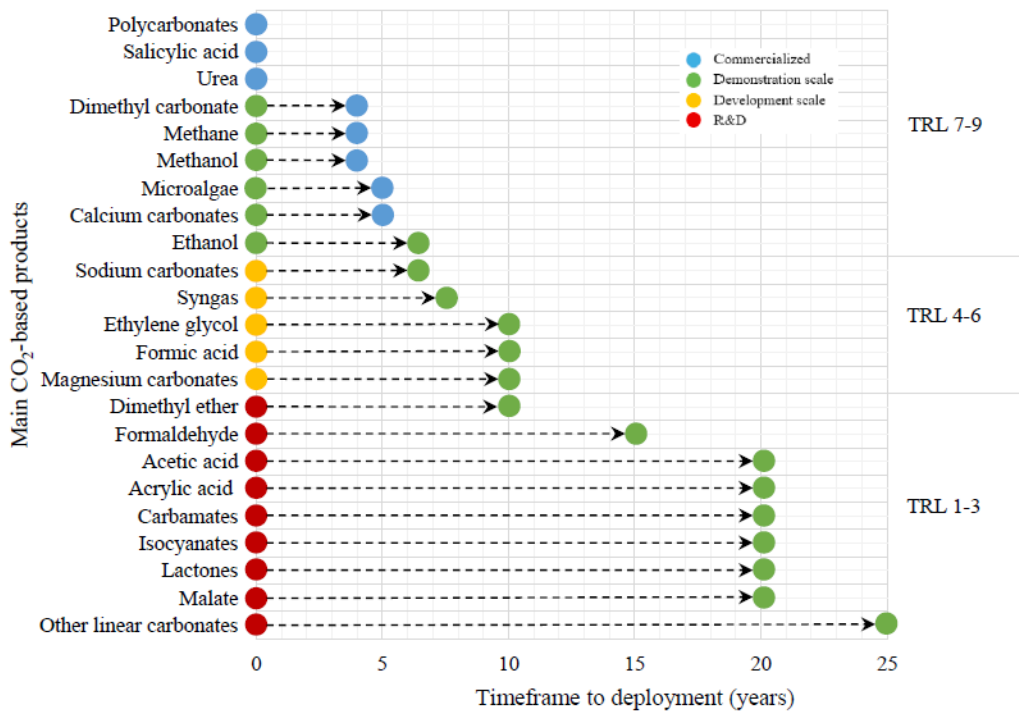
Joonis 4. Põhiliste CO₂-põhiste ühendite väärtus ja turu maht [43]

Tabel 6. Tehnoloogiate hindamise kriteeriumid 3E [48]

Kriteerium	Tulemuslikkuse põhinäitaja
1 Tehniline võimekus	Tehnoloogiline valmidus Geograafilised piirangud Fossiilivaba toimimine
2 Majanduslik võimekus	Turu suurus Konkurentsivõimelisus teiste tehnoloogiatega Suhteline lisandväärtus
3 Keskkonna-, tervise- ja ohutusvõimekus	CO ₂ sidumispotentsiaal Keskkonnapotentsiaal Tervis ja ohutus

Tehnoloogiate hindamise kriteeriumid on tabelis 6. Enamik CCU tehnoloogiaid on praegu varase arengu faasis [27].

Järgnev joonis (Joonis 5) iseloomustab põhiliste CO₂-l baseeruvate protsesside tehnoloogiate valmidustasemeid [27]. Joonis on koostatud erinevate autorite analüüside tulemustel ja kirjanduse ülevaadetel [34], [48]–[51].



Joonis 5. Põhiliste CO₂-l baseeruvate produktide tehnoloogia valmidustasemed. Joonis baseerub Ampelli [35] ja Quadrelli [52] töödel

Joonis 5 on näha, et tehnoloogia jõudmiseks laborist tööstusliku tootmiseni kulub tavaliselt 10–15 aastat. Erinevate kemikaalide CO₂-l baseeruvate valmistamistehnoloogiate ülevaade on tabelis 7.

Tabel 7. Ülevaade erinevate kemikaalide CO₂-l baseeruvate valmistamistehnoloogiate kohta 3E hinnangu kohaselt (4 on kõige “parem”) [27]

		Methanol	Methane	Formic acid	Calcium carbonate	Sodium carbonate	Ethanol	Microalgae	Dimethyl carbonate	Polycarbonate	Salicylic acid	Syngas	Urea
3E Performance criteria													
Engineering performance	<i>Technological maturity</i>	4	3	1	2	1	2	3	4	4	4	1	4
	<i>Geographical constraints</i>	2	4	0	2	2	3	3	3	3	4	2	4
	<i>Fossil-free operations</i>	2	2	4	2	2	0	4	2	0	0	2	0
Economic performance	<i>Size of the market</i>	3	4	1	4	3	4	3	1	1	0	4	4
	<i>Competitiveness with other technologies</i>	2	0	3	0	1	0	2	1	2	3	0	3
	<i>Relative added value</i>	2	2	0	2	2	0	0	4	4	4	0	4
Environmental, health and safety performance	<i>CO₂ uptake potential</i>	4	4	1	4	3	4	4	2	1	0	0	0
	<i>Environmental potential</i>	4	2	0	2	2	2	2	2	2	0	2	0
	<i>Health and safety considerations</i>	2	2	2	2	2	0	4	2	2	0	2	0

Detailsem informatsioon CO₂ sidumist võimaldavate keemiatööstuse tehnoloogiate kohta on leitav lisast „Vaadeldud CO₂ kasutustehnoloogiate üldised kirjeldused tehnilised piirangud, tehnoloogia valmidustase, efektiivsus ja teised olulised parameetrid“.

3.2 CO₂ kõrgtemperatuurne elektrolüüs CO ja sünteesgaasi tootmiseks

CO₂ elektrokeemiline redutseerimine (ehk elektroredutseerimine) kemikaalideks on paljulubav tehnoloogia ja pälvitud märkimisväärsed akadeemilist tähelepanu [53], [54]. Elektrokeemilist redutseerimist iseloomustab täpne reaktsioonikiiruste ja selektiivsuste kontrolli ja skaleerimise võimalus ning sobivus taastuenergiaallikatega [54].

Uuritakse ja arendatakse erinevaid võimalusi elektrokeemilise redutseerimise teostamiseks. Näiteks membraanreaktorite rakendamine võimaldab vältida protsessi saaduste reoksüdeerumist, ionsete vedelike kasutamine võimaldab paremat CO₂ lahustumist ja laiemat tööpotsentsiaali vahemikku, kus ei leia aset segavaid protsesse [55]. Nimetatud süsteemid on madaltemperatuursete ja siiani demonstreeritud laboratoorses skaalas [54]. CO₂ elektroredutseerimisprotsessi silmas pidades on tehnoloogilises mõttes märkimisväärselt kõrgemale tasemele arendatud kõrgtemperatuursete membraanreaktorid [56].

CO₂ elektrolüüsi on võimalik teostada kõrgtemperatuursetel keraamilisel oksiidioonjuht- või prootonjuhtmembraanil põhinevas reaktoris. Enamlevinud ja kõrgemale TVT-le on arendatud siiski oksiidioonjuhtmembraanidel põhinevad süsteemid, milles võib läbi viia: a) **puhta CO₂ kõrgtemperatuurset elektrolüüsi**; b) **CO₂ ja H₂O kaaselektrolüüsi**. Lisaks võib tinglikult siia liigitada ka tehnoloogia, milles kasutatakse (**kõrg- või madaltemperatuurset**) **elektrolüüsil valmistatud vesinikku ning läbi pööratud vesigaasi nihkereaktsiooni toodetakse CO-d**, mida vesinikuga segades saadakse väärtuslik sünteesgaas. Keraamilisel prootonjuhtmembraanil põhinevate kaaselektrolüüserite stabiilsuse kohta on vähe informatsiooni [57] ja nad on veel valdavalt laboratoorse testimise faasis.

3.2.1 CO₂ kõrgtemperatuurne elektrolüüs

Nagu eelpool öeldud, on **CO₂ kõrgtemperatuurset elektrolüüsi** võimalik teostada nii keraamilise oksiidioonjuhtmembraaniga kui ka keraamilise prootonjuhtmembraaniga elektrolüüseris. Viimased süsteemid on laboratoorse arendamise järgus [56].

Oksiidioonjuhtmembraanil põhinevatest kõrgtemperatuursetest CO₂ elektrolüüsisüsteemidest on praeguseks arendatud 9.TVT-le ütriumstabiliseeritud tsirkooniumoksiidist (YSZ) keraamilisel elektrolüütmembraanil põhinevad süsteemid. Sellised tahkeoksiidsed membraanreaktorid võivad põhimõtteliselt töötada nii kütuseelemendina kui ka elektrolüüserina. Kõrgtemperatuursete CO₂ elektrolüüseri katoodiruumis tekib CO-rikas gaasisegu, milles on teatud kogus CO₂, ja anoodiruumis O₂-rikas õhk. Selliste kõrgtemperatuursete elektrolüüserisüsteemide elektriline efektiivsus jääb vahemikku 50–70% [58], mis on madaltemperatuursete süsteemidega võrreldes märkimisväärselt hea. Summaarne efektiivsus sõltub erinevatest parameetritest (nt töötemperatuur, elektrolüüsil rakendatud pinge, gaasirõhud, gaasisegude koostised jne), mida valides tuleb silmas pidada elektrolüüseri degradatsioonikiirust valitud tingimustel, gaaside järelkontsentreerimise hindasid jne.

3.2.2 CO₂ ja H₂O kõrgtemperatuurne kaaselektrolüüs

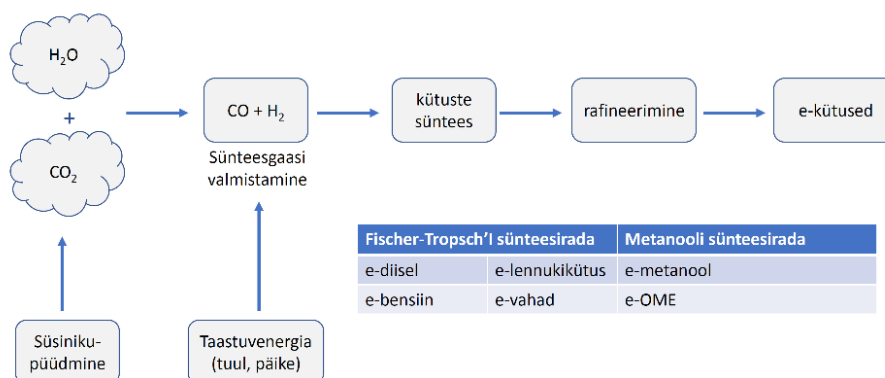
Kõrgtemperatuurne CO₂ ja H₂O kaaselektrolüüs viiakse sarnaselt puhta CO₂ elektrolüüsile läbi keraamilisel oksiidioonjuhtmembraanil või prootonjuhtmembraanil põhinevas membraanreaktoris. Keraamilisel prootonjuhtmembraanil põhinevate kaaselektrolüüserite stabiilsuse kohta on väga vähe informatsiooni [57] ja nad on veel valdavalt laboratoorse testimise faasis.

Oksiidioonjuhtmembraanreaktori versioone on mitmesuguseid, kuid parimate stabiilsustulemusteni on jõutud ütriumstabiliseeritud tsirkooniumoksiidil (YSZ) põhineva süsteemiga. Erinevalt CO₂

kõrgtemperatuursest elektrolüüsist redutseeritakse vesi ja CO₂ kaaselektrolüüseri katoodil H₂-ks ja CO-ks. Lisaks nimetatud elektrokeemilistele reaktsioonidele leiab elektrodil aset ka pööratud vesigaasi nihkereaktsioon (ingl *reverse water gas shift* – RWGS). Tõenäoliselt leiabki suur osa CO₂-e CO-ks muundamisest aset läbi selle paraleelreaktsiooni [57].

3.2.3 Vedelkütuste tootmine CO₂-st ja taastuvenergiast

Kombineerides nn rohelisest elektrist toodetud vesiniku ja kõrgtemperatuurse CO₂ ja H₂O kaaselektrolüüsis tekkivat CO-d, saadakse sünteesgaas. Sünteesgaasi on võimalik toota ka vesiniku ja CO₂ pööratud vesigaasi nihkereaktsioonil ja sellest on võimalik toota vedelkütuseid, kasutades kas Fischer-Tropschi rada või metanooli rada (Joonis 6).



Joonis 6. Vedelkütuste valmistamine CO₂-st, H₂O-st ja elektrienergiast

Lisaks vedelkütustele võib sünteesgaasist toota ka mitmesuguseid kemikaale, plastiku, väetisi või kasutada sünteesgaasi otse kütusena turbiinides, sisepõlemismootorites ja kütuseelementides.

Detailsem informatsioon CO₂ kõrgtemperatuurisel elektrolüüsil baseeruvate tehnoloogiate kohta on lisas „Vaadeldud CO₂ kasutustehnoloogiate üldised kirjeldused tehnilised piirangud, tehnoloogia valmidustase, efektiivsus ja teised olulised parameetrid“ 2. peatükis.

3.3 CO₂ kasutamine biotehnoloogia tööstuses

3.3.1 Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamine kütuste ja kemikaalide tootmiseks

Eelnevalt kirjeldatud viisidel saadud sünteesgaasi on võimalik kombineerida gaasfermentatsiooniga. Nii saadakse kaheastmeline tehnoloogia, kus esimeses astmes saadud sünteesgaas juhitakse gaasfermentatsiooni läbiviimiseks kas ühte bioreaktorisse, kus kasutatakse ühte atsetogeenset bakteriliiki, või kahte järjestikusesse bioreaktorisse, kus kasutatakse erinevaid atsetogeenseid bakteriliike. Ühe atsetogeense bakteriliigi kasutamisel on hetkel tööstusskaalas näidatud etanooli, atsetooni, isopropanooli ning 2,3-butaandiooli tootmise võimalikkus; kasutades kahte erinevat atsetogeeni, toodab üks bakter sünteesgaasist näiteks äädikhapet, mille teine bakter omakorda teises reaktoris konverteerib alkoholideks (nt heksanool, butanool).

3.3.2 Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamine metaani ja soojuse tootmiseks

Lisaks erinevate alkoholide ja ketoonide tootmisele on olemas 1- ja 2-astmeline tehnoloogia metaani ja soojuse koostootmiseks. Tööstusskaalas on seni demonstreeritud 2-astmelist tehnoloogiat, kus kasutades elektrienergiat rakendatakse esmalt elektrolüüsi H₂ tootmiseks ja seejärel fermentatsiooni

H₂ ning eraldi lisatava CO₂ konverteerimiseks metaaniks ja soojuseks, kasutades metanogeenseid arhebaktereid (ld *methanogenic archaea*).

3.3.3 CO₂ fototroofiline muundamine kütusteks ja kemikaalideks

Mitmed bakterid ja vetikad (tsüaanobakterid, mikroobsed mikrovetikad ning eukarüootsed makrovetikad) suudavat konverteerida CO₂ fototroofiliselt kütusteks ja kemikaalideks. Seejuures kannatavad mitmed vetikaliigid kuni 150 ppm NO_x ja SO_x tasemeid kasvukeskkonnas [37], mis tähendab, et puhastatud suitsugaasi saab kasutada otsese CO₂ allikana protsessis. Protsessi sisendiks on CO₂, O₂, valgus, vesi ja mineraalsed söötmekomponendid. Väljunditeks võivad olla peamiselt biomassi akumulatsioonid lipiidid, bioplastikute polümeerid, biomass kui sööt ja muud kemikaalid [59], [60].

Tehnoloogiat on arendatud juba alates teisest maailmasõjast ning kasutusel on olnud peamiselt biomassi kasvatamine lahtistes tiikides või kinnistes bioreaktorites. Tehnoloogiate põhiprobleemideks on tundlikkus keskkonnatingimuste muutuste suhtes ja äärmiselt madal efektiivsus – kogu *solar-to-fuels* protsessi energia saagis on vaid 1,5% ringis. Seetõttu ei ole kummagi lahendusega siiani tehnoloogia kommertsialiseerimise lähedale veel jõutud [59], [61] ning arvestades Eesti geograafilist asukohta on selle tehnoloogia rakendamine siin keeruline.

Detailne informatsioon CO₂ kasutamise kohta biotehnoloogiatööstuses on toodud lisa „Vaadeldud CO₂ kasutustehnoloogiate üldised kirjeldused tehnilised piirangud, tehnoloogia valmidustase, efektiivsus ja teised olulised parameetrid“ 3. peatükis.

3.4 CO₂ kasutamine taimekasvatuses

Taimed on olulised CO₂ sidujad. Taimede jaoks on CO₂ toiteaine, mis fotosünteesi käigus assimileeritakse orgaaniliseks aineks ja seetõttu sõltub taimekasv kasvukeskkonna CO₂ kontsentratsioonist. On tõestatud, et kasvuhoone rikastamine CO₂-ga soodustab taimede kasvu, suurendab saagikust ja saagi kvaliteeti ning lühendab kasvatamiseks vajalikku perioodi [62].

Head valgustingimustes ja 350–400 ppm CO₂ kontsentratsiooni juures tarbivad taimed kuni 50 kg CO₂/ha/h ning tõstetud CO₂ kontsentratsiooni juures kuni 80 kg CO₂/ha/h. Kasvuhoone CO₂-ga rikastamiseks kulub sõltuvalt režiimist tavaliselt 100–300 kg CO₂/ha/h [63].

CO₂ sidumine kasvuhoones sõltub mitmetest füüsikalistest ja ka bioloogilistest teguritest. Nendeks on: **ventilatsioon** ja sellega kaasnev CO₂ leke atmosfääri – hinnanguliselt võib kuni 85% lisatud CO₂-st kasvuhoonest välja lekkida [64]; **valgustingimused** – fotosünteesi aktiivsus on suurem päikesepaistelise ilmaga [65]; **sessoonne muutlikkus** – kevad- ja suvekuudel on taimede kasv kiireim ja tootlikkus kõrgeim, on ka CO₂-ga rikastamisel suurim positiivne mõju siis [65]; **ööpäevane muutlikkus** – kasvuhoone CO₂ kontsentratsiooni tõstmine on kõige suurema mõjuga keskpäeval ja täiesti ebavajalik öisel ajal [62], [65]; **taimespetsiifilised erisused** – CO₂-ga rikastamise mõju võib suuresti varieeruda nii liigiti, sorditi kui sõltuvalt taime kasvustaadiumist.

CO₂ kasutamisel taimekasvatuses tuleb arvestada, et riiklikus statistikas ei vähendaks kasvuhoonete ja põlevkivitööstuse sümbioos Eesti süsiniku jalajälge, kuna kasvuhoonete rikastamiseks kasutatud CO₂-st kuni 85% vabaneb kohe atmosfääri ventilatsiooni ja lekete kaudu ning taimedesse seotud süsinik on fikseeritud sinna vaid kuni lagunemisprotsesside alguseni.

Täiendav info CO₂ kasutamise kohta taimekasvatuses on toodud lisas „Vaadeldud CO₂ kasutustehnoloogiate üldised kirjeldused, tehnilised piirangud, tehnoloogia valmidustase, efektiivsus ja teised olulised parameetrid“ 4. peatükis.

3.5 F-gaaside asendamine CO₂-ga

Vastavalt külmaaineid käsitleva standardi ISO 817:2014 [66] punktis 8.3 viidatud standardile AHRI 700 [67], sobib külmaainena kasutamiseks CO₂, mille minimaalne puhtus on vähemalt 99,9%, kusjuures veesisaldus peab olema alla 10 ppm ja väävlisisaldus üldjuhul alla 0,1 ppm mahuosa.

Eestis ehitatakse uusi CO₂süsteeme peamiselt lähtuvalt määruse (EL) nr 517/2014 III lisa keelust nr 13, mis ei luba 40 kW ja suurema jahutusvõimsusega kahe või enama kompressoriga kaupluste külmasüsteeme ehitada üle 150 GWP-ga HFC-dega. Reaalselt need süsteemid ehitatakse praegu ja tulevikus transkriitilise CO₂ booster-süsteemidena. Alla 40 kW CO₂ külmasüsteemid ei ole väga populaarsed, kuna madala GWP-ga HFC-dega seadmed on oluliselt odavamad ja energiasääst ei ole nii märgatav kui suurte seadmete puhul.

Aastatel 2020–2030 ehitatakse prognoositavalt uusi CO₂ külmasüsteeme kogujahutusvõimsusega ca 35 000 kW, mille esmaseks CO₂-ga täitmiseks oleks vaja 52,5 tonni CO₂-e.

Täiendav ja detailne info CO₂ kasutamise kohta külmutusagensina on toodud lisas „Vaadeldud CO₂ kasutustehnoloogiate üldised kirjeldused tehnilised piirangud, tehnoloogia valmidustase, efektiivsus ja teised olulised parameetrid“ 5. peatükis.

3.6 Täiendavad ja täpsustavad kommentaarid kemikaalipuhtusega ja toidupuhtusega CO₂ sobivuse kohta lähteainena kasutamiseks

Kõigi käesolevas aruandes käsitletud tehnoloogiate korral hinnati, milline CO₂ puhtusaste on tehnoloogia rakendamiseks vajalik. Hinnangud erineva puhtusega CO₂ kasutatavuse kohta erinevate CCU tehnoloogiate korral tuginevad kirjanduses leiduvale infole ja CCU tehnoloogia pakkujate väidetele.

Kerr-McGee / ABB Lummus Crest või analoogse tehnoloogia (amiiniprotsess) rakendamisel on suitsugaasid võimalik puhastada nii kemikaalipuhtusele (ingl *chemical grade*) kui ka toidupuhtusele (ingl *food grade*) [68]. Avaliku info põhjal ei ole võimalik hinnata amiiniprotsesside rakendamisel saadavas CO₂ voos sisalduvate mikrolisandite kontsentratsioone. Mikrolisandid on aga mitmete CO₂ kasutamise tehnoloogiate rakendatavuse hindamisel otsustava tähtsusega. Täpsed mikrolisandite kontsentratsioonid sõltuvad mikrolisandite kogustest lähtematerjalis. On teada, et adsorbentidega saab elimineerida ligikaudu 95% mikrolisanditest [69].

Järgnevalt tuuakse kõigepealt ära prognoositava kemikaali- ja toidupuhtusega gaaside koostised, millest lähtuti, ja siis hinnangud kasutatavusele erinevates CCU tehnoloogiates (tabelid 8-11).

Tabel 8. Proгноositav Kerr-McGee / ABB Lummus Crest tehnoloogia rakendamisel saadav kemikaalipuhutusega CO₂ gaasisegu koostis

Komponent	Osakaal
CO ₂ massi% min	99,99*
Väevliühendid	< 1 ppm
NO _x	5 ppm
O ₂	< 1 ppm
N ₂ ja Ar	80 ppm
Süsivesinikud	10 ppm
CO	< 1ppm
Vesi	Küllastatud
Löhn	Ei analüüsita

*Arvutatuna veevabalt

Tabel 9. Arvutuslikult saadud mikrolisandite ligikaudsed kontsentratsioonid ppm-ides pärast gaasi puhastamist adsorberites

Komponent	Enefit-280	Petroter	EEJ8	TP-101	Auvere
As	1,9·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁵	5,7·10 ⁻⁶	9,4·10 ⁻⁵
Hg	1,8·10 ⁻⁶	2,6·10 ⁻⁶	1,8·10 ⁻⁵	1,7·10 ⁻⁵	3,0·10 ⁻⁶
Cd	5,0·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁶	4,0·10 ⁻⁷	1,4·10 ⁻⁶	3,0·10 ⁻⁷
Cr	1,3·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻⁴	9,2·10 ⁻⁵	2,7·10 ⁻⁴
Ni	6,3·10 ⁻⁵	6,1·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻⁵	2,9·10 ⁻⁵	1,5·10 ⁻⁴
Pd	1,4·10 ⁻⁵	1,3·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁵	8,0·10 ⁻⁶	5,6·10 ⁻⁵
Zn	3,0·10 ⁻³	7,3·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻³	2,1·10 ⁻⁴	6,7·10 ⁻³
V	5,4·10 ⁻⁵	5,3·10 ⁻⁵	5,1·10 ⁻⁵	2,8·10 ⁻⁵	2,4·10 ⁻⁴
Cu	1,2·10 ⁻⁴	1,4·10 ⁻⁴	5,3·10 ⁻⁴	1,3·10 ⁻⁴	2,1·10 ⁻⁴

Tabel 10. Proгноositav gaasisegu koostis pärast Kerr-McGee / ABB Lummus Crest tehnoloogia rakendamist CO₂ puhastamiseks toidupuhtusele

Komponent	Sisaldus
CO ₂ massi% min	99,995
Väevliühendid	< 1 ppm
NO _x	< 1 ppm
O ₂	< 1 ppm
N ₂ ja Ar	< 10 ppm
Süsivesinikud	< 5 ppm
CO	< 1 ppm
Vesi	< 10 ppm
Löhn	Puudub

Mikrolisandite ligikaudsed kontsentratsioonid ppm-ides pärast gaasi puhastamist adsorberites oleksid samad nagu kemikaalipuhutuse korral.

Tabel 11. Erinevate CCU tehnoloogiate kasutatavus erinevatele puhtusastmetele puhastatud CO₂ korral

Tehnoloogia	Kemikaalipuhitussega CO ₂	Toidupuhitusega CO ₂
Salitsüülhappe tootmine	Pigem ei ole kasutatav	On kasutatav
Uurea tootmine	Pigem ei ole kasutatav	On kasutatav
Dimetüülkarbonaadi tootmine	Pigem ei ole kasutatav	On kasutatav
Polükarbonaatide tootmine	Pigem ei ole kasutatav	On kasutatav
Metanooli tootmine	Pigem ei ole kasutatav	On kasutatav
Polüoolide tootmine	Pigem ei ole kasutatav	On kasutatav
Puhta CO ₂ elektrolüüs	Ei ole kasutatav	On kasutatav*
CO ₂ ja H ₂ O kaaselektrolüüs	Ei ole kasutatav	On kasutatav*
Vedelkütused CO ₂ -st ja elektrolüüsitud H ₂ -st	Ei ole kasutatav	On kasutatav*
Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamine CO ₂ -st kütuste ja kemikaalide tootmiseks	Ilmselt on kasutatav	On kasutatav
Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamine CO ₂ -st metaani ja soojuse tootmiseks	Võib-olla sobib (vaja testida konkreetse gaasisegu korral)	Võib-olla sobib (vaja testida konkreetse gaasisegu korral)
CO ₂ fototroofiline konverteerimine kütusteks ja kemikaalideks	On kasutatav, kui segada juurde õhku nii, et CO ₂ kontsentratsioon oleks 12% või väiksem	On kasutatav, kui segada juurde õhku nii, et CO ₂ kontsentratsioon oleks 12% või väiksem
CO ₂ kasutamine taimekasvatuses	Ei ole kasutatav	Ei ole kasutatav
F-gaaside asendamine CO ₂ -ga	Ei ole kasutatav	Kasutatav

*ilmselt vajalik veel täiendav väävläärastus

Lähtuvalt toodud CO₂ parameetritest, võib välja tuua järgmised olulised aspektid:

- 1) Kemikaalipuhitusega CO₂ toorainena kasutatavuse kohta keemiatööstuses midagi väga kindlat väita ei saa, kuna puuduvad teadustööd, kus huvi pakuva lisanditesisaldusega CO₂ oleks püütud ja võrdlevalt testitud. Üldistele orgaanilise sünteesi teadmistele toetudes võib väita, et veega küllastunud CO₂ keemiasse ilmselt ei sobi. Kui vee kontsentratsioon on 3% (vastab 25 °C), siis seda on liiga palju. Raskmetallide sisaldus ei tohiks üldiselt takistada püütud CO₂ kasutamist toorainena. Keemiatoodetes ei satu need otseselt kontakti inimese või keskkonnaga, vaid püsivad tootes. Probleeme võiks tekkida nende toodete utiliseerimisel, kus võib toimuda raskmetallide kontsentreerumine. Eelnevast tuleneb, et CO₂ toorainena kasutamise korral oleks toidupuhtusega CO₂ eelistatud – põhiliselt küll veesisalduse tõttu, aga ka madalama väävlükontsentratsiooni tõttu. Juhul kui sellise CO₂ kasutamine on lubatud toiduainetetööstuses, ei tohiks tekkida takistusi ka sellest valmistatud toodete deklareerimisel toiduainetega kokkupuutuvatena. Seega salitsüülhappe, uurea, dimetüülkarbonaadi, polükarbonaatide, metanooli ja polüoolide tootmisel kemikaalipuhitusega CO₂ pigem ei ole kasutatav ja vajalik on toidupuhtusega CO₂.
- 2) CO₂ elektrolüüsil ja elektrolüüsitud vesinikul baseerual vedelkütuste sünteetil (puhta CO₂ elektrolüüs, CO₂ ja H₂O kaaselektrolüüs, vedelkütused CO₂-st ja elektrolüüsitud H₂-st) ei ole

kemikaalipuhitusega CO₂ kõrgtemperatuursete membraanreaktorite korral kasutatav. Probleeme põhjustavad väävel ja süsivesinikud. Mikrolisanditest võib probleeme tekkida arseeniga.

Toidupuhtusega gaasid on nimetatud tehnoloogia pakkuja väidete põhjal üldiselt sobilikud. Samas võib tehnoloogia pakkuja väitel väävel olla probleem isegi 10–20 ppb tasemetel korral, mis tähendab, et vaja võib olla täiendavat väävliaarastust.

CO₂ ja H₂O kaaselektrolüüsi korral ning vedelkütuste tootmisel CO₂-st ja elektrolüüsitud H₂-st on rakendatavad samad standardid.

- 3) Eri puhtustega CO₂ kasutatavuse kohta elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamisel CO₂-st kütuste ja kemikaalide tootmiseks on eeldatavasti sobivad nii kemikaalipuhitusega kui ka toidupuhtusega CO₂. NO_x-i mõju osas katsed puuduvad, kuid NO_x saab enne elektrolüüsimist redutseerida N₂-ks. Protsessi katalüsaator talub ka vähesel määral SO₂.
- 4) Elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamisel CO₂-st metaani ja soojuse tootmiseks sobivad tehnoloogiat müüva ja arendava firma Electrochaea veebilehe väitel ka hapnikus põletamise protsessi suitsugaasid. Siiski on vaja eelnevalt teha testkatseid konkreetse gaasiseadega.
- 5) CO₂ fototroofiliseks konverteerimiseks kütusteks ja kemikaalideks sobivad ilmselt ka hapnikus põletamise jääkgaasid, kuna suitsugaasi on varem piloottootmises edukalt katsetatud. Samas on sel tehnoloogial mitmeid probleeme, millest ülesaamine on väga raske (üritatud on alates 1940-ndatest aastatest).
- 6) CO₂ kasutamisel taimekasvatustes võivad jääkkomponendid ka ppb kontsentratsioonides olla taimedele fütotoksilised. Nii näiteks ei tohi NO_x kontsentratsioon sisendgaasis olla üle 16 ppb, SO₂ üle 30 ppb. Hindame käesoleva teadmise baasil toidupuhtusega CO₂ taimekasvatustes mittekõlblikuks.

4 CCS tehnoloogiate rakendatavus põlevkivitööstuses

Tehnoloogia rakendatavuse hindamist on kirjeldatud lisan „CO₂ püüdmistehnoloogiad ja nende analüüs“. Tulenevalt tehnoloogiate kohta teada olevast infost võib väita, et mõnda tehnoloogiat ei saa hetkel tööstuslikus skaalas edukalt kasutada. Tabel 12 on näidatud, millised tehnoloogiad vastavad põlevkivitööstuses kasutamise põhinõuetele.

Tabel 12. CO₂ püüdmistehnoloogiate sobivus põlevkivitööstusele

Tehnoloogia	Peab saasteainetele vastu	Valmis tööstuses kasutamiseks	Saab kasutada olemasoleval põletusseadmel
Membranid			X
Hapnikus põletamine	X	*	X
Absorptsioon	X	X	X
Mitmefaasiline absorptsioon	X		X
Adsorptsioon			X
Hapnikukandja ringlus	X		
Kaltsiumi ringlus	X		X
Krüogeenne püüdmine	X		X

*põlevkivi puhul vajab lisaandmeid

Hapnikukandja ringlust ei saa kasutada olemasolevate põletusseadmete korral (vt lisa „CO₂ püüdmistehnoloogiad ja nende analüüs“). Ilma heitgaaside täiendava puhastuseta tekitaksid mõningad põlevkivi heitgaasis sisalduvad saasteained tõenäoliselt probleeme praeguste membraanide ja adsorbentide jaoks [12], [13]. Lisaks ei ole käesolevaks ajaks välja töötatud membraanid ja adsorbendid kindlasti rakendatavad tööstuslikus skaalas.

Lähtuvalt toodud püüdmistehnoloogiate võrdluse tabelist (Tabel 12) ja gaasiliste voogude koostisest (kirjeldatud lisas „Põlevkivitööstus Eestis“), võib erinevate tehnoloogiate põlevkivitööstuses rakendatavuse kohta teha järgmised järeldused:

- Praeguse tehnoloogilise taseme juures ei ole võimalik rakendada CO₂ järelpüüdmiseks membraanprotsesse. Probleemseteks aspektideks on:
 - membraani materjali vastupidavus suitsugaasidele;
 - osakeste sisaldus suitsugaasis;
 - membraanide vähene selektiivsus;
 - madal CO₂ sisaldus suitsugaasis (kõrge N₂ sisaldus) ja madal gaaside rõhk (atmosfäärirõhk);
 - põlevkivitööstuses tekkivate töötlemist vajavate gaasivoogude suured kogused.

See tähendab, et membraanprotsessidel põhineva CO₂ püüdmistehnoloogia tööstuslikuks rakendamiseks on vaja oluliselt tõsta membraanide selektiivsust ja tootlikkust. Samas kui suitsugaas sisaldab juba üle 20 mahu% CO₂, võib osutada membraanprotsess majanduslikult atraktiivseks vaheastmeks CO₂ eraldamisel suitsugaasidest.

- KGL tehnoloogial on mitmeid eeliseid teiste CO₂ püüdmise tehnoloogiatega võrreldes. Näiteks võib tuua saadava CO₂ suure puhtuse. Oluliseks puuduseks on aga see, et ta ei ole ühildatav olemasolevate põlevkivitööstuses kasutatavate tehnoloogiatega. KGL-i rakendamine eeldaks esmalt põhjalikke alusuuringuid põlevkivi gaasistamise valdkonnas ning nimetatud tehnoloogia kasutamine uue energiatootmiskompleksi ehitamist. Seejuures on kindlasti takistuseks ka süsteemi põhimõtteline keerukus (erinevate tehnoloogiliste protsesside omavaheline toimimine), mis oli oluline põhjus esimese 8. TVT KGL tehnoloogiat rakendava energiatootmisüksuse projekti mitterealiseerumisel.
- Hapnikus põletamise protsessi on võimalik rakendada põhimõtteliselt kõikide kütustega ning see on kasutatav ka erinevate põletustehnoloogiate korral. Oma arengus on hapnikus põletamise tehnoloogia saavutanud TVT 7. Protsessi oluliseks eeliseks ongi tema lihtne rakendatavus olemasolevatele põletusseadmetele ning kõik tehnoloogias kasutatavad protsessid (ASU, vajadusel nt amiiniprotsess järelpuhastuseks) on olemas 9. TVT tasemel. Peamise probleemina on välja toodud protsessi kõrget energialõivu, mis on tingitud hapnikutootmisest krüogeense ASU-ga. Modelleerimise tulemuste põhjal on hinnatud, et hapnikus põletamise protsessi ökoloogiline jalajälg on väiksem kui näiteks KGL tehnoloogial. Täiendavalt vajab uurimist ringlevate gaaside koostise muutus pidevas hapnikus põletamise protsessis ja protsessi mõju tuhavoogudele.
- Absorptsiooniprotsess on tänapäeval laialt kasutusel keemiatööstuses (9. TVT). Samuti rakendatakse seda protsessi juba ka energeetikas (hetkel nt Boundary Dami elektrijaama 3.

plokk). Võimalik on saada suure puhtusega CO₂ voog. Mainime siinkohal, et Auvere elektrijaam peaks lepingu järgi olema projekteeritud nii, et sellele saab lisada absorptsiooni süsteemi (CO₂ järelpüüdmine). Ette on nähtud koht absorptsiooni- ja desorptsioonikolonnide ja seadmete paigutamiseks jaama territooriumile ja kohad katlal täiendavate seadmete ühendamiseks.

- Mitmefaasiline absorptsioon võib tulevikus osutada paremaks alternatiiviks nn tava-absorptsiooniprotsessile eelkõige tulenevalt adsorbendi regenererimise protsessi väiksemast energiatarbest. Samas mõjutab protsessi tööstuses rakendatavust tema mõnevõrra suurem keerukus võrreldes tava-absorptsiooniga ning hetkel on saavutatud TVT 7.
- Adsorptsioon on keskkonnatehnoloogias laialt kasutatav protsess, millel on potentsiaali areneda energeetikasektoris üheks oluliseks CO₂ püüdmise tehnoloogiaks või selle üheks astmeks. Selleks tuleb aga ületada teatud takistused:
 - vähendada oluliselt protsessi maksumust;
 - leida adsorbendid, mida ei mõjuta:
 - suitsugaaside kõrge hapnikusisaldus;
 - suitsugaaside kõrge niiskusesisaldus.
- Tuginedes olemasolevatele kirjanduse andmetele, on hapnikukandja ringlusega põletamine teoreetiliselt sobiv põlevkivile tema suure lendosade sisalduse tõttu. Aga sarnaselt KGL tehnoloogiaga vajab hapnikukandja ringlusega põletamine uute põletusseadmete ehitamist. Samuti on vaja arendada spetsiifilisi tööstuslikus mastaabis toodetavaid hapnikukandjaid, mis on kõrge reaktiivsusega ning peavad vastu kõrgetele temperatuuridele ja kulumisele.
- Kaltsiumi ringlusega protsess on hinnanguliselt väiksema energialõivuga kui absorptsiooniprotsess. Samas on protsessi puhul mitmeid aspekte, mis vajavad parendamiseks täiendavat uurimist. Need puudutavad eelkõige sorbendi eluea piiratud pikkust ning sorbendi kvaliteedi sõltuvust lähtematerjalist. Lisaks on vajalik protsessi efektiivsemaks toimimiseks rakendada hapnikus põletamist.

5 CO₂ püüdmise, puhastamise, kasutamise, transpordi ja ladustamise majandusanalüüs Eesti põlevkivitööstuse kontekstis

5.1 Modelleerimise lähtekohad

Käesolevas aruandes on esitatud hinnangud kahe tehnoloogiliselt perspektiivseks osunud CO₂ püüdmis- ja puhastamistehnoloogia – amiinide baasil absorptsiooni (edaspidi ka PCC, *post-combustion capture*) ja hapnikus põletamise (edaspidi ka OXY, *oxy-fuel*) – kohta Eesti põlevkivitööstuses. Majandusanalüüsi sisendiks on Eesti põlevkivielektrijaamade FW ja Alstom CFBC tehnoloogiaga plokkidele ja põlevkiviõlitootmise Enefit-280 ja Petroter tehnoloogiatele vastavate potentsiaalsete CO₂ püüdmis- ja puhastamislahenduste (PCC ja OXY) käesoleva projekti raames hinnatud tehnoloogilised parameetrid.

Käesolevas aruandes oleme modelleerinud PCC ja OXY tehnoloogia CO₂ püüdmise ja puhastamise ühikukulu, eesmärgiga anda hinnang, kumb vaadeldud tehnoloogiast ja kas üldse võiks olla Eestis

majanduslikult otstarbekas. Mõõtuhihikuks on kulu püütud CO₂ tonni kohta 2018. aasta euro väärtustes. Ühe tonni CO₂ püüdmise ja puhastamise kulu on erialakirjanduses laialdaselt kasutatav ühik.

Käesolevas aruandes on esmalt toodud staatiline hinnang (st see ei võta arvesse nt elektri- ja CO₂ kvootide hinna oodatavaid muutusi tulevikus), lähtudes 2018. aasta andmetest, mis on hiliseim aasta, mille kohta andmebaasides olid vajalikud sisendandmed kättesaadavad. Seejärel on näitlikustatud võimaliku hinnadünaamika mõju püütud CO₂ tonni kohta.

Majandusanalüüsi esimeses etapis on analüüsitud, milline võiks olla CO₂ püüdmis- ja puhastamistehtoloogiasse tehtavate investeeringute hinnanguline maksumus, lähtudes varasemas kirjanduses esitatud seisukohtadest ning Eesti põlevkivielektriijaamade FW ja Alstomi tehnoloogiate ning põlevkiviõli tootmisel kasutatavate Enefit-280 ja Petroteri tehnoloogiate eripäradest, sh mahu skaleerimine ja paigalduskulud. Majandusanalüüsi lähtekohana on kasutatud nii PCC kui ka OXY tehnoloogiate puhul NETL-i [70] andmebaasi andmeid, korrigeerituna vastavaks Eesti põlevkivielektriijaamade ja põlevkiviõli tootmistehaste tehnilistele parameetritele. CO₂ püüdmiseks ja puhastamiseks vajalike seadmete maksumust on hinnatud diferentsmeetodil, tuginedes NETL-i aruandes [70] toodud referentstehastele, st on võrreldud omavahel elektriijaama, kus toimub CO₂ püüdmise ja puhastamine, ja elektriijaama, kus CO₂ püüdmist ja puhastamist ei toimu, selgitamaks välja CO₂ püüdmise ja puhastamisega seonduvate täiendavate kulude suurus ning vajalikud investeeringud. Kuna lähtekohana kasutatud NETL-i [70] andmebaasi andmed on esitatud USA dollarites, konverteeriti maksumused eurodesse ning toodi 2018. aastasse asjakohaseid hinnaindekseid kasutades.

CO₂ püüdmis- ja puhastamistehaste rajamise maksumuse hindamisel on peamiseks ülesandeks selgitada välja ehitamiseks ja paigaldamiseks vajalikud seadmed, materjalid ning tööjõumahukus ja nende hinnad. Töövalmis tehase rajamise kogumaksumuse hindamine koosneb tüüpiliselt kahest komponendist: 1) CO₂ püüdmise, puhastamise ja kompresserimise jaoks vajalike seadmete maksumus; ja 2) nende seadmete paigaldamise kulud ja muud kaasnevad kulud (nt esmakäivitus, tinglikud lisakulud etteaimamatuteks olukordadeks) [71].

Seejärel on vaja investeeringu maksumuse teisendada kapitalikuluks, et viia investeeringu maksumus ühikukulu (ühe CO₂ tonni püüdmise) tasandile. Selleks on vajalik asjakohase diskontomäära leidmine. Kapitalikulu leidmist on põhjalikumalt kirjeldatud lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 1. alapeatükis ning diskontomäära leidmist lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 2. alapeatükis.

Majandusanalüüsi järgmiseks komponendiks on püüdmis- ja puhastamistehase opereerimiskulude leidmine, mis sisaldavad endas vajalikku energiakulu, kemikaale jm sisendeid ning tööjõu-, hooldus- jm kulusid [71]. Kuna järelpüüdmiseadmed on põlevkivielektritootmises integreeritud olemasoleva elektritootmisega, saab vajaliku elektritarbe leida saamata jäänud elektrimüügituluna. Ka põlevkiviõli tootmisel saab CO₂ püüdmiseks ja puhastamiseks vajaliku elektrienergia kas põlevkiviõliteshases ise toota või kontsernisiseselt hankida. Põhjalikumalt on energiakulu leidmist selgitatud lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 3. alapeatükis. Peamisteks muudeks sisenditeks on jahutusvesi (lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 4. alapeatükk) ja kemikaalid (lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 5. alapeatükk) ning aruandes on selgitatud ka tööjõukulude (lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 6. alapeatükk) ning hoolduskulude (lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 7. alapeatükk) modelleerimise lähtekohti.

Kuigi ladustamine isenesest ei nõua kõrget CO₂ puhtusastet, on selleks, et tagada CO₂ transportimiseks kasutatavate torustike efektiivne töö ja piisavalt pikk eluiga ning vähendada

transporditava ja ladustatava CO₂ mahtu ja sellega seonduvaid kulusid, vajalik saavutada CO₂ vähemalt 95% puhtusaste. Meie analüüsi aluseks olevate referentstehaste puhul ei olnud NETL-i aruandele [70] tuginedes CO₂ 99,9% puhtusastme saavutamiseks vajalike seadmete soetusmaksumus ja energiakulu suurem kui alternatiivse 97% puhtusastme saavutamiseks vajalik seadmete soetus- ja energiakulu. Siinjuures juhime tähelepanu sellele, et puhtusaste 99,9% viitab üksnes CO₂ kontsentratsioonile ning ülejäänud 0,1% võib sisaldada komponente, mis ei pruugi olla sobiv osade *foodgrade* puhtusastet nõudvate kasutusalternatiivide jaoks ning nõuab täiendavate puhastusprotsesside läbiviimist, mis suurendab puhastamisega seotud kulutuste taset veelgi.

Oleme uuringus vaadelnud kolme peamist stsenaariumi:

- **stsenaarium 1:** CO₂ püüdmine ja kasutamine Eesti tööstuses (CCU);
- **stsenaarium 2:** CO₂ püüdmine ja ladustamine (CCS);
- **võrdlusstsenaarium:** praegune olukord ehk CO₂ emiteerimine koos kvoodi- ja keskkonnatasude tasumisega (nõ „tossa ja maksa“ lahendus).

Stsenaariumide 1 ja 2 korral on ühiseks komponendiks CO₂ püüdmine koos puhastamisega, mille kulu oleme hinnanud kahes alastsenaariumis:

- **stsenaarium A:** CO₂ püüdmise ja puhastamise tehnoloogiat rakendatakse täisvõimsusel (tavahooduste ja seisakutega arvestavalt 85% kogujast ehk 7446 töötundi aastas) nii elektritootmises olemasolevate FW ja Alstom CFBC tehnoloogiaga plokkides kui ka põlevkiviõlitootmises Enefit-280 ja Petroteri tehnoloogiatega;
- **stsenaarium B:** CO₂ püüdmise tehnoloogiat rakendatakse elektritootmises poole madalamal võimsusel (st 42,5% ehk 3723 töötundi aastas, mis näitlikustab ligikaudu olukorda, kus põlevkivielekter on turul konkurentsivõimeline vaid piiratud osa ajast, millele viitab tulevikutehingute hindadele tuginev analüüs lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 9. alapeatükis ning samas kasutatakse ära Enefit-280 põlevkiviõlitootmise uttegaas).

Alapeatükk 5.2 võtab kokku Eesti põlevkivitööstuses CO₂ püüdmise ja puhastamise kulude analüüsi tulemused nii stsenaariumite A kui B korral. Mõlemas stsenaariumis on seejuures tehtud muid olulisi eeldusi sisendite osas, nt investeringu maksumuse, kapitali hinna ja elektri hinna suhtes. Analüüsi tulemused on seetõttu tundlikud sisendite eeldatust teistsuguste väärtuste suhtes – näiteks püüdmis- ja puhastusseadmete rakendamine oluliselt madalamal võimsusel või kasulikust tööeest lühema aja jooksul tähendaks püütava CO₂ tonni kohta kulu väga olulist tõusu. CO₂ püüdmise ja puhastamise kulude sensitiivsuse mõnede oluliste sisendite väärtuste erinevuse suhtes oleme esitanud lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ alapeatükis 8 ning tulevikutehingute hindade andmetel baseeruva hinnangulise analüüsi põlevkivist elektri ja õli tootmise turul konkurentsivõimelise mahu kohta lähiaastatel lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 9. alapeatükis.

Majandusanalüüsi järgmise etapi väljundina on esitatud ülevaade potentsiaalselt püütavast CO₂-st vabanemise eeldatavalt sobivate võimaluste kohta. Nagu on selgitatud peatükis 2 ja lisa „CO₂ transport ja ladustamine“, võiks peamiseks võimaluseks Eesti põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütavast CO₂-st vabanemiseks olla selle ladustamine Põhjamere alla Norra ranniku lähedale (st stsenaarium 2), kuna praegu rakendatavate tehnoloogiate puhul ei Eesti tööstuses ega ekspordiks kasutamisel (st stsenaarium 1) olulisi konkurentsieeliseid Eesti põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütavale CO₂-le ei ilmnenud (alaptk 5.3). Alapeatükis 5.4 on käsitletud nimetatud võimalusega kaasnevaid transpordi- ja ladustamiskulusid. Eesti põlevkivitööstuses CO₂ püüdmise, puhastamise,

transpordi ja ladustamise kulude majandusanalüüsi kokkuvõtlikud tulemused ja järeldused potentsiaalse toetusvajaduse kohta on toodud alapeatükkides 5.5 ja 5.6.

5.2 CO₂ püüdmis- ja puhastamistehnoloogia rakendamise kulu

CO₂ püüdmis- ja puhastamistehnoloogia rakendamise hinnanguline kulu stsenaariumis A on PCC tehnoloogia puhul ca 42 eurot CO₂ tonni kohta FW ja 34 eurot CO₂ tonni kohta Alstomi ploki (AEJ) puhul. Tegemist on püütud ja 99,98%-ni puhastatud CO₂ kuluga, millele lisandub ladustamise või kasutamise kulu, sealhulgas transport. OXY tehnoloogia puhul on hinnanguline CO₂ püüdmise ja puhastamise kulu madalam – stsenaariumis A ca 34 eurot CO₂ tonni kohta FW ja 29 eurot CO₂ tonni kohta Alstomi ploki puhul.

Õlitootmise puhul on CO₂ kinnipüüdmise ja puhastamisega seotud kulud oluliselt suuremad, ulatudes stsenaariumis A Enefit-280 puhul PCC tehnoloogiat kasutades 51 euroni tonni kohta ning OXY tehnoloogiat kasutades 50 euroni tonni kohta. Petroteri tehastes on tehnoloogiliselt mõistlik kasutada CO₂ püüdmiseks ja puhastamiseks üksnes PCC tehnoloogiat ning CO₂ kinnipüüdmise ja puhastamisega seonduvad kulud ulatuksid hinnanguliselt 73 euroni püütud CO₂ tonni kohta (vt Tabel 13).

Võrreldes võrdlusstsenaariumiga ehk CO₂ kvooditasude (aastatel 2019–2020 ca 25 eurot tonn) ja süsihappegaasi õhku paiskamise keskkonnatasuga (2 eurot tonn vastavalt keskkonnatasude seadusele), osutub juba ainuüksi CO₂ püüdmine ja puhastamine nii PCC kui OXY tehnoloogiatega stsenaariumis A kulukamaks, kuid arvestama peab ka lisanduvate kuludega püütud CO₂-st vabanemiseks (vt koondtulemused alaptk 5.6).

Stsenaariumi B korral, kui elektritootmisvõimsust on kasutatud poole väiksemas mahus, on CO₂ püüdmise ja puhastamise hinnanguline kulu oluliselt kõrgem ehk erinevus võrdlusstsenaariumist on veelgi suurem: PCC tehnoloogia puhul ca 66 eurot CO₂ tonni kohta FW ja 51 eurot CO₂ tonni kohta Alstomi ploki (AEJ) puhul; OXY tehnoloogia puhul ca 54 eurot CO₂ tonni kohta FW ja 43 eurot CO₂ tonni kohta Alstomi ploki puhul. Suurimaks kulukomponendiks CO₂ püüdmise ja puhastamise juures (moodustades stsenaariumi A puhul ca 45–66% kogukuludest) on nii elektri- kui ka põlevkiviõlitootmises püüdmis- ja puhastusseadmetesse tehtud investeeringu kapitalikulu. Oluline kulukomponent on ka energiakulu (moodustades stsenaariumi A puhul elektri jaamaades ca 38–49% kuludest olenevalt tehnoloogiast ja elektritootmisplokist, ning õlitootmises ca 28–37% kuludest). Muudest kuludest on olulisemad seadmete hoolduse ja tööjõukulu. PCC tehnoloogia puhul on nende kululiikidega osakaalult võrreldav ka kemikaalide kulu, OXY tehnoloogia puhul on kemikaalidele kuluvad summad oluliselt väiksemad (vt Tabel 13).

Oluline on tähele panna ka vajadust mahukateks alginvesteeringuteks (vt Tabel 13 alumine rida) – kuigi kapitalikulu CO₂ tonni kohta sisaldab neid annuiteedina tinglikult jaotatuna CO₂ püüdmis- ja puhastusseadmete eeldatava kasutusea peale, oleks alginvesteeringud vaja teha projektiga alustades, leides neile vajaliku ja sobiva finantseerimise. Kulu CO₂ tonni kohta on väga tundlik investeeringusumma, elektri hinna ja seadmete kasutusaja/intensiivsuse suhtes. Sellest lähtuvalt oleme lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 8. alapeatükis esitanud sensitiivsusanalüüsi tulemused mõnede peamiste sisendite suhtes.

Tabel 13. CO₂ püüdmise ja puhastamise hinnanguline kulu, kulukomponendid ja alginvesteeringu maksumus

Parameeter	Elektritootmine				Põlevkiviõlitootmine		
	FW		AEJ		Enefit-280		Petroter
	OXY	PCC	OXY	PCC	OXY	PCC	PCC
Stsenaarium A							
CO ₂ püüdmise ja puhastamise kulu (EUR/t)	34,3	41,8	29,2	34,1	50,2	51,3	72,8
sh seadmete kapitalikulu (%)	52,9	55,0	45,1	46,4	57,6	57,5	65,8
elektrikulu (%)	41,7	38,2	48,6	46,6	36,8	35,2	7,6
maagaas (%)							20,6
tööjõukulu (%)	3,1	3,3	3,0	2,7	2,8	2,9	2,9
hoolduskulud (sh materjalid) (%)	2,1	0,9	2,9	1,4	2,4	2,1	1,5
kemikaalide kulu (%)	0,2	2,1	0,3	2,7	0,4	1,9	1,4
jahutusvesi (%)	<0,1	0,5	0,1	0,3	<0,1	0,3	0,2
CO ₂ püüdmise ja puhastamise kulu toodanguühiku kohta (EUR/MWh – elekter; EUR/t - põlevkiviõli)*	45,6	58,3	35,5	43,4	85,5	87,4	82,1
Stsenaarium B							
CO ₂ püüdmise ja puhastamise kulu (EUR/t)	53,6	66,2	43,2	50,8			
CO ₂ püüdmise ja puhastamise kulu toodanguühiku kohta (EUR/MWh – elekter; EUR/t - põlevkiviõli)*	71,1	92,2	52,6	64,7			
CO ₂ püüdmise ja puhastamise seadmete alginvesteeringu maksumus (milj EUR)	216,7	274,6	214,1	257,1	118,9	121,3	69,2

*kulu on lihtsustatult jagatud vaid elektri/õli kui põhitoodangu peale, jättes välja kõrvalsaadused

5.3 Püütava CO₂ tööstuses kasutamise majanduslikest aspektidest

2016. aasta teadmiste põhjal on hinnatud, et 2030. aastal võiksid süsinikdioksiidi kasutavad tehnoloogiad/tooted olla võimalised kasutama ära ligikaudu 7 miljardit tonni CO₂ aastas, mis tolle hetke seisuga moodustas ca 15% globaalsest aastasest CO₂ emissioonist, ning selle saavutamisel võiks CO₂ sisendina kasutatavate toodete globaalne turumaht ulatuda 800 miljardi USA dollarini [72]. See hinnang põhineb eelkõige hetkel otse fossiilsetel ressurssidel põhineva tootmissisendi asendamisel CO₂ kui heitme kasutamise (displacement). Uute tehnoloogiate/toodete CO₂ kogu sidumisvõime hindamisel tuleb silmas pidada, et neid ei tohiks süvenemata kokku liita – nt kui CO₂ on seotud ehitusmaterjalina nii puitu kui betooni, siis, olles mõlemad ehitusmaterjalid, konkureerivad nad suures osas inimese sama põhivajaduse rahuldamisega. Dilemma seisneb muuhulgas selles, et toodete puhul, mis hoiaks süsinikku ringlusest väljas pikka aega, tekib turul ka saturatsioon kiiremini. Pikas perspektiivis valikute kaalumisel tuleb arvestada valdkondadevahelisi seoseid, nii näiteks võib CO₂ suuremahuline kasutuselevõtt kütuste tootmiseks hakata mingil hetkel vähendama CO₂-EOR potentsiaali, sest nõudlus toornafta järele väheneb.

Tulenevalt energiajulgeoleku ja energiavõrgu stabiilsuse tagamise vajadusest, tehnoloogilistest rajasõltuvusest, energia salvestamistehnoloogiate arengutasemest, energeetikainvesteeringute pikkusest ja muudest aspektidest, ei ole kohene täielik üleminek taastuvenergiale Eestis võimalik. Põlevkivil põhinev energia ilmselt jääb lähiajal veel eksisteerima paralleelselt uute puhtamate tehnoloogiate laiema levikuga. Lisaks eraldub CO₂ põlevkivikeemiatööstuses, biomassi kasutamisel energeetikas ning muudes tööstusharudes. Seega on CO₂-le tööstuslikus mahus kasutamise võimaluste otsimine Eesti majanduse konkurentsivõime vaatest relevantne ilmselt veel pikka aega (õhust CO₂ püüdmine ja kasutamine jääb antud uuringu raamidest välja).

CO₂ emissioonidega seotud väljakutsed mõjutavad Eesti majandust mitmest vaatest. Lisaks avaliku sektori tulude kaalutlustele ja rahvusvahelistele kokkulepetele agregeeritud emissioonimahu osas mõjutab süsinikuintensiivsus otseselt ka siinsete suurettevõtete konkurentsivõimet. Viimaste aastate jooksul oleme näinud, kuidas emiteeritava CO₂-e tonni hind EU ETS-is on kohati tõusnud ca 40 euroni [73], vähendades põlevkivipõhise elektrienergia konkurentsivõimet NordPooli süsteemis (vt ka lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 9. alapeatükk). Tehnilis-majanduslikes teostatavus- ja tasuvusuuringutes saamegi võtta EU ETS-is kaubeldava kvoodi hetkehinna ning tulevikutehingute hinna stsenaariumite võrdlemisel baastasemeks.

Seda nn “tossa ja maksa” stsenaariumit saab kõrvutada võimalusega CO₂ selle tekkeprotsessis kinni püüda ning ladustada/pumbata maa alla (CCS/EOR). Eesti kontekstis on selle lahenduse majanduslik mõttekus (ja ka keskkonnakasu) kaheldav, sest geoloogiliselt selleks sobivaid kohti Eestis ei ole ning võimalikesse ladestuspaikadesse (nt Norra) transport oleks eeldatavalt kulukas ja energiamahukas. Antud uuringus (vt ptk 2 ja lisa „CO₂ transport ja ladustamine“) on see eeldatavalt sobivate CO₂ kasutusvõimaluste puudumise tõttu paratamatult siiski vaatluse all kui esimene alternatiivne stsenaarium ning hinnanguline CO₂ püüdmise–maismaatranspordi–meretranspordi–ladustamise kulu tuleb praeguste teadmiste põhjal kokku vähemalt ca 76 EUR/t stsenaariumi A ja ca 90 EUR/t stsenaariumi B korral (vt alaptk 5.4).

Sisuliselt tähendab see seda, et CO₂ emiteerijal on majanduslikult mõttekas hakata kasutama CCS lahendust juhul, kui EU ETS-i kvoodihinna ja Eesti keskkonnatasu summa tõuseb stsenaariumi A eeldusel üle 76 EUR/t. 2019–2020 oli EU ETS-i süsteemis CO₂ heitme tonni hind ca 25 eurot ning sellele

lisandub siseriikliku Keskkonnatasude seaduse kohaselt saastetasu 2 EUR/t [74]. Seega on 2019–2020 turuhinna taset arvestades potentsiaalselt atraktiivsed lahendused, mille puhul CO₂ sidumisega kaasnev lisakulu on väiksem kui 27 EUR/t; ETS-i süsteemis CO₂ heitme tonni hinna kasvades see tõuseb. Samas tuleb arvestada, et kasvav CO₂ kvooditasu või CO₂ püüdmise ja sellest vabanemise kulu tähendab elektrienergiaturul lisakulu ja seeläbi konkurentsivõime langust neile turuosalistele (sh põlevkivielektri tootmine), kelle tootmisprotsessiga kaasneb CO₂ emissioon.

Eelnevalt tulenevalt oleks CO₂-le tööstuslikus mahus majanduslikult otstarbekate kasutamisevõimaluste (CCU) leidmine nii riigile tervikuna kui ka mitmele konkreetsele majandusharule väga oluline. Keeruliseks teeb selle aga asjaolu, et mitmed CO₂ sisendina kasutatavad tehnoloogiad on hetkel alles arendamis- või piloteerimisstaadiumis ning sellest tulenevalt on kalkulatsioonides kasutatavad sisendid hinnangulised.

Kuna enamiku CO₂ sisendina kasutatavate tehnoloogiate puhul on vajalik või eelistatud kasutada puhastatud korstnagaasi, siis CO₂ püüdmise ja puhastamisega seotud kulud tuleks emiteerijal katta. Järgneb valik, kas suunata gaas sadamasse (juhul kui selline toru peaks ehitatama) Norra laevatamiseks (stsenaarium 2), või kasutada seda mõne toote valmistamisel sisendina kohapeal (stsenaarium 1). On mitmeid tehnoloogiaid, mis lähiajal võiksid nendes tingimustes saada konkurentsivõimeliseks, kuid enamasti on nendega muid probleeme, nt on protsessi enda kogu energiakulu liiga suur või siis toote globaalne turumaht liiga väike, et kliima mõju vaatest arvestatavat CO₂ sidumise efekti saavutada. Ideaalset lahendust/toodet/tehnoloogiat, mis kõiki aspekte silmas pidades aitaks oluliselt vähendada Eesti põlevkivitööstuse CO₂ emissiooni ja võimaldaks konkurentsivõimelist põlevkivielektri tootmist, hetkel tööstuslikus mahus teadaolevalt rakendatud ei ole.

Erinevate võimalike CO₂ -põhiste toodete majandusliku potentsiaali hindamiseks on antud uuringus esmase valiku tegemisel lähtutud tehnoloogiate turuküpsusest, toodete poolt seotava CO₂ hulgast (erimass), toodete globaalsest turumahust ja nõudluse trendidest. Mitmete võimalike teoreetiliselt teostatavate lahenduste puhul ületaks ainuüksi Eestis emiteeritava CO₂ hulk selle sisendina kasutamisel globaalse turumahu mitmesajakordselt. "Toodete" all on enamasti peetud silmas materjale ja keemilisi vaheühendeid, millest on omakorda võimalik valmistada mitmeid erinevaid lõpptooteid. Turumahu hinnangutes saame tugineda enamasti olemasolevatele, CO₂ sisendina mittekasutatavatele toodetele, mida uute tehnoloogiatega saaks asendada, üksikutel juhtudel aga saame toetuda ka juba teadaolevatele CO₂-põhiste lahendustele.

On ilmne, et Eestis potentsiaalselt püütava CO₂ (5,45 milj t, vt Tabel 14) baasil oleks teoreetiliselt võimalik mitme käsitletava toote globaalne turumaht katta mitmekordselt. Kuna CO₂ on üle kogu maailmas (mistõttu poleks Eestis püütaval CO₂-l ka arvestatavat ekspordipotentsiaali kasvõi lisanduvate kõrgete transpordikulude tõttu), on oluline mõista, milles võiks seisneda selle konkurentsieelis, juhul kui vastav tehas/tootmine oleks Eestis. Konkurentsieelis võib tuleneda muuhulgas tehnoloogiakohasest intellektuaalomandist, laiemast oskusteabest ja vajaliku kvalifikatsiooniga tööjõu olemasolust ning mitmete muude kriitiliste sisendite olemasolust.

Kuna ülesandepüstituse kohaselt on eesmärgiks võimalikult suure koguse CO₂ sidumine, siis antud juhul on tegu mahukaupadega ja transpordikulude osas eelise saavutamiseks on oluline arvestada muude materiaalsete tootmissisendite olemasolu lähiregionis ja/või suurte tarbijate/turu lähedust. Väärtusahelapõhise lähenemise kohaselt on Eesti ettevõtetal, kes oma positsiooni võiks etapi võrra emmas-kummas suunas laiendada, võimalik maandada vähemalt osaliselt tururiski (nt hakata tootma midagi, mida hetkel ise sisse ostetakse).

Konkurentsieelis võib tuleneda ka väiksematest vajalikest kapitalikuludest. CO₂ tööstuslikus mastaabis kasutamise lahendused eeldavad kõik suuri investeeringuid. Juba kasutusel olevate tehnoloogiate puhul on võimalik leida investeeringu hinnangulisi maksumusi, teiste puhul on võimalik ligikaudseid hinnanguid leida mitte- CO₂-põhiste analoogsete tehnoloogiate ja toodete investeeringuvajadustega. Tulenevalt kõrge investeringukulust on esmalt otstarbekas üle vaadata just olemasolevad seadmed ja tootmisvõimsused ning uurida detailsemalt nende kohandamise ja ümberehitamise võimalusi. Investeeringud uutesse seadmetesse või ka kohandamisse on üldjuhul mõttekad eeldusel, et põhiprotsessid on kasumlikud.

Eraldi tuleb pöörata tähelepanu protsessi energiantensiivsusele, sest enne kui asuda detailsemalt analüüsima majanduslikku mõttekust, näitab energeetiline bilanss sisuliselt ära, kas üldse oleks teoreetiliselt võimalik uue CO₂ sisendina kasutatava tehnoloogiaga keskkonna ja kliima aspektist olemasolevast parem tulemus saavutada. Kui energeetilise efektiivsuse saavutamine ei ole võimalik, siis majanduslik tasuvus saab tekkida vaid oluliste turumoonutuste tulemusena. Etteruttavalt saame öelda, et kõik vaatluse all olevad tehnoloogiad (mis ClimMit projekti tehnoloogiliste ekspertide poolt sõelale jäänud) on üsna energiamahukad ja nende majandusliku tasuvuse eeldus on suures mahus konkurentsivõimelise hinnaga taastuenergia olemasolu. See on oluline nii CO₂ sisendina kasutatavate materjalide/ainete valmistamisel (CCU stsenaarium 1) kui ka CO₂ kokkusurumisel ja maa alla pumpamiseks sobivatesse geoloogilistesse kohtadesse transportimisel (CCS stsenaarium 2). On leitud, et vajalikuks süsinikuneutraalse energia hinnatasemeks oleks ca 0,03 USD/kWh [75].

Süsinikku siduvate tehnoloogiate puhul oleks keskkonnamõju koondhinnanguks oluline võtta vaatluse alla ka toote eluiga – kui pikaks ajaks antud toode süsinikku seob (*permanence*). Ehitusmaterjalid on üks tootegrupp, mis selle põhjal positiivselt välja paistab, samas enamik materjale ja kemikaale pigem hoiavad süsinikku ringluses, st aitavad vähendada vajadust toornafta pumpamise järele. CO₂ kasutamise võimalikke trajektoore on jaotatud ka “ringseteks”, “suletud” ja “avatud” süsteemideks. Inglisekeelses erialakirjanduses eristatakse ka termineid *removal* ja *utilization*. Antud projektis me sellega aga detailidesse minna ei saa, sest vaatame peamiselt materjale ja keemilisi vaheühendeid, millest on võimalik valmistada erineva kasutusajaga lõpptooteid.

Peaaegu kõik vaatluse all olnud kasutusvõimalused (vt allolev tabel) eeldavad, et heitgaasid on eelnevalt puhastatud *food grade* puhtustasemeni. Võrdluseks võib tuua, et Linde (endine AGA) müüb *food grade* CO₂ kaubamärgiga BIOGON® C (E 290) hinnaga 742,90 eurot 600l/450kg kohta (12x50l ballooni kohta) (ilma ballooni hinda arvestamata), mis tonni hinnaks teeb ca 1650 eurot. See gaas on kasutusel toiduainetööstuses loodusliku konservandina, sest tõkestab paljude mikroorganismide ja bakterite kasvu. Kasutatakse ka jahutamiseks, külmutamiseks, kaitsekeskkonnas pakendamiseks ning õlle ja karastusjookide karboniseerimiseks. Teadaolevalt toodetakse toiduainetööstuses kasutatav CO₂ enamasti kääritamise teel. Kuigi antud uuringus on vaadatud sisendina kahte äärmuslikku puhtustaset, siis erinevaid tehnoloogiaid detailsemalt analüüsides võib “puhastamise” vajadus olla ka olemuslikult erinev. Näiteks kui metalse torustikus transporditava või külmainena jahutusseadmetes kasutatava CO₂ puhul on ohtlik kõrge veesisaldus, mis võib põhjustada seadmetes või torustikus korrosiooni, siis võimendatud fotosünteesil ei ole veesisaldus üldse probleemiks, kuid piiranguks võib olla hoopis raskemetallide või väevli sisaldus.

Kui “tossa ja maksa” ning Põhjamerre matmise (CCS) stsenaariumite puhul kaasnevad sellega vaid kulud (mis on suuresti poliitiliselt mõjutatud), siis tootes allolevas tabelis välja toodud materjale/ühendeid, kasutades selleks sisendina mh CO₂, on võimalik genereerida ka tulu.

Kokkuvõtvalt näivad CO₂ sisendina kasutatavatest valdkondadest kõige turuküpsamad polümeerid ja sidestamine ehitus/täitematerjalina kasutamiseks, kuigi ka nendes esineb suur varieeruvus. Uurea ja polüoolid on juba täna CO₂ sisendina kasutades turul konkurentsivõimelised. Uurea tootmiseks on vajalik lähedalasuv ammoniaagitootmine, ajalooliselt on Eestis see kogemus olemas olnud Nitroferti näol. Ammoniaaki saaks põhimõtteliselt importida ka Loode-Venemaa tehastest. Nende valdkondade turuküpsus on seletatav ka sellega, et erinevatele hinnangutele tuginedes praeguseid tehnoloogiate valmidustasemeid arvestades vaid polümeeride tootmine ja betooni/tsemenditööstuses CO₂ sisendina kasutamine ei vaja eraldi toetusmeetmeid, kuna vajalikud lisainvesteeringud on suhteliselt madalad ja protsessi parendamine ise annab ettevõtjale kulude kokkuhoiu [76].

Tabel 14. Olulisemad kriteeriumid CCU tehnoloogiate/toodete rakendamise potentsiaali hindamiseks

Produkt (materjal, ühend), TVT	Erimass (t CO ₂ / t produkt)	Hinnanguline maailmaturu maht	Ligikaudne maailmaturu hind	Muud kriitilised aspektid
Uurea TVT 9	0,735	180–200 Mt, kasvav	200 USD/t	Toodetakse juba praegu CO ₂ -st
Polükarbonaadid TVT 9	0,173	4–5 Mt, kasvav	2500–4000 USD/t	Suur potentsiaal asendada fosgeenil põhinev tehnoloogia; polükarbonaatidel palju kasutusvõimalusi
Salitsüülhape TVT 9	0,319	0,17 Mt	1500-3000 USD/t	Toodetakse juba praegu CO ₂ -st
Metanool (keemia+kütus) TVT 7–9	1,373	65–70 Mt, kiirelt kasvav	400 USD/t	Toote müügihind sõltub suuresti nafta turuhinnast ja omahind piisavas koguses odava taastuenergia olemasolust
Metaan TVT 8	2,6	5000 Mt, kasvav	360 USD/t	Toote müügihind sõltub suuresti nafta turuhinnast ja omahind piisavas koguses odava taastuenergia olemasolust
Süntetiline diiseli (SNG) (Fischer-Tropsch meetodil) TVT 5–8	2,93	20 Mt, kiirelt kasvav	1200 USD/t (1150 EUR/t)	Väga suur turg; fossiilsetel allikatel põhinevate transpordikütuste asendamine on Eestis osutunud muude valdkondadega võrreldes keerulisemaks; vajab väga suuri investeeringuid
Mikrovetikate, tsüanobakterite, pärmide biomass (CO ₂ fototroofilise konversioon) TVT 7–9	1,8	35 Mt, kiirelt kasvav	1000–4000 USD/t	Tehnoloogia on kiires arengujärgus. Energeetikas ei ole konkurentsivõimeline, kuid biomassil on palju erinevaid väärimise võimalusi.

Produkt (materjal, ühend), TVT	Erimass (t CO ₂ / t produkt)	Hinnanguline maailmaturu maht	Ligikaudne maailmaturu hind	Muud kriitilised aspektid
Kasutamine kasvuhoonetes TVT 9	0,44 tomatite, 0,31 kurgi puhul	>1000 Mt, kasvab ~8% aastast	1–5 EUR/kg kurgid, tomatid	Kurgid, tomatid, lehtsalat, lilled jne. Kasvuhoonete rikastamiseks kasutatud CO ₂ -st kuni 85% vabaneb kohe atmosfääri ventilatsiooni ja lekete kaudu. Toote eluiga on lühike (lagunemisega hakkab ka taas CO ₂ eralduma). Teises tulbas toodud arvude eeldused: 0,44 tomatite puhul (560 t/ha tomateid 250 t CO ₂ /ha lisamisel) ning 0,31 kurgi puhul (800 tonni/ha kurki 250 t CO ₂ /ha lisamisel)
F-gaaside asendamine TVT 9	1,5 (külmutus- seadme kWh kohta)	Eesti aastane tarve keskmiselt ca 11 t lähema 10 aasta jooksul, suhteliselt lokaalne turg	vt tabelile eelnev tekstilõik	CO ₂ -põhiste lahendustele on sobivaim turuosa eelkõige 40– 500 kW jahutusseadmed
Betoonitooded (tsement ja täitematerjal) TVT 8–9 [77]	0,085	Betoonitoodete turg on üsna lokaalne, mis piirab turumahtu, aga annab eelise kohalikele	8 EUR/t täitematerjal	CO ₂ on seotud kõige kauemaks, kuid on turu saturatsioonioht

Eraldi vääriks väljatoomist polükarbonaatide tootmine, sest uus CO₂-põhine fosgeenivaba tehnoloogia on ka muus osas väiksema keskkonnamõjuga ning vähem ohtlik. Põhimõtteliselt on turupõhiselt kasutuses ka F-gaaside asendamine külmutusseadmetes ja fotosünteesi (st kasvu) võimendamine taimekasvatustes, kuid Pariisi kliimaleppe eesmärke arvestades on nende summaarne mõju oluliselt väiksem võrreldes sellega, mida võiks saavutada, juhul kui jõutaks läbimurdeni nt kütuste valdkonnas. Samas on neil tehnoloogiatel laiem mõju ka põllumajanduse keskkonna jalajälje vähendamisel.

Teiste materjalide ja keemiliste ühendite puhul konkureerivad uued, CO₂-põhised tehnoloogiad hetkel turul domineerivatega ning tuleb arvestada, et on olemas (vähemalt lähiajal) *status quo* säilimisest kasu saavad huvigrupid. Turul juba olevate toodete referentshinnad on väga varieeruvad, sõltudes toote kvaliteedist (puhtusest), pakkumise kohast ja ajast. Enamik neist omakorda sõltub nafta või maagaasi maailmaturuhinnast. Keemiliste vaheühendite valdkonnas on selge, et peamine arendustöö ja patenteeritud tehnoloogiad tulevad üldjuhul suur korporatsioonidelt, kes on vertikaalselt integreeritud ja omavad kontrolli kogu väärtusahela üle. Eestis asuval ja kohalikul kapitalil põhineval

ettevõttel, mis oleks selles ahelas ainult üheks väikseks lülits, on keeruline konkurentsivõimeline olla. Keemilistest vaheühenditest toodetakse juba praegu CO₂-st salitsüülhapet, kõrge TVT ja samas suhteliselt väike globaalne nõudlus tähendab aga jällegi, et sisuliselt on turg juba ära jaotatud.

Hiljuti on seoses suurte ja nõudlike vaktsiinitarnetega tõusnud ka kuivjää ehk tahke CO₂ nõudlus. Detailselt me ei ole seda võimalust analüüsinud, kuid kui osutub, et Covid-viiruste vastu tuleb hakata vaktsineerima tihti, siis vääraks see detailsemat tähelepanu, kuigi tegemist oleks CO₂ väga lühikese sidumisvõimega rakendusega ning CO₂ vabaneks niipea, kui see sooja kätte satub.

CCU tehnoloogiate majandusülevaate võib kokku võtta sellega, et teadaolevalt ei ole ühtki tehnoloogiat ega toodet, millega oleks võimalik Eesti põlevkivienergeetikas tekkiv CO₂ ära kasutada nii, et see oleks turutingimustel konkurentsivõimeline ja kogu olelusringi arvesse võttes keskkonnamoort vähendav. Olulisteks probleemideks on nende tehnoloogiate endi suur energiatarve, vastavate toodete globaalse nõudluse piiratus võrrelduna emiteeritava CO₂ kogusega ja paljuski CO₂ väga lühike sidumisvõime. Juba kommertsialiseeritud tehnoloogiate puhul on keeruline näha Eestil olulist konkurentsieelist võrreldes riikidega, kus juba on kõrgetasemeline keemiatööstus.

Arvestada tuleb aga sellega, et ka kõik teised vaatluse all olnud tooted ja tehnoloogiad (sh korstnagaaside eelpuhastamine) ning mõned hetkel siit välja jäänud tehnoloogiad on aktiivselt arendamisel ning lähiaastate läbimurded võivad üldpilti muuta. Riikidel on ees sisulised valikud, kas olla tehnoloogia arendajaks või teiste poolt väljatöötatud lahenduste rakendajaks. Esimene neist rohkem ja teine ehk pisut vähem, kuid mõlemad variandid eeldavad riigi poolt selget visiooni ja tegevuskava, mh spetsialistide ettevalmistust haridussüsteemis, suuremahuliste (välis)investeeringute soodustamist selles valdkonnas ja põhjendatud juhtudel ka riigipoolseid toetusmeetmeid.

Tehnoloogiaid saab nende CO₂ sidumisvõime ja olelusringipõhise tervikliku keskkonnamoort alusel küll omavahel võrrelda, aga praktikas oleks mõjusam vaadata koos alternatiivseid lahendusi, mis rahuldavad sama nõudlust – pakuvad sama tarbimisväärtust. Kindlasti tuleks lisaks süsinikuringlusele arvestada ka laiemat keskkonnamoort, nt veekasutust ja jäätmete teket ning lisaks asjaolu, et pikemas perspektiivis ei pruugi biomassi põletamine enam kvalifitseeruda taastuvenergiaks. Kuna teadaolevatest lahendustest ükski tehnoloogia või toode ei lahenda ära kogu CO₂ emissiooni probleemi, siis pigem tuleks arvestada mitmete lahenduste paralleelselt kasutuselevõtu võimalusega ning asjaoluda, et põlevkivitööstus pole ainus, mida CO₂ emissioon puudutab.

5.4 Püütava CO₂ transpordi ja ladustamise kulu

Analüüs näitas, et peamiseks võimaluseks Eesti põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütavast CO₂-st vabanemiseks võiks olla selle ladustamine Põhjamere alla Norra ranniku lähedale (stsenaarium 2). Sel juhul oleks vajalik:

- (1) püütud CO₂ torutransport põlevkivitööstusest sadamasse ja sealne taristu (sh veeldamistehas) ning
- (2) püütud CO₂ laevatransport ladustamiskohta ja ladustamine.

Nimetatud komponentidest esimene tähendab vajadust torutranspordi ja muu vajaliku taristu rajamiseks ja opereerimiseks ning teine komponent kolmandalt osapoolelt sisseostetavat teenust.

Arvestades põlevkivitööstuses CO₂ emissiooni ja potentsiaalse püüdmise asukohti, osutus torutranspordi lahendusi analüüsidest olemasolevatest sadamatest asukoha poolest sobivaimaks CO₂ edasiseks laevatranspordiks Sillamäe sadam. Sel juhul oleks tehnoloogiliselt eeldatavalt optimaalne

püüdmisel komprimeeritud CO₂ torustransport püüdmise asukohtadest Sillamäe sadamasse järgneva kolme trassilõiguna (mida illustreerib Joonis 4 aruande lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 9. alapeatükis):

- (1) Auvere/Eesti EJ – Sillamäe sadam (ca 22,3 km)
- (2) BEJ – Auvere (ca 18,5 km)
- (3) VKG – Sillamäe sadam (ca 33,1 km)

Torustranspordi ja sadamataristu (veeldamistehas) kulude analüüsil tuginesime investeeingu tehniliste vajaduste parameetritele (sh torustiku pikkus, varieeruvus kõrguses, läbimõõt ja materjal lähtuvalt transporditava CO₂ mahust, rõhust, temperatuurist jm parameetritest) ning varasema kirjanduse põhjal üldjoontes võrreldava taristu rajamise ja opereerimisega eeldatavalt kaasnevatele kuludele – sh Eesti põlevkivitööstuse vajaduste tehniliste parameetritega arvestav alginvesteering [78]–[81] rajamisõiguse kulu (*right of way*) ning tööjõu-, materjali- ja muud kulud [78]–[81] 2018. aasta Eesti väärtustesse tooduna. Torustranspordi ja seonduva taristu kulu oleme kõikides stsenaariumites hinnanud sarnaselt alapeatükis 5.1 ja lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 1. ja 2. alapeatükis kirjeldatud meetodikale ning CO₂ püüdmise kulude analüüsiga võrreldavuse huvides CO₂ tonni kohta, eeldades stsenaariumiga A samu CO₂ püüdmismahte, st et täisvõimsusel töötavad kõik CFBC (Alstom ja kaks FW) elektritootmisplokid ning Enefit-280 ja Petroteri põlevkiviõli tootmise üksused. Kui need eeldused ei kehti (nt kui püütava ja transporditava CO₂ kogus on väiksem), mõjutab see kulu CO₂ tonni kohta väga oluliselt.

Torustranspordi ja sadamataristu (veeldamistehas) kulude analüüs näitab, et taristu rajamise ja opereerimise kulu on stsenaariumi A eeldustel vähemalt ligikaudu 4 eurot CO₂ tonni kohta, kuid see hinnang võib väga oluliselt muutuda, kui täpsustuvad laevatranspordi ja ladustamise teenuse osutamise tehnoloogilised võimalused ja vajadused. Näiteks oleneb laevade mahutavusest, teenuse osutamise ning püütava ja transporditava CO₂ koguse regulaarsusest, sadama võimalustest jpm parameetritest, millist taristut on täiendavalt vaja ning kes katab vastavad kulud.

Põlevkivitööstuses püütava CO₂ laevatranspordi ja ladustamise näol on tegemist sisseostetava teenusega kolmandast osapoolast teenusepakkujalt. Vastava CO₂ tonni kohta ühikukulu hindamisel ei lähtunud me seetõttu investeeingu kapitalikulu ja opereerimise kulu modelleerimisest, vaid eeldatavalt sobiva, käesoleval ajal avalike andmete põhjal teada oleva tehnilise lahenduse teenusepakkuja hinnainformatsioonist. Üheks potentsiaalselt sobivaks võimaluseks on kaaluda CO₂ laevatranspordi ja ladustamist Norra ranniku lähedale Põhjamerre ühisprojekti „Longship CCS“ (<https://ccsnorway.com/>) raames. CO₂ laevatranspordi ja Põhjamerre ladustamise teenuse ligikaudne hind on nendelt saadud esialgse informatsiooni kohaselt 43–55 eurot CO₂ tonni kohta. Oluline on pöörata tähelepanu ka teenusepakkuja hinnainformatsiooni selgitustele, et Eesti tingimustes, kus on vajalik jääklassiga laev ning kus transpordikaugus on võrreldes teiste Läänemere lähtekohtadega üks pikemaid, võib kulu osutada ka eeltoodud ligikaudsest hinnaindikatsioonist kõrgemaks ning et teenuse osutamise alustamist planeeritakse alates 2030. aastast. Oleme eeldanud, et nimetatud teenus katab ka ladustatud CO₂ järelhoolduse ja edasise seire. Sarnaselt CO₂ püüdmise ja torustranspordiga on CO₂ tonni kohta ühikukulu tundlik püütava CO₂ koguse ja regulaarsuse suhtes.

Eeltoodut arvestades on stsenaariumi A korral põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütava CO₂ transpordi ja ladustamise kulud esialgse hinnangu kohaselt kokku vähemalt 47–59 eurot CO₂ tonni kohta, kuid vajalikud võivad olla täiendavad investeeringud taristusse ja täiendavad opereerimiskulud

olenevalt laevatranspordi ja ladustamisteenuse vajadustest ja võimalustest. Lisaks on oluline arvestada toodud ühikukulu väga suure sensitiivsusega püütava CO₂ koguse ja regulaarsuse suhtes.

5.5 CCU/CCS tehnoloogiate rakendamise toetamise meetmetest

Nii CCU kui CCS tehnoloogia näol on suures pildis tegu uute tehnoloogiatega, mille kasutuselevõttu takistavad muuhulgas kõrged investeeringukulud, ebakindlus opereerimiskulude osas, lisaks muud tehnoloogilised ja ka turuga seotud riskid ning finantsriskid. Sellest tulenevalt on selliste projektide jaoks keeruline ja kallis ka laenukapitali kaasamine. Uute keskkonnasõbralike tehnoloogiate puhul on tavapärane, et nende turule jõudmiseks peab riik looma spetsiaalsed tingimused, näiteks investeeringutoetuste kaudu või erinevate poliitikainstrumentide kaudu investeerimiseks sobilikke tingimusi luues (st eeltoodud riskide maandamiseks). Allpool on toodud ülevaade mõningatest süsiniku püüdmis-, kasutus- ja ladustamistehnoloogiat toetavatest poliitikameetmetest. Kuna CCS tehnoloogiat on kauem uuritud, on selle kohta ka enam materjali leida, kuid üldjoontes on valitsuse sekkumise põhimõtted samad ka CCU puhul.

Poliitikainstrumendid jagatakse tavapäraselt kolme rühma: käsu- ja kontrollimeetmed, turupõhised meetmed ja muud (pehmed) meetmed. **Käsu- ja kontrollimeetmed** on peamiselt regulatiivsed meetmed, kus soovitud lahendus või tehnoloogia kehtestatakse riiklike regulatsioonidega. **Turupõhiste meetmetega** antakse turuosalistele rahaline stiimul soovitava lahenduse rakendamiseks. Turupõhiste meetmete näiteks on toetuse või maksusoodustuse pakkumine soovitavale lahendusele (nt CCU/CCS tehnoloogiat rakendavale ettevõttele) või ebasoovitava lahenduse maksustamine (nt süsinikumaks). **Pehmed meetmed** on pigem teavitavad meetmed, mille abil edastatakse turuosalistele informatsiooni, kuid mis ei kohusta turuosalist oma käitumist muutma (nt vastavate märgiste kasutamine). Pehme meetme näitena võib tuua ka riigihanke tingimuste kujundamine uusi tehnoloogiaid stimuleerivalt, nt võib hanke tingimuseks olla CCU/CCS tehnoloogia kasutamine tootmisel. Riigi sekkumise määr on suurim käsu- ja kontrollimeetmete puhul ning väiksem pehmete meetmete puhul [82]. Turupõhiste meetmete peamiseks eeliseks on nende kulutõhusus võrreldes regulatiivsete meetmetega ehk sama eesmärk saavutatakse väiksemate kuludega.

Kui riik soovib omalt poolt CCU tehnoloogiate kasutuselevõttu kiirendada, siis võib olla otstarbekas seda teha tehnoloogianeutraalsuse printsiipidest lähtuvalt ning turupõhiselt. Seda esiteks seetõttu, et toetusmeetmete kujundajatel endil enamasti ei ole kõigist võimalikest tehnoloogiatest ja sihtturgudest piisavalt detailset ülevaadet, aga samuti ka seetõttu, et säiliks vaba konkurents, mis põhineb saavutataval tulemusel. Sisuliselt tähendaks see, et turupõhiselt sõelutaks välja tehnoloogiad, mis on valmis CO₂ siduma (sisendina kasutama) kas võrreldes teiste kasutusvaldkondadega madalama toetusmääraga või siis ilma toetusteta.

Süsiniku sidumise tehnoloogiate potentsiaali võrdlemine on keerukas mitmel põhjusel. Põhimõtteliselt võib neid võrrelda kõiki koos ühel skaalal, kuid sellel pole palju praktilist väärtust. Kuna CCU-põhised tehnoloogiad enamasti asendaksid naftal põhinevat tehnoloogiat ja väga erinevaid vahe- või lõpp-produkte, siis sisukam oleks neid võrrelda just selliste komplektidena, mis sisuliselt pakuvad sama väärtust. Näiteks võrrelda kõigi erinevate ehitusvahtude saamise tehnoloogiaid, tootmise omahinda, vajalikke investeeringuid ja lõpptoote kvaliteeti. Eelduseks on, et kõigi võrdlusesse kaasatute puhul võetakse arvesse nn parim teadaolev tehnoloogia (BAT) ning võetakse arvesse keskkonnamõju kogu elukaare lõikes. See on äärmiselt oluline, sest enamik CCU tehnoloogiaid on väga energiamahukad. Arvesse tuleb võtta ka seda, et mõni produktidest, nt metanool, võib samal ajal klassifitseeruda nii

kütuste kui ka keemiliste vaheühendite valdkonda. Esimesel juhul tuleks võrrelda teda alternatiividena energeetilise väärtuse alusel.

CCU/CCS tehnoloogiatega kaasnevad suured investeeringukulud ning kõrged finantsriskid. Seega on välja pakutud, et nende tehnoloogiate arendamiseks vajalikud poliitikameetmed võiksid sisaldada **finantskomponenti** [83] ehk teisisõnu võiks eelkõige rakendada **turupõhiseid instrumente**. Kuid ka turupõhiste instrumentide rakendamise puhul on antud valdkonnas oluliseks eelduseks, et **valitud tehnoloogia roll kliimaeesmärgi saavutamisel on valitsuse poliitikas selgelt määratletud** [84] ning et see eesmärk ja sellega seotud poliitika on kujundatud **pikaks ajaks** [85]. Samuti on vajalik, et erinevad protsessi kaasatud osapooled (nt erinevad ministriumid) oleks eesmärkide osas ühel meelel, kuna ministriumide jt erinevad nägemused võivad saada takistuseks tehnoloogia väljaarendamisele [84].

Hollandi kogemus näitab, et uute ja kulukate tehnoloogiate nagu CCS puhul võiksid poliitikameetmed olla suunatud eelkõige [83]

- CO₂ püüdmistehnoloogia kulude vähendamisele;
- CO₂ infrastruktuuri ja ladustamise tõhusale korraldamisele;
- vastutuse ja kohustuste õiguslikule korraldusele;
- potentsiaalsete ladustamiskohtade tagamisele;
- piisavale finantstoetusele.

Valitavad poliitikameetmed sõltuvad eelkõige tehnoloogilisest küpsusest: tehnoloogia väljaarendamise varases etapis võib olla mõttekas kasutada eelkõige investeeringutoetusi ning alles siis, kui tehnoloogia on juba välja arendatud, võib olla otstarbekas kasutada n-ö karistavaid meetmeid nagu emissioonide maksustamine [86]. Euroopas heitkogustega kauplemise süsteem juba toimib ning kuna viimastel aastatel on märgataval tasemel ka heitme hind, siis selle kaudu on ettevõtetele rahaline signaal antud. Eesti puhul ei ole praegu CCU/CCS investeeringutoetusi veel kasutatud.

Põhjus, miks tehnoloogia väljaarendamise faasis võib olla vajalik riigi sekkumine, on see, et nii edendatakse tehnoloogiaga seotud teadmiste levikut, mis toob ühiskonnale suuremat kasu võrreldes olukorraga, kus informatsiooni levik jääks vaid erasektoris. Riiklik toetus on eriti oluline, kui ettevõtted konkureerivad rahvusvahelisel turul ning olukorras, kus uut tehnoloogiat rakendatakse riigiti erinevalt (mõned arendavad, mõned mitte). Aja jooksul muutuvad heitme-eesmärgid järjest rangemaks, millega kaasnevad ka suuremad kulud ning seetõttu võib olla vajalik, et poliitika stimuleeriks kõige kuluefektiivsemaid heitmete vähendamise mooduseid. Pikas perspektiivis muutub subsiidiumi kasutamine väga kulukaks ning samas võib eeldada, et üha enam riike rakendab uusi tehnoloogiaid, mistõttu sellises faasis võib jätta nii kulud kui riskid erasektori kanda ning toetuda turumehhanismidele, mis peaks viima efektiivse ressursside jaotuseni. [86]

Kuid kuna tehnoloogiate väljaarendamise alguses on oluline just teadmiste omandamine ja levik, siis selles faasis võib olla otstarbekas kasutada näiteks üht järgmistest investeeringutoetustest [86]

- kapitalitoetus (*capital grant*) – suunatud eelkõige ehitamisfaasile;
- investeeringu maksusoodustus (*investment tax credits*) – maksukohustuse vähendamine ettevõtetele, kes vastavasse tehnoloogiasse investeerivad;
- tootmissubsiidium (*production subsidy*) – makse iga ladustatud/kasutatud tonni CO₂ kohta;
- tootmise maksusoodustus (*production tax credit*) – maksukohustuse vähendamine ettevõtetele, kes CCU/CCS tehnoloogiaga toodavad;

- soodustariif (*feed-in tariff*) – fikseeritud hind toodangule, kus CCU/CCS tehnoloogiat kasutatakse;
- hinnapreemia (*premium feed-in tariff*) – hinnapreemia kogu toodangule, kus CCU/CCS tehnoloogiat kasutatakse;
- CCU/CCS portfoolio kohustus (*portfolio obligation*) – nõue, et teatud protsent või kogus toodangust oleks toodetud CCU/CCS tehnoloogiaga, võib olla ka kaubeldav.

Lisaks eeltoodule oleks eesmärgipärane toetada CCU/CCS-alast teadus- ja arendustegevust [72].

Tabel 15 toob välja erinevate meetmete eelised ja puudused CCU/CCS tehnoloogia puhul. Kuna tabelis on toodud finantsmeetmed, siis kõikide meetmete ühiseks eeliseks on finantsriskide vähendamine, kuid eelised või puudused on seotud sellega, kas konkreetse projekti valib välja riik (sel juhul on vaja vastavat ekspertiisi) või turg ning kas meede on suunatud reaalsele, töötavale projektile (tootmisfaasi) või projektiplaanile. Kõik tabelis nimetatud finantsmeetmed võivad saada avalikkuse kriitika objektiks, kuna riigi rahalised vahendid suunatakse konkreetsesse tehnoloogiatiipi, mida enamjaolt seostatakse ka suurte saastajatega, ning vähem jääb raha alternatiivsete tehnoloogiate toetamiseks.

Tabel 15. Erinevate poliitikameetmete eelised ja puudused CCU/CCS tehnoloogia puhul

Meede	Eelised ja puudused
Kapitalitoetus	– ei pruugi olla kuluefektiivne – toetuse saaja väljaselgitamiseks on vaja eksperte
Investeeringu maksusoodustus	+ turg otsustab, millist projekti toetatakse (kuluefektiivsus) – ei pruugi viia reaalse projektini
Tootmissubsiidium	+ turg otsustab, millist projekti toetatakse (kuluefektiivsus) + on suunatud tegutsevale tootmisele (reaalne projekt) – toetuse saaja(te) väljaselgitamiseks on vaja eksperte
Tootmise maksusoodustus	+ on suunatud tegutsevale tootmisele (reaalne projekt) + turg otsustab, millist projekti toetatakse (kuluefektiivsus) – mõjususe sõltub maksusoodustuse suurusest, mõjub maksukohuslastest ettevõtetele – toetuse saaja(te) väljaselgitamiseks on vaja eksperte
Soodustariif (<i>feed-in tariff</i>)	+ taastuenergia näitel väga edukad + olemasoleva finantsinstrumendiga sidumine on tõhusam uue instrumendi loomisest – keeruline ennustada õiget hinda (võrreldes taastuenergiaga), poliitiline ebakindlus – CCS-iga seotud sektorid ei ole nii homogeensed kui nt elektritoodang

Allikad: [86], [87], [84], [83], [88]

Kuna CCS puhul on tegu uue tehnoloogiaga, siis on maailmas rohkem kogemust investeeringutoetusega kui konkreetsete ja mittespetsiifiliste turumeetmete rakendamisega. Näiteks Norra otsustas 2020. aasta suvel investeerida 2,1 miljardit eurot (ehk 80% projekti maksumusest) CCS projekti, mis hõlmab kahe tehase investeeringuid: tsemenditehas ja jäätmete põletustehas [89].

Üldiselt kehtib Euroopa Liidus põhimõte, et konkurentsi ühisturul ei moonutata, mistõttu riigiabi võib anda vaid väga konkreetsetel eesmärkidel ehk sellistel juhtudel, mis on „hea abi“. Näiteks on erandid kehtestatud regionaalabi, teadus- ja arendustegevusabi ning keskkonna- ja energiaalase riigiabi osas [90]. Eespool nimetatud Norra CCS projekti investeeringutoetus näiteks leiti olevat kooskõlas Euroopa

majanduspiirkonna riigiabi põhimõtetega. Riigiabi lubatavus ja maksuõiguslikud küsimused käesolevas alapeatükis käsitletud meetmete osas Eesti põlevkivitööstuses CCU/CCS rakendamise kontekstis sõltuvad paljudest asjaoludest ning vastav õiguslik analüüs ei olnud projektiga ClimMit hõlmatud – potentsiaalsete toetusmeetmete edasisel valikul tuleb riigiabi lubatavusele ja maksuõiguslikele küsimustele kindlasti suurt tähelepanu pöörata.

Kuigi üldiselt nähakse, et algsed investeeringutoetused on vajalikud just seetõttu, et kaasa aidata teadmiste levikule ja õppimisprotsessile ning turu arenedes avaliku sektori roll väheneb, siis teatud tingimustel peab arvestama avaliku sektori rolli potentsiaalse säilimisega CCU/CCS projektides. Sellisteks tingimusteks on näiteks juhud, kui:

- valitsus soovib hallata vastavat programmi;
- seotud sektor kuulub valitsusele;
- seda nähakse kui riigi strateegilist investeeringut;
- investeering aitab tugevdada riigi tehnilist võimekust;
- seotud sektor on oluliselt mõjutatud väliskaubandusest ning riik soovib selle ekspordi suurendada;
- regulatsioonide/poliitihuvide tõttu ei soovita kulusid tarbijatele üle kanda (nt elektri puhul). [86]

Eesti puhul võib olla oluline ka kliimaleppe eesmärgi täitmine, mis ilma täiendavate meetmete rakendamiseta läheb järjest keerulisemaks. Tõusev CO₂ emissioonikvootide hind tähendab ühest küljest lõhe vähenemist CO₂ püüdmise ja sellest vabanemise kulu vahel ja potentsiaalselt selle lõhe ületamist, kuid teisalt põlevkivitööstuse konkurentsivõime kadumist, võrreldes turul konkureerivate alternatiividega, mille tootmisel sarnast CO₂ heidet ei teki. Samuti on väga oluline asjaolu, et Eesti põlevkivisektori ja sellega seotud sektoritega on haaratud suur osa Ida-Virumaa tööhõivest, mistõttu valitsusel peaks olema huvi probleemide lahendusele suunatud investeeringute vastu ning jääb tõenduspõhiste ja õiguspäraste valikute küsimuseks, millisel moel ja milliste investeeringutega kliimaküsimustele, energiapuudusele, majanduse konkurentsivõimele, tööhõivele jm sotsiaal-majanduslikele probleemidele kompleksed ja jätkusuutlikud lahendused leida.

5.6 Kokkuvõte põlevkivitööstuses CCU/CCS rakendatavuse majandusanalüüsist

Summad, mis Eesti põlevkivisektoris kujuneks CO₂ püüdmise ja ladustamise kuluks CO₂ tonni kohta stsenaariumite 2A ja 2B korral 2018. aasta Eesti väärtustesse teisendatuna olenevalt elektri- või õlitööstuse tehnoloogiast ning CO₂ püüdmise tehnoloogiast, võtab kokku järgnev Tabel 16.

Tabel 16. CO₂ püüdmise ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR/tCO₂) stsenaariumide 2A ja 2B korral

Tööstus	Elektritootmine				Põlevkiviõlitööstus		
	AEJ (Alstom)		Eesti EJ/Balti EJ (FW)		Enefit-280		Petroter
Tootmisplokk	Hapnikus	Absorpt-	Hapnikus	Absorpt-	Hapnikus	Absorpt-	Absorpt-
Püüdmistehnoloogia	põletamine	sioon	põletamine	sioon	põletamine	sioon	sioon
	OXY	PCC	OXY	PCC	OXY	PCC	PCC
Stsenaarium A							
Aastane maks. püütav CO ₂ kogus (milj t)	1,83		1,34 / plokk (kokku 2,68)		0,46		0,16 / plokk (kokku 0,49)
CO ₂ püüdmise ligikaudne kulu (sh puhastus ja komprimeerimine) (EUR CO ₂ tonni kohta)	29	34	34	42	50	51	73

Tööstus	Elektritootmine				Põlevkiviõlitööstus		
Tootmisplakk	AEJ (Alstom)		Eesti EJ/Balti EJ (FW)		Enefit-280		Petroter
Püüdmistehnoloogia	Hapnikus põletamine OXY	Absorptsioon PCC	Hapnikus põletamine OXY	Absorptsioon PCC	Hapnikus põletamine OXY	Absorptsioon PCC	Absorptsioon PCC
Püütud CO ₂ transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR CO ₂ tonni kohta)				min 47-59			
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR CO ₂ tonni kohta)	min 76–88	min 81–93	min 81–93	min 89–101	min 97–109	min 98–110	min 120–132
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu toodanguühiku kohta (EUR/MWh – elekter; EUR/t – põlevkiviõli)*	min 93–107	min 103–118	min 108–124	min 124–140	min 166–186	min 167–188	min 135–149
Stsenaarium B							
Aastane maks. püütav CO ₂ kogus (milj t)	0,91		0,67 / plokk (kokku 1,34)				
CO ₂ püüdmise ligikaudne kulu (sh puhastus ja komprimeerimine) (EUR CO ₂ tonni kohta)	43	51	54	66			
Püütud CO ₂ transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR CO ₂ tonni kohta)			min 47–59				
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR CO ₂ tonni kohta)	min 90–102	min 98–110	min 101–113	min 113–125			
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu toodanguühiku kohta (EUR/MWh)*	min 110–124	min 124–140	min 133–149	min 158–174			

* kulu on lihtsustatult jagatud vaid elektri/õli kui põhitoodangu peale, jättes välja kõrvalsaadused

Tööstuses CO₂ kasutust võimaldavate praegu rakendatavate tehnoloogiate sõelumisel (ptk 3) ei ole projekti käigus leitud Eesti põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütavale CO₂-le ei Eestis ega ekspordituna kasutamiseks olulist majanduslikku eelist (st stsenaarium 1 kõrvalejätmist), mistõttu võiks olla peamiseks võimaluseks püütud CO₂-st vabanemiseks selle ladustamine Põhjamere all Norra ranniku lähedal (st stsenaarium 2). Sel juhul oleks vajalik püütud CO₂ torustransport põlevkivitööstusest eeldatavalt Sillamäe sadamasse ja sealne infrastruktuur, mille rajamise ja opereerimise kulu on stsenaariumi A eeldustel vähemalt ca 4 eurot CO₂ tonni kohta (sama on eeldatud ka stsenaarium B korral, kuna torustranspordi võimekus peab vastama elektrijaamade täisvõimsusele ka jaamade

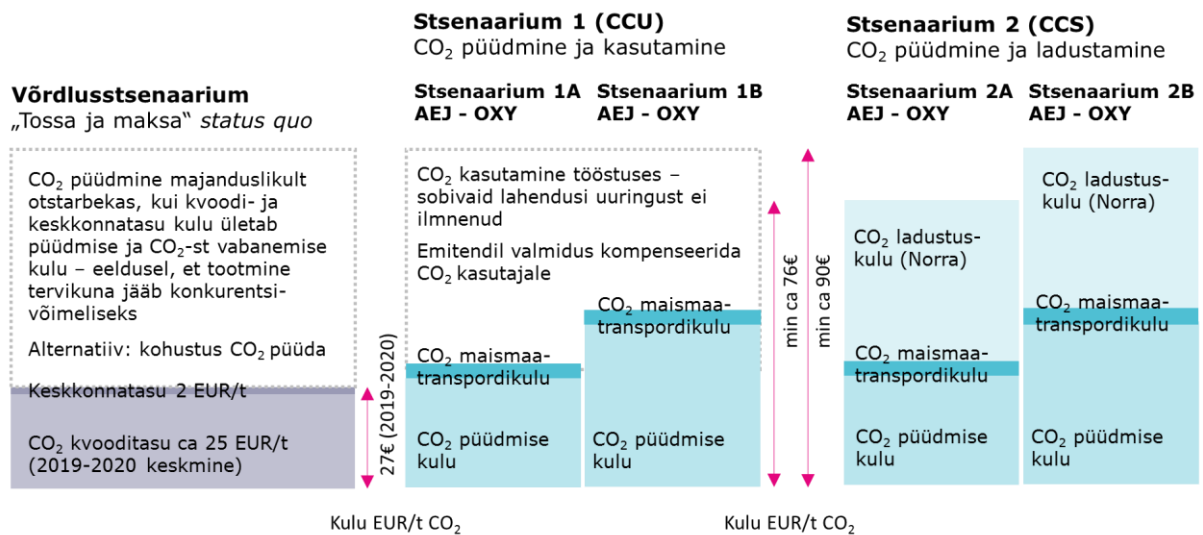
madalama töötundide arvu korral), kuid see võib oluliselt muutuda, kui täpsustuvad laevatranspordi ja ladustamisteenuse osutamise tehnoloogilised võimalused ja vajadused. CO₂ laevatranspordi ja Põhjamerre ladustamise teenuse ligikaudne hind on saadud hinnainformatsiooni kohaselt 43–55 eurot CO₂ tonni kohta. Arvestades, et püütud CO₂ transport ja ladustamine on põlevkivitööstusettevõtetele täiendav kulu, võiksid oluliselt kõrgema CO₂ kvooditasu juures, mis motiveerib CO₂ püüdma, CO₂ emitendid eeldatavalt valmis olla CO₂ kasutajale kompenseerima ladustamise kui alternatiivi kulu.

CO₂ püüdmine koos lisanduva transpordi ja ladustamisega oleks küll tehnoloogiliselt teostatav, kuid oluliselt kulukam võrdluses CO₂ kvooditasude nii praeguse taseme kui futuuride hindadega ning lisanduvate keskkonnatasudega (2019–2020 andmetel kokku ca 27 eurot CO₂ tonni kohta). Seetõttu puudub praeguses turusituatsioonis põlevkivitööstuses majanduslik ajend CO₂ püüdmiseks. CO₂ püüdmine oleks majanduslikult otstarbekas alles siis, kui kvoodi- ja keskkonnatasude kulu ületaks püüdmise ja CO₂-st vabanemise kulu. Ka juhul, kui CO₂ kvooditasu peaks tulevikus tõusma nii kõrgele, et CO₂ püüdmine ja püütud CO₂-st vabanemine muutuvad sellele rahaliselt tasuvaks alternatiiviks, peab arvestama, et lisanduvate CCS/CCU kulude juures ei pruugi Eesti põlevkivielekter olla avatud turul püsivalt konkurentsivõimeline, eeskätt konkurents CO₂ mitteemiteerivate tootjatega.

Alternatiiv oleks riiklik sekkumine CO₂ heitmete kui negatiivse välismõju vähendamisse, kehtestades kohustuse CO₂ püüda, või toetusmeetmed, mis muudaksid CO₂ püüdmise tootjatele majanduslikult otstarbekaks, kuid siis kaasneb vajadus püüdmise kulu kas tootjatele või maksumaksjatele üle kanda, mis omakorda tähendaks negatiivset efekti majanduse konkurentsivõimele. Kuna turutingimustel ega toetusmeetmete korral ei oleks CO₂ püüdmine põlevkivitööstuses praeguste tehnoloogiate juures hinnanguliselt rahaliselt otstarbekas ega konkurentsivõimelist tegutsemist võimaldav, jääb riigi otsustada, kas energiajulgeoleku kaalutlused või muud välismõjud, mille hindamist käesolev uuring ei hõlma, õigustavad põlevkivitööstuses CO₂ püüdmise toetamist ja/või kohustamist.

Kuna mis tahes püüdmisseadmed töötavad mittetäieliku efektiivsusega (nt PCC eeldatavalt ca 90% efektiivsusega), paiskub püüdmata jääv CO₂ õhku ning selle pealt potentsiaalselt makstavad tasud kujutavad endast veel üht kulu, mille suurust tulevikus on raske hinnata. Kui emiteeritava CO₂ kulu on kõrgem kui püütud CO₂ kulu, ajendab see püüdmistehnoloogiat (efektiivselt) rakendama, kuid vastasel juhul oleks motivatsioon püüdmistehnoloogiat rakendada piiratud. Seega sõltub püüdmata jääva CO₂ kulu regulatiivsest keskkonnast (nt võivad väljapaisatava CO₂ suhtes kehtida teatud sanktsioonid).

Kokkuvõtvalt illustreerib alternatiive CCS/CCU rakendamise kaalumisel järgnev joonis 7.



Joonis 7. Põlevkivitööstuses CO₂ püüdmise majanduslik ja regulatiivne koondvaade

Käesolev uuring annab põhjaliku ülevaate Eesti põlevkivitööstuses CCS/CCU rakendamise tehnoloogilistest ja majanduslikest aspektidest. Eesti energiastrateegia kujundamiseks muutuvates tehnoloogilistes, majanduslikes, ühiskondlikes ja keskkonnavalastes tingimustes oleks hädavajalik edasine tõendus põhine analüüs, mis vastaks küsimustele, millised energiatehnoloogiad, mis mahus ja mis ajal turule sisenedes oleksid eeldatavalt konkurentsivõimelised; millised on prognoositavalt ajas toimuvad muutused energianõudluses; kuidas tagada energiapakkumine nõudluse rahuldamiseks igal aastal, kuul, päeval ja tunnil; ning millised on energiatehnoloogiliste alternatiivide sotsiaal-majanduslikud aspektid – positiivsed/negatiivsed välismõjudele (keskkonna, tööhõive, regionaalprobleemide, ringmajanduse jm aspektid) ning mõju avaliku sektori eelarvele (maksutulu, ressursi- ja keskkonnatasud, vajalikud toetusmeetmed jm). Selge ja tõendus põhine analüüs põhinev energiastrateegia peaks selguse ja kindluse erainvestoritele, panustaks avalike ressursside optimaalsesse kasutamisse ja energia varustuskindluse tagamisse.

6 Uuringu peamised tulemused

Põlevkivitööstuses lähitulevikus rakendamiseks oleks tehnoloogilisest aspektist kõige sobivamad CO₂ püüdmise tehnoloogiad absorptsioon ja hapnikus põletamine.

Kuigi võimalikke püüdmistehnoloogiad on palju, sobivad hetketeadmiste tuginedes põlevkivitööstuses lähitulevikus kasutamiseks ainult absorptsiooni (sh mitmefaasilise absorptsiooni) ja hapnikus põletamise tehnoloogia. Kuigi potentsiaalseid tehnoloogiad CO₂ püüdmiseks on teisigi, on nende puhul kõige suuremaks takistuseks nende lähitulevikus kasutuselevõtu juures mitme tehnoloogia madal valmidustase. Lisaks on mõned tehnoloogiad tundlikud põlevkivi põlemisgaasis sisalduvatele saasteainetele. Sõltuvalt vähemarendatud tehnoloogiate valmidustasemest oleks tõenäoliselt vaja veel vähemalt 5–10 aastat teadus- ja arendustegevusi, enne kui need on tööstuses rakendatavad.

Uuemad tehnoloogiad võivad olla tõhusamad, aga need pole valmis tööstuslikus skaalas kasutamiseks.

Tööstust ja energiatootmist ilmestab tugev sõltuvus fossiilsetest ressurssidest. Nende ressursside kasutamisel rakendatavates protsessides otseselt tekkivat CO₂ kogust on keerukas vähendada, kuna CO₂ pärineb keemilistest või füüsikalistest reaktsioonidest, mis on protsesside toimimise aluseks. Seega on selliste protsesside puhul esmaseks lahenduseks CO₂ püüdmise tehnoloogiate rakendamine. CO₂ püüdmiseks uuritakse ja arendatakse jätkuvalt erinevaid tehnoloogiad, mille kulu on tõenäoliselt madalam kui absorptsiooniprotsessi või hapnikus põletamise korral. Siiaamaani on neid aga katsetatud ainult suhteliselt väikeses mastaabis ja tööstuslike katseteni jõutud ei ole. See tähendab, et CO₂ püüdmise kulu võib olla võimalik tulevikus vähendada, kuid selle saavutamiseks vajaliku investeeingu maksumus ei ole hetkel teada.

Hetketeadmiste juures on potentsiaalselt püütava CO₂ ladustamise sobivaim koht Põhjamere all.

Eestis puuduvad CO₂ ladustamise võimalused. Lätis ja Leedus on olemas piisav summaarne ladustuspotentsiaal, kuid see on jagatud paljude väiksemate geoloogiliste formatsioonide vahel. Lisaks ei ole CO₂ ladustamine Lätis seadusandlusega lubatud. Seevastu Põhjamere all Norra ranniku lähedal on olemas suur ladustamise potentsiaal, CO₂ ladustamise alased teadmised ja ka pikk kogemus. Lisaks tegeletakse seal tööstusest püütava CO₂ ladustamise infrastruktuuri arendamisega, et võimaldada teistest Euroopa riikidest laevaga transporditava CO₂ ladustamist. Sobivaim viis CO₂ transportimiseks Eestist Norra ongi laevatransport.

Maailmas tekkivast CO₂ kogusest oleks hetkel võimalik kasutada vaid väikest osa.

CO₂ transpordile ja ladustamisele pakub alternatiivina huvi CO₂ kasutamine lähteainena tööstuses. CO₂ kasutamise võimalusi on palju ja mingil määral põlemisprotsessides tekkivat CO₂ juba tööstuses ka kasutatakse. Olulisemaks CO₂ kasutusvaldkonnaks on olnud tema pumpamine nafta- ja gaasimaardlatesse viimaste täiendavaks tootmiseks. Ülejäänud kasutusvõimaluste korral on vajalikud CO₂ kogused maailma mastaabis suhteliselt väikesed, moodustades umbes 1,4% inimtekkelisest (st fossiilsete kütuste kasutamisega ja maakasutusega seotud) CO₂ kogusest. Lisaks on paljud kasutamistehnoloogiad endiselt arendamisel või on selliselt toodetud produktide hind liiga kõrge ja neid ei ole võimalik lähiaastatel tööstuslikult kasumlikult rakendada. Sünteetiliste kütuste turg on küll väga suur, aga praegused tehnoloogiad ei võimalda veel CO₂-st konkurentsivõimelise hinnaga

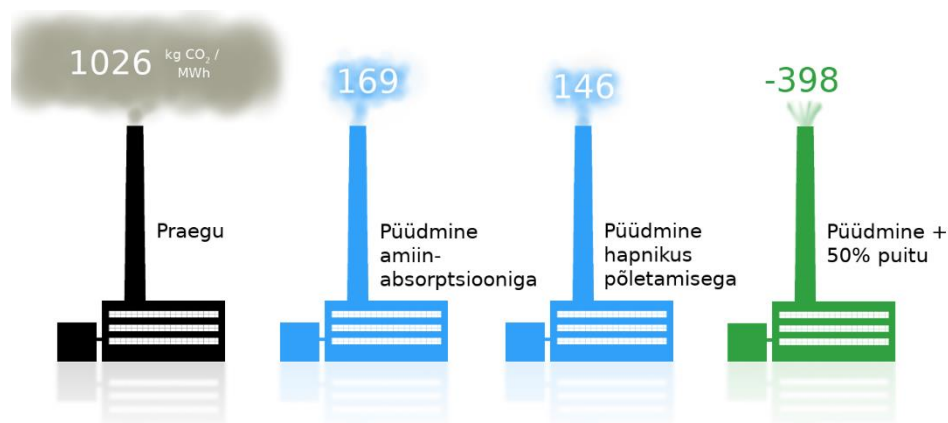
sünteetiliste kütuste tootmist. Hoolimata sellest, et hetkehinnangutele tuginedes on keemiatööstuses kasutatava CO₂ kogused maailma mastaabis väikesed, võiks oodata CO₂ põhiste sünteetiliste kütuste osakaalu märkimisväärset kasvu nende tootmiskulu vähenemisel.

CO₂ püüdmise rakendamine võimaldaks muuta elektrijaamades toodetud elektri CO₂ jalajälje negatiivseks.

CO₂ püüdmise protsessi tulemusena väheneb omatarbe suurenemisest tulenevalt energiablokkide kasulik võimsus. Siiski on põlevkivielektrijaamade puhul tegemist olemasoleva püsiva tootmisvõimsusega, mis on oluline elektrivõrgu stabiilseks toimimiseks. Seejuures tagatakse stabiilne elekter siseriiklike ressurssidega.

Olelusringi hindamine näitas, et Auvere elektrijaama CO₂ ekvivalendile taandatud emissiooniks on 1026 kg CO₂ ekv ühe MWh toodetud (neto) elektri kohta. Vanemate FW keevkihtpõletusplokkide (EEJ 8. plokki näitel) on vastav väärtus 1063 kg CO₂ ekv/MWh. Rakendades järelpüüdmist, on kasvuhoonegaaside emissioon 169 kg CO₂ ekv ühe MWh toodetud elektrienergia (neto) kohta Auvere elektrijaama näitel. Hapnikus põletamise tehnoloogia rakendamisel on summaarne keskkonnamõju väljendatuna CO₂ ekvivalendina emiteeritavate kasvuhoonegaaside koguses veelgi väiksem, olles 146 kg CO₂ ekv ühe MWh toodetud elektrienergia (neto) kohta. Juhul kui nimetatud protsessides tekkivat põlevkivituhka kasutatakse ehitusmaterjalina, siis CO₂ emissioon olelusringi mõistes väheneks veelgi. Kuna antud aruandes käsitleti põlevkivituhka inertse materjalina, arvestamata tema võimet siduda atmosfäärist CO₂, siis on tuha kasutamise mõju elektritootmise olelusringile väike, vähendades CO₂ emissiooni 3 kg CO₂ ekv ühe MWh toodetud elektrienergia (neto) kohta.

Uue 275 MW_e netovõimsusega hapnikus põletamise tehnoloogiat rakendava elektrijaama korral, kus kütusena kasutatakse hakkepuitu (50%) ja põlevkivi (50%), oleks summaarne CO₂-ekvivalendile taandatud emissioon -398 kg CO₂ ekv ühe MWh toodetud elektrienergia (neto) kohta.



Joonis 8. CO₂ jalajälg (kg CO₂ MWh) erinevate elektri tootmise stsenaariumite korral

Hapnikus põletamist võib rakendada põlevkivikatlas ilma suurte muudatusteta.

Põlemine ehk kütuses sisalduva keemilise energia muundamine soojusenergiaks on keeruline protsess. Selles muundamisprotsessis tekivad laguproduktid, mille edasisel oksüdeerumisel vabaneb energia ja ka keemiliselt stabiilne ühend CO₂. Põlemisprotsessi, mis muuhulgas sõltub kasutatavast kütusest, on võimalik mõjutada erinevate parameetrite varieerimisega, millest kõige võimalusterikkam on põlemiskeskonna muutmine. Põlemiskeskonna muutmist kasutatakse nn hapnikus põletamise tehnoloogias, mis klassifitseerub CO₂ püüdmistehnoloogiks. Tulenevalt hapnikus põletamise

tehnoloogia ja põlevkivi koostise eripäradest, sobib see tehnoloogia väga hästi rakendamiseks põlevkivitööstuses. Projekti käigus viidi läbi katsed 60 kW_{th} keevkihiga katseadmel, selleks et hinnata hapnikus põletamise tehnoloogia rakendamise mõju katla tööle ja emissioonidele. Paralleelselt rakendati protsessi spetsiifika uurimiseks termilist analüüsi ning modelleerimist. Tulemused näitasid, et hapnikus põletamist on võimalik kasutada põlevkivi põletamisel, ilma et oleks vaja katelt oluliselt muuta. Kui hapniku kontsentratsioon sisenevas gaasisegus oli väiksem kui 40%, olid saasteainete sisaldused põlemisgaasis sarnased nende sisaldustele õhus põletamisel. Näiteks nii hapnikus põletamise kui ka õhus põletamise katsetes oli NO_x-ide kontsentratsioon enamasti 200–450 mg/Nm³ (taandatud 6%-le hapniku sisaldusele) ja SO₂ kontsentratsioon oli üldiselt <50 mg/Nm³ (6% O₂). Tuha koostisele hapnikus põletamine olulist mõju ei avaldanud, välja arvatud madalam vaba lubja ja suurenenud CaCO₃ sisaldus hapnikus põletamise tuhas. Madalam CaCO₃ lagunemisaste tõstab mõnevõrra ka tuha kogust, vähendades samas CO₂ emissiooni kütuse mineraalosast.

CO₂ püüdmise ja puhastamise kulu oleks ka tuvastatutest soodsaima stsenaariumi korral nii kõrge, et selle rakendamine Eesti põlevkivitööstuses ei oleks (vähemasti tänaste Euroopa Liidu kasvuhoonegaaside lubatud heitkoguse ühikutega kauplemise süsteemi hindade põhjal) eeldatavalt majanduslikult otstarbekaks.

Oleme uuringus vaadelnud kolme peamist stsenaariumi:

- **stsenaarium 1:** CO₂ püüdmine ja kasutamine Eesti tööstuses (CCU);
- **stsenaarium 2:** CO₂ püüdmine ja ladustamine (CCS);
- **võrdlusstsenaarium:** praegune olukord ehk CO₂ emiteerimine koos kvoodi- ja keskkonnatasude tasumisega (nö „tossa ja maksa“).

Stsenaariumide 1 ja 2 korral on ühiseks komponendiks CO₂ püüdmine koos puhastamisega, mille kulu oleme hinnanud kahes alastsenaariumis:

- **stsenaarium A:** CO₂ püüdmise ja puhastamise tehnoloogiat rakendatakse täisvõimsusel (tavahoolduste ja seisakutega arvestades 85% koguaajast ehk 7446 töötundi aastas);
- **stsenaarium B:** CO₂ püüdmise tehnoloogiat rakendatakse poole madalamal võimsusel (st 42,5% ehk 3723 töötundi aastas, mis näitlikustab ligikaudu olukorda, kus põlevkivielekter on turul konkurentsivõimeline vaid piiratud osa ajast, kuid samas kasutatakse tootmise sisendina ära olemasoleva Enefit-280 tehnoloogiaga põlevkiviõli tootmisel tekkiv uttegaas).

CO₂ püüdmise ja puhastamise kulu CO₂ tonni kohta 2018. aasta Eesti rahalistesse väärtustesse teisendatuna väljendab allolev Tabel 17 nii stsenaariumis A täisvõimsusel töötamise eeldusel kui stsenaarium B korral, mille tegelikkuses realiseerumist võib pidada turuolukorda arvestades tõenäolisemaks kui stsenaariumi A.

Peamisteks kulukomponentideks on investeeringu kapitalikulu ja elektrikulu. Kulu CO₂ tonni kohta on väga tundlik investeeringusumma elektriinna ja seadmete kasutusaja/intensiivsuse suhtes – nt elektritootmisploki sulgemine varem kui 25 aasta jooksul (millele viitab FW plokkide mahukas investeeringuvajadus katelde kasuliku tööea lõppedes) või põlevkivist elektri tootmine vaid neil piiratud ajavahemikel, kui see on turul konkurentsivõimeline, tähendaks püüdmisseadmete kasuliku tööea lühenemist, realiseeritava töömahu olulist vähenemist ja seeläbi märgatavat kulu tõusu iga püütava CO₂ tonni kohta (vt sensitiivsusanalüüs lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ sh ka elektriinna ja kasutustundide suhtes).

Ei ilmnenud kindlalt kulutõhusaid võimalusi potentsiaalselt püütava CO₂ kasutamiseks Eesti tööstuses ning sellest vabanemise lahendus oleks transportimine ladustamiseks Põhjamerre alla.

Tööstuses CO₂ kasutust võimaldavate hetkel rakendatavate tehnoloogiate sõelumisel ei ole projekti käigus leitud Eesti põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütavale CO₂-le ei Eestis ega ekspordituna kasutamiseks olulist majanduslikku eelist (st stsenaarium 1 kõrvalejätmist), mistõttu võiks olla peamiseks võimaluseks potentsiaalselt püütavast CO₂-st vabanemiseks selle ladustamine Põhjamerre alla Norra ranniku lähedale (stsenaarium 2). Sel juhul oleks vaja püütud CO₂ torustransport põlevkivitööstusest sadamasse ja sealne taristu (veeldamistehas), mille rajamise ja opereerimise kulu on stsenaariumi 2A eeldustel ligikaudu 4 eurot CO₂ tonni kohta, kuid see võib oluliselt muutuda, kui täpsustuvad laevatranspordi ja ladustamisteenuse tehnoloogilised võimalused ja vajadused. CO₂ laevatranspordi ja Põhjamerre ladustamise teenuse ligikaudne hind on saadud hinnainformatsiooni kohaselt 43–55 eurot CO₂ tonni kohta.

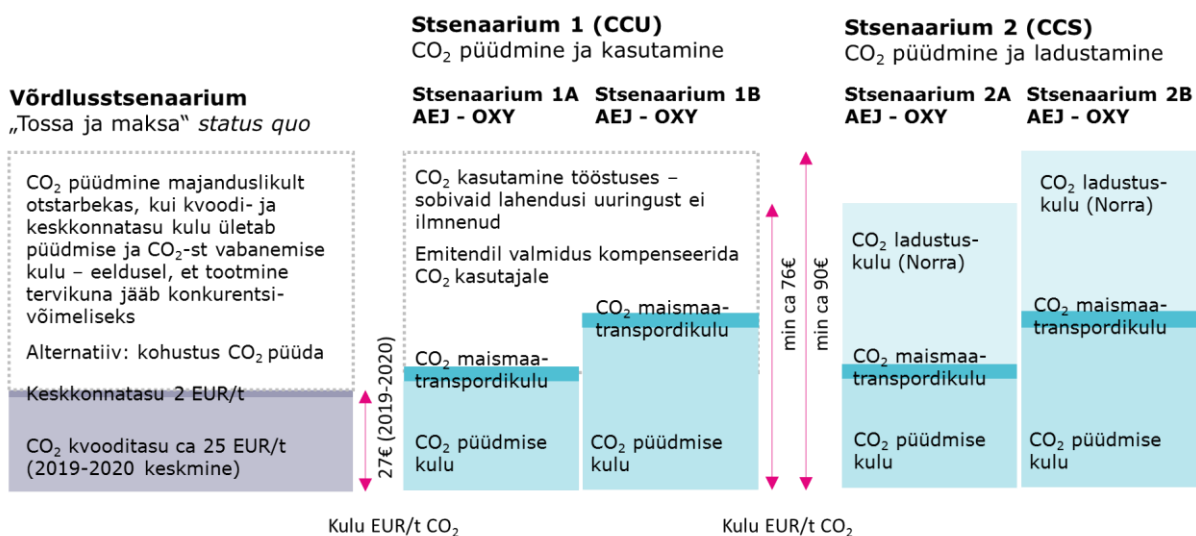
Põlevkivitööstuses CO₂ püüdmine ja Põhjamerre alla ladustamine ei ole praegustel tingimustel majanduslikult otstarbekas ning selle riiklik toetamine on küsitav ja vajaks täiendavat analüüsi teiste energiatootmise alternatiividega võrreldes.

CO₂ püüdmise kulu koos puhastamise ning lisanduva transpordi- ja ladustamiskuluga (st püüdmine koos ladustamiskuluga) on ka teadaolevalt efektiivseima lahenduse korral hinnanguliselt vähemalt ca 76 eurot CO₂ tonni kohta (stsenaarium 2A – AEJ – OXY), kuid pigem realistlikuma tootmisvõimsuse osalise kasutamise korral võib kulu olla oluliselt kõrgem, eelduslikult vähemalt ca 90 eurot CO₂ tonni kohta (stsenaarium 2B – AEJ – OXY). CO₂ püüdmine on küll tehnoloogiliselt teostatav, kuid oluliselt kulukam võrdluses CO₂ kvooditasudega 2019–2020 ning lisanduvate keskkonnatasudega (2019–2020 keskmise CO₂ kvooditasu põhjal kokku ca 27 eurot CO₂ tonni kohta), kuid ka 2021 jaanuari-veebruari keskmiste CO₂ kvooditasude ja vastavate futuuride hindadega. Seetõttu puudub praeguses turusituatsioonis põlevkivitööstusel majanduslik ajend CO₂ püüdmiseks.

CO₂ püüdmine oleks majanduslikult otstarbekas alles siis, kui kvoodi- ja keskkonnatasude kulu ületaks püüdmise ja CO₂-st vabanemise kulu. Samas tuleb arvestada, et kasvav CO₂ kvooditasu või CO₂ püüdmise ja sellest vabanemise kulu tähendab elektrienergiaturul lisakulu ja seeläbi konkurentsivõime langust neile turuosalistele (sh põlevkivielektritootmine), mille tootmisprotsessiga kaasneb CO₂ emissioon.

Alternatiiv oleks riiklik sekkumine CO₂ heitmete kui negatiivse välismõju vähendamisse, kehtestades kohustuse CO₂ püüda või toetusmeetmed, mis muudaksid CO₂ püüdmise tootjatele majanduslikult otstarbekaks. Nendel juhtudel kaasneb aga vajadus püüdmise kulu kas tootjatele või maksumaksjatele üle kanda, mis omakorda tähendaks negatiivset efekti majanduse konkurentsivõimele.

Kokkuvõtlikult illustreerivad majandusliku otstarbekuse aspektist CCU/CCS alternatiive Joonis 9 ja Tabel 17.



Joonis 9. Eesti põlevkivitööstuse CCU/CCS stsenaariumite majanduslikud aspektid (AEJ-OXY näitel)

Tabel 17. CO₂ püüdmise ja ladustamise ligikaudne kulu stsenaariumite 2A ja 2B korral

Tööstus	Elektri tootmine				Põlevkiviõlitootustus		
	AEJ (Alstom)		Eesti EJ/Balti EJ (FW)		Enefit-280		Petroter
Tootmisplakk	Hapnikus põletamine	Absorpt-sioon	Hapnikus põletamine	Absorpt-sioon	Hapnikus põletamine	Absorpt-sioon	Absorpt-sioon
Püüdmistehnoloogia	OXY	PCC	OXY	PCC	OXY	PCC	PCC
CO₂ püüdmise ja puhastamise seadmete alginvesteeringu maksumus (milj eurot)	214,1	257,1	216,7/ plokk	274,6/ plokk	118,9	121,3	69,2/ plokk
Stsenarium 2A							
Aastane maks. püütav CO ₂ kogus (milj t)	1,83		1,34 / plokk (kokku 2,68)		0,46		0,16 / plokk (kokku 0,49)
CO ₂ püüdmise ligikaudne kulu (sh puhastus ja komprimeerimine) (eurot CO ₂ tonni kohta)	29	34	34	42	50	51	73
Püütud CO ₂ transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (eurot CO ₂ tonni kohta)					min 47-59		
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (eurot CO ₂ tonni kohta)	min 76-88	min 81-93	min 81-93	min 89-101	min 97-109	min 98-110	min 120-132
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu toodanguühiku kohta (EUR/MWh – elekter; EUR/t – põlevkiviõli)*	min 93-107	min 103-118	min 108-124	min 124-140	min 166-186	min 167-188	min 135-149
Stsenarium 2B							
Aastane maks. püütav CO ₂ kogus (milj t)	0,91		0,67 / plokk (kokku 1,34)				
CO ₂ püüdmise ligikaudne kulu (sh puhastus ja komprimeerimine) (eurot CO ₂ tonni kohta)	43	51	54	66			

Tööstus	Elektri tootmine				Põlevkiviõlitööstus
Püütud CO ₂ transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR CO ₂ tonni kohta)	min 47-59				
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu (EUR CO ₂ tonni kohta)	min 90-102	min 98-110	min 101-113	min 113-125	
CO ₂ püüdmise, transpordi ja ladustamise ligikaudne kulu toodanguühiku kohta (EUR/MWh)*	min 110-124	min 124-140	min 133-149	min 158-174	

* kulu on lihtsustatult jagatud vaid elektri/õli kui põhitoodangu peale, jättes välja kõrvalsaadused

Oluline on tähelepanu pöörata tulemuste väga tugevale sõltuvusele stsenaariumi eeldustest, sh:

- Stsenaariumis A on eeldatud, et nii põlevkivist elektritootmine kui õlitööstus töötavad kõikide tabelis toodud tehnoloogiate puhul täisvõimsusel (s.o 85% kõigist aasta tundidest, arvestades tavapärase hoolduste ja seisakutega), ent tegelikkuses võib turutingimuste tõttu tootmiskaht olla märkimisväärselt madalam, mis tähendab, et püütava CO₂ maht on samuti madalam ning seeläbi on püüdmise ühikukulu oluliselt kõrgem – seda näitlikustab stsenaarium B (tootmine 42,5% aasta tundidest). Näiteks elektrienergia tulevikutehingute andmetele tuginev hinnanguline prognoos põlevkivist toodetud elektri avatud turul konkurentsivõimelisuse kohta viitab, et põlevkivielektri tootmine võib osutada lähematel aastatel konkurentsivõimeliseks vaid piiratud ulatuses elektritootmise potentsiaalsest tööajast, mis tähendab, et CO₂ püüdmistehnoloogia kasutuselevõtu korral oleksid püüdmisseadmed alakasutatud ning iga tonni püütud CO₂ kulu võib sel juhul olla stsenaariumist A oluliselt kõrgem. Enamgi veel, kuna põlevkivist elektri tootmine on konkurentsivõimeline elektrienergia kõrge turuhinna korral, tähendab see püüdmistehnoloogia elektritarbega seoses kõrgemat CO₂ püüdmise ühikukulu (saamata jääv elektrienergia müügitulu).
- CO₂ püüdmise ja transporditaristu investeeringute puhul on eeldatud 25-aastast kasulikku tööaega. Samas ei pruugi põlevkivitööstuses, nt FW elektritootmisplokkide puhul, seadmete kasutusaeg nii pikk olla, mis tähendab, et seonduvate püüdmisseadmete kasutusaeg võib osutada oluliselt lühemaks, suurendades seeläbi CO₂ püüdmise kulu iga tonni kohta püüdmisseadmete tegeliku tööea jooksul – seda olukorda näitlikustab sensitiivsusanalüüs lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 8. alapeatükis.
- CO₂ püüdmise ja edasise transpordi, kasutamise või ladustamise tehnoloogiate maksumuse ja opereerimiskulude hinnangud ei pruugi tegelikkuses sarnasena realiseeruda, kuna põlevkivitööstuses ei ole neid tehnoloogiaid varem kasutatud või ei ole need tehnoloogiad veel saavutanud lõplikku valmidustaset, mis kätkeb endast märkimisväärset tehnoloogilist riski. Kui investeeringud tehnoloogiasse või nende tehnoloogiate rakendamine osutub tegelikkuses kulukamaks, võib see oluliselt tõsta CCU/CCS ühikukulu – seda näitlikustab sensitiivsusanalüüs lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 8. alapeatükis.
- Lisaks on CCU/CCS ühikukulu hinnangud väga tundlikud investeeringute riskitaseme ja seda peegeldava kapitali hinna suhtes – seda näitlikustab sensitiivsusanalüüs lisas „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“ 8. alapeatükis.

7 Soovitused ja uuringust ilmnenu lähtekohad edasiste tegevuste üle otsustamiseks

Kliima- ehk süsinikuneutraalsuse suunas liikumine on võetud kindlaks sihiks. Energeetika on üks oluline valdkond, kus tekib suures koguses kasvuhoonegaase (peamiselt CO₂), mistõttu on seatud eesmärgiks kiire CO₂ emissioonide vähendamine selle sektoris. Kuna energeetika on valdkond, mis puudutab vähemal või rohkemal määral kõiki, siis on vajalikud kalkuleeritud otsused valikute üle, kuidas minna edasi nii, et seatud eesmärgid oleksid reaalselt saavutatavad ilma, et kahjustataks Eesti globaalset ja regionaalset konkurentsivõimet ning arvestataks seejuures kohalike elanike huve ja heaolu.

Pealtnäha lihtsaim võimalus süsinikuneutraalsuse saavutamiseks on fossiilsete kütuste kasutamise lõpetamine, mille suunas Euroopa Liit on osaliselt liikumas tänu olemasolevate valdavalt tolm põletuskateldel põhinevate tootmisvõimsuste eluea ammendumisele ja avalikkuse survele fossiilsete kütuste kasutamise vähendamise osas. Fossiilsete tootmisvõimsuste sulgemisi on toimunud ka Eestis, kus vanade põlevkivi tolm põletusplokkide ressurss on ammendunud ja peamiselt on jäänud alles keevkihttehnoloogial töötavad tootmisüksused, mille heitmed on võrreldes tolm põletuskateldega oluliselt madalamad. Tootmisvõimsuste sulgemise teine aspekt on see, et juhul kui alles jääv tootmisvõimsus ei ole piisav energiavajaduse katmiseks, tuleb sulgetav võimsus asendada eelistatult juhitava tootmisvõimsusega.

Seetõttu peab Eesti jätkuvalt kasvava energiavajaduse katmiseks põhjalikult kaaluma järgmiste valikute erinevaid aspekte:

- Kas minna teiste Euroopa Liidu riikide valitud energiapoliitilist teed, kus üleminekukütusena võetakse kasutusele fossiilne Venemaa päritolu maagaas, millest elektritootmise CO₂ jalajälg, eeldusel, et CO₂ püüdmist ei rakendata, oleks kõrgem võrreldes stsenaariumiga, kus elekter saadakse CO₂ püüdmist rakendavast põlevkivielektrijaamast.
- Kas reguleeritavate tootmisvõimsuste ja -varu olemasolu on Eestis vajalik.
- Kas liikuda kliimaneutraalsuse suunas lähtudes olemasolevast kohapealsest ressurssist ja tehnoloogilistest alternatiividest.

Arvestades neid punkte, on ilmne, et Eestis on tungiv **vajadus erinevaid energiatootmisvõimalusi hõlmava kompleksse uuringu järele, mis aitaks kujundada Eesti energeetika pikaajalist strateegiat ja toetaks tõenduspõhiste poliitikaotsuste vastuvõtmist.**

Käesolev uuring annab küll põhjaliku ülevaate Eesti põlevkivitööstuses CCS/CCU rakendamise tehnoloogilistest ja majanduslikest aspektidest, kuid energeetika pikaajalise strateegia kujundamiseks muutuvates tehnoloogilistes, majanduslikes, ühiskondlikes ja keskkonnalastes tingimustes oleks hädavajalik saada vastused järgmistele küsimustele:

- Millised energiatehnoloogiad, mis mahus ja mis ajal turule sisenedes oleksid eeldatavalt konkurentsivõimelised?
- Millised on prognoositavalt ajas toimuvad muutused energianõudluses?
- Kuidas tagada energiapakkumine nõudluse rahuldamiseks igal aastal, kuul, päeval ja tunnil?
- Millised on energiatehnoloogiliste alternatiivide sotsiaal-majanduslikud aspektid – positiivsed/negatiivsed välismõjud (keskkonna, tööhõive, regionaalprobleemide, ringmajanduse jm aspektid) ning mõju avaliku sektori eelarvele (maksutulu, ressursi- ja keskkonnatasud, vajalikud toetusmeetmed jm).

- Milline on objektiivne meetodika elektri hinna maksumuse hindamiseks erinevate energiatehnoloogiliste alternatiivide korral – kaaluda IEA VALCOE meetodi kasutuselevõttu.

Selge ja tõenduspõhisel analüüsil põhinev energeetikastrateegia looks selguse ja kindluse erainvestoritele, panustaks avalike ressursside optimaalsesse kasutamisse ja energia varustuskindluse tagamisse.

Elektrienergia tootmiseks on erinevaid võimalusi, kusjuures taastuvenergiaallikatest elektri tootmine suudab hinna osas olla fossiilkütustega järjest konkurentsivõimelisem. Seejuures ei tohi aga unustada **vajadust stabiilset baasvõimsust tagava elektritootmise võimekuse järele**, mida Eestis suudab hetkel kõige paremal viisil tagada olemasolev põlevkivielektritootmine. Selleks, et niisuguse baasvõimsuse tagamine oleks kooskõlas Euroopa Liidu nägemusega nn süsinikuneutraalsest majandusest, on vajalik CO₂ püüdmise tehnoloogia(te) integreerimine elektritootmise võimekusega.

Lähtudes käesoleva uuringu raames tehtud analüüsist, oleks tehnoloogilisest aspektist põlevkivitööstuses CO₂ püüdmisel otstarbekas rakendada hapnikus põletamise tehnoloogiat (v.a Petroteri tehnoloogiaga põlevkiviõlitootmises, kus on mõeldav absorptsiooni rakendamine). **Majanduslikust aspektist ei oleks praeguses olukorras Eesti põlevkivitööstuses CO₂ püüdmine aga mõttekas** – CO₂ püüdmise, puhastamise, transpordi ja ladustamisega kaasnevad kulud ületaksid oluliselt praegust alternatiivi ehk CO₂ kvooditasu ja keskkonnatasusid. Samuti **ei ilmnenud uuringust Eesti põlevkivitööstuses potentsiaalselt püütavale CO₂-le hetkel kõrge valmidustaseme saavutanud tehnoloogiatest kulutõhususelt kindlalt õigustatud suuremahulist kasutusvõimalust Eestis** ning paljudel juhtudel poleks tööstuses kasutamisel võimalik CO₂ pikaks ajaks siduda. Ka juhul, kui CO₂ kvooditasu peaks tulevikus tõusma nii kõrgele, et CO₂ püüdmine ja püütud CO₂-st vabanemine muutuvad sellele rahaliselt tasuvaks alternatiiviks, peab arvestama, et lisanduvate CCS/CCU kulude juures ei pruugi Eesti põlevkivielekter olla avatud turul püsivalt konkurentsivõimeline, eeskätt konkurentsivõimeliselt CO₂ mitteemiteerivate tootjatega. Samuti **on küsitav CO₂ püüdmise tehnoloogiasse investeerimine või kulude riiklik toetamine**, kuna see tähendab muude tingimuste samaks jäädes kõrgemat maksukoormust või kulude edasikandmist erasektoris, mis omakorda vähendab majanduse konkurentsivõimet. Eeltoodud tingimustes, kus turutingimustel ega toetusmeetmete korral ei oleks CO₂ püüdmine põlevkivitööstuses praeguste tehnoloogiate juures hinnanguliselt rahaliselt otstarbekas ega konkurentsivõimelist tegutsemist võimaldav, jääb **riigi otsustada, kas energia varustuskindluse ja hinnakõikumiste vähendamise kaalutlused või muud välismõjud, mille hindamist käesolev uuring ei hõlma, õigustavad põlevkivitööstuses CO₂ püüdmise toetamist ja/või kohustamist.**

Vajalikud on täiendavad uuringud selleks, et hinnata võimalusi Euroopa Liidu poolt seatud kliimaeesmärkide saavutamiseks nii, et oleks tagatud stabiilse elektrienergia tootmise võimekus ja – juhul kui sobivaks lahenduseks osutub CO₂ emissioone tekitav tootmine – loodud potentsiaalselt püütava CO₂ kui potentsiaalse toorme väärimise võimekus.

Parimate põlevkivile sobivate CO₂ püüdmise tehnoloogiate leidmiseks ja valikute mitmekesistamiseks on soovitatav ka erinevate, madalama tehnoloogiavalmiduse tasemega CO₂ püüdmise tehnoloogiate alasesse **teadus- ja arendustegevusse panustamine** – nt põlevkivi korral hapnikukandja ringlusega protsess kui potentsiaalselt madalaima energialdivuga CO₂ püüdmise protsessi. CO₂ püüdmiseks parima võimaliku tehnoloogia leidmise edukus sõltub CO₂ püüdmise alastest alus- ja rakendusuuringutest saadavatest teadmistest.

CO₂ püüdmise tehnoloogiate rakendamine on tehnoloogiliselt võimalik, kuid eeldab püütud CO₂ edasist käitlemist. Hetkel puudub CO₂ ladustamise turg ja seetõttu ka konkurents. CO₂ ladustamise ja transpordi turu tekkimiseks on oluline riikidevaheline dialoog CO₂ transpordi ja ladustamise alase seadusandluse ühtlustamiseks. Püütud CO₂ kui (keemia)tööstuse tooraine potentsiaali tugevdamiseks oleks ladustamise kõrval üheks oluliseks suunaks ka nn mineraalse karboniseerimise võimaluste uurimine, mis võimaldaks saada põlevkivituha baasil sadestatud kaltsiumkarbonaati ja/või karbonaatsidestatud ehitusmaterjale. Selle suuna eeliseks on CO₂ sidumine tahketesse materjalidesse, kasutades samas ära põlevkivituhas sisalduvad kaltsiumiühendid.

Kuna protsessid, kus CO₂ kasutatakse sünteesi lähteainena, on energiamahukad, siis eeldab see ka piisava energiaressursi olemasolu. Sellest tulenevalt on oluline panustada CO₂-st kemikaalide energiaefektiivse tootmise alastesse uuringutesse. CO₂ kasutusvõimaluste alase kompetentsi arendamine on perspektiivne isegi juhul, kui need tehnoloogiad ei suuda praegu lahendada põlevkivisektori heitmeprobleemi. Sünteetiliste kütuste valmistamine roheelektrist, CO₂-st ja H₂O-st ning elektrolüüsi ja gaasfermentatsiooni koosrakendamise erinevad võimalused nii kütuste kui kemikaalide tootmiseks teevad lähikümnenditel tõenäoliselt läbimurde. Selleks et teha õigeid valikuid ja olla valmis nende tehnoloogiate kasutuselevõtuks, on vaja **panustada nende tehnoloogiate arendusse ja rakendamisse nii teaduse kui piloottootmise (demosüsteemid) tasemel.**

8 Põlevkivienergeetikaga jätkamise kaalutlused

Käesoleva aruande põhiline järeldus on, et **järk-järgult kliimanetraalsuse suunas liikumine on tehniliselt võimalik ka olemasolevate põlevkivitööstuses kasutatavaid tehnoloogiaid kohandades, kuid see ei pruugi olla rahaliselt otstarbekas.** Lähituleviku vaates oleks põlevkivitööstuse säilitamine läbi CO₂ püüdmise tehnoloogiate rakendamise võimalik, kuid eeldab sotsiaal-majandusliku põhjendatuse analüüsi alternatiividega võrreldes. See pakuks võimaluse säilitada energiajulgeolek ning hoida ära põlevkivitööstuse järsust sulgemisest tingitud sotsiaalsed mõjud, mida tuleks eelnevalt alternatiividega võrdluses põhjalikult uurida. Oluline on ka mõista, et CO₂ püüdmise tehnoloogiate puhul ei ole tegemist võluvitsaga vaid abivahendiga energeetika ja ka CO₂-intensiivsete tööstusharude süsinikuneutraalseks muutmiseks – CO₂ püüdmine energiasektoris on üks võimalustest CO₂ emissiooni vähendamiseks, võimaldades samal ajal rahuldada kasvavat energiavajadust.

Selleks, et edukalt täita seatud süsinikuneutraalsuse saavutamise tähtaegu ja eesmärged, on oluline kaaluda põlevkivienergeetikaga jätkamise osas muuhulgas järgmiseid aspekte:

- CO₂ püüdmise alaste alus- ja rakendusuringutega tegelemine:
 - energiaefektiivsemate CO₂ püüdmise tehnoloogiate arendamiseks;
 - põlevkivitööstusest CO₂ püüdmiseks parimate võimalike tehnoloogiate leidmiseks;
 - erinevates tööstusharudes parimate võimalike CO₂ püüdmise tehnoloogiate leidmiseks.
- CO₂ kasutamise alaste alus ja rakendusuringutega tegelemine:
 - CO₂ kasutamine keemia- ja biotehnoloogiatööstuse lähteainena ei oma potentsiaalselt väga mastaapset mõju CO₂ heitkoguste vähendamisele, kuid võib tulevikus olla võimalus atraktiivsete süsinikuneutraalsete kütuste, kemikaalide ja muude toodete valmistamiseks.

- Eesti peaks tegelema tuhatekke protsesside uuringutega, et suurendada selle sobilikkust nt tsemendis kasutamiseks (kasutades vajadusel selleks nt uttegaase), vähendes nii tsemenditootmise CO₂ intensiivsust ja kasutatavaid maavarade koguseid.
- Auvere elektrijaamas CO₂ püüdmise rakendamine.
- Põlevkivi ja biomassi koospõletamisel saavutatav negatiivne CO₂ emissioon peab kajastuma kasvuhuonegaaside heitkoguse ühikutega kauplemise registris.
- Panustamine Londoni protokollis 2009. aasta paranduse, mille Eesti allkirjastas 2019. aastal, edasisele ratifitseerimisele teiste riikide poolt, mis lubaks CO₂ transporti ja ladustamist.
- Tegelemine EL-is finantseerimisvõimaluste otsimisega CO₂ püüdmise projektile.

Kokkuvõte

Põlevkivitööstusel on olnud Eesti majanduses oluline koht. Põlevkivi on olnud peamiseks ressursiks energeetilise sõltumatus tagamisel ja andnud olulise osa majanduse kogutoodangusse. Samas on põlevkivitööstus ka suurim CO₂ emissiooni allikas Eestis. Seoses kliimamuutustega on inimtekkelise CO₂-e (ja üldse kasvuhoonegaaside) emissiooni vähendamise vajadus kerkinud, eriti just viimastel aastatel, üheks olulisemaks teemaks maailmas. Kuna suur kogus kasvuhoonegaaside emissioonidest tuleb energeetikasektorist, on tekkinud tugev surve vähendada seal tekkivat CO₂-e kogust. Üks võimalus on kasutada tehnoloogiaid, millel on madalad CO₂-e eriheited (t_{CO_2}/MWh). Teine võimalus on jätkata fossiilkütuste kasutamist, samal ajal püüdes ja ladustades CO₂, et vältida selle sattumist atmosfääri. Arvestades elektriturule lisanduvate madalate CO₂ eriheitmetega tehnoloogiate sobimatust baaskoormuste katmiseks, oleks tehnoloogilisest aspektist lähtudes lähiajal põlevkivitööstuses olemasolevate tootmisüksustega jätkamiseks otstarbekas panustada CO₂ püüdmise ja ladustamise tehnoloogiate rakendamisse. Kuigi majanduslikult ei pruugi see olla otstarbekas, oleks see üks võimalus tagada oma riigi kodanikele ja siin tegutsevatele ettevõtetele kindel elektriga varustus igal ajal ja kindlustada olemasolevate töökohtade säilimine. Seega, kui Eesti otsustab olemasoleva põlevkivitööstusega jätkata, tuleb rakendada CO₂ püüdmistehnoloogiat kindlustamiseks Eesti kliimaeesmärkide saavutamiseks. Teiste sõnadega, nn kliimanetraalse majandusega keskkonnas tegutsemiseks peab põlevkivitööstus hakkama CO₂ püüdma. Seejuures tuleb arvestada, et CO₂ püüdmise puhul on tegemist keskkonnatehnoloogilise protsessiga, mis ei paranda lõpptootte kvaliteeti ja mille rakendamisega, sarnaselt teiste keskkonnatehnoloogiliste protsessidega, kaasnevad täiendavad kulud.

Antud projekti põhieesmärk oli hinnata erinevate CO₂ püüdmistehnoloogiate sobivust põlevkivitööstusele ning töötada välja stsenaariumid nende tehnoloogiate rakendamiseks Eesti põlevkivitööstuses, tuginedes hetke parimatele teadmistele. Samuti oli sihiks analüüsida sobivaimate lahenduste keskkonnamõju ning Eesti tööstussektori tehnoloogilist ja majanduslikku võimekust püütud CO₂ kasutada. Eesmärgi saavutamiseks moodustati Tallinna Tehnikaülikooli energiatehnoloogia instituudi professori Alar Konisti juhtimisel Tallinna Tehnikaülikooli ja Tartu Ülikooli konsortsium. Konsortsiumi läbiviidud uuring hõlmas järgmisi aspekte:

- tehti põhjalik kirjandusülevaade CO₂ püüdmistehnoloogiatest („CO₂ emissioonid ja CO₂ püüdmine“ ja lisa „CO₂ püüdmistehnoloogiad“), transportimisest ja ladustamisest (lisad „CO₂ transport ja ladustamine“ ja „CO₂ püüdmise ja ladustamise hetkeolukord“);
- tehti ülevaade CO₂ kasutamise võimalustest („CO₂ kasutamine tööstuses“);
- koostati ülevaade põlevkivitööstusest (lisa „Põlevkivitööstus Eestis“)
- arvutati põlevkivitööstuse CO₂ heitmed nii koos CO₂ püüdmisega kui ka ilma püüdmiseta (lisa „Olelusringi hindamine“);
- hinnati võimalike püüdmistehnoloogiate sobivust põlevkivitööstusele (lisa „Erinevate CCS tehnoloogiate rakendamise tehnilis-majanduslik analüüs Eesti põlevkivi kasutamisel energiaplokkides ja põlevkiviõli tootmisel“), ladustamise võimalusi Eesti lähedal (lisa „Geoloogiline ladustamine Eesti lähipiirkonnas“) ja potentsiaalseid püütud CO₂ kasutamise võimalusi („Täiendavad ja täpsustavad kommentaarid kemikaalipuhitusega ja toidupuhtusega CO₂ sobivuse kohta lähteainena kasutamiseks“ ja „Püütava CO₂ tööstuses kasutamise majanduslikest aspektidest“);

- viidi läbi katsed 60 kW_{th} CCS pilootseadmes, hindamaks hapnikus põletamise tehnoloogia rakendatavust põlevkivi põletamisel (lisa „Eesti põlevkivi hapnikus põletamise alased uuringud“);
- analüüsi CO₂ püüdmise ja ladustamise kulu („CO₂ püüdmise, puhastamise, kasutamise, transpordi ja ladustamise majandusanalüüs Eesti põlevkivitööstuse kontekstis“ ja lisa „Majandusanalüüsi täiendavad aspektid“).

Uuringu tulemusena leiti, et põlevkivitööstuses oleks tehnoloogilisest aspektist lähtudes lähitulevikus rakendamiseks kõige sobivamad CO₂ püüdmise tehnoloogiad absorptsioon ja hapnikus põletamine. Sõltuvalt valitavast CO₂ püüdmise tehnoloogiast, väheneks selle tulemusena Auvere elektrijaama näitel elektritootmise CO₂ jalajälg väärtuselt 1026 kg CO₂ ekv/MWh väärtuseni 169 kg CO₂ ekv/MWh (absorptsioon) või 146 kg CO₂ ekv/MWh (hapnikus põletamine). Majandusanalüüs näitas, et rahanduslikult aspektist ei oleks Eesti põlevkivitööstuses CO₂ püüdmine praegustel turutingimustel mõttekaks – CO₂ püüdmise, puhastamise, transpordi ja ladustamise rahalised kulud (vähemalt 76-88 eurot CO₂ tonni kohta põlevkivielektrijaama täisvõimsusel töötamise jm eeldustel) ületaksid oluliselt praegust alternatiivi ehk CO₂ kvooditasu (2021. aasta märtsis ca 40 eurot tonn) ja keskkonnatasusid. Küsitav on CO₂ püüdmise tehnoloogiasse investeerimine või kulude riiklik toetamine, kuna see tähendaks maksukoormust või kulude edasikandmist erasektorisse, mis omakorda vähendaks Eesti majanduse konkurentsivõimet. Samuti tuleb arvestada, et kasvav CO₂ kvooditasu või CO₂ püüdmise ja sellest vabanemise kulu tähendab elektrienergiaturul lisakulu ja seeläbi konkurentsivõime langust neile turuosalistele (sh põlevkivielektritootmine), mille tootmisprotsessiga kaasneb CO₂ emissioon.

Täiendavalt on võimalik elektritootmise CO₂ jalajälge vähendada põletamisel tekkiva tuha taaskasutamisega. Hakkepuidu ja põlevkivi koospõletamisel on võimalik saavutada ka negatiivne CO₂ emissioon, kui lähtuda eeldusest, et hakkepuidu põletamisel tekkivat CO₂ ei arvestata CO₂ emissioonina. Sellisel juhul oleks näiteks uue 275 MW_e netovõimsusega hapnikus põletamise tehnoloogiat rakendava elektrijaama korral summaarne CO₂-ekvivalendile taandatud emissioon –398 kg CO₂ ekv/MWh.

Summary

The oil shale industry has had an important place in Estonia's economy. Oil shale has been the main resource for ensuring energy independence and has made up a significant portion of the gross domestic product. At the same time the oil shale industry is also the largest source of CO₂ emissions in Estonia. Due to climate change the need to reduce anthropogenic CO₂ (and greenhouse gases in general) has become one of the most significant global topics, especially in recent years. Because a large amount of greenhouse gas emissions comes from the energy sector, there is strong pressure to its CO₂ emissions. One option is to use technologies that have low CO₂ specific emission rates (t_{CO2}/MWh). Another option is to continue using fossil fuels while also capturing and sequestering the CO₂ to avoid its release to the atmosphere. Considering the inability of low-emission technologies (primarily solar panels and wind energy) to cover the base load, in order to continue with the existing production units in the oil shale industry it is necessary in the near future to invest in implementing CO₂ capture and storage technologies. This solution may not be economically feasible, however, it would be one way to ensure a reliable supply of electricity for the nation's citizens and domestic companies and maintain existing jobs. Therefore, if Estonia decides to continue with the existing oil shale industry, CO₂ capture technology must be implemented to make sure Estonia's climate goals are achieved. In other words, to operate in the so-called climate neutral economy the oil shale industry must start capturing CO₂. It is important to recognize that CO₂ capture is an environmental technology that does not improve the quality of the final product and, as with other environmental technologies, leads to additional costs.

The main goal of the current project was to evaluate the applicability of various CO₂ capture technologies for use in the oil shale industry and to develop scenarios for their implementation in the Estonian oil shale industry based on the best information currently available. Additionally, an aim was to analyze the environmental impact of the most suitable solutions and the technological and economical ability of the Estonian industrial sector to utilize captured CO₂. To achieve this goal a consortium was formed consisting of Tallinn University of Technology and Tartu University and lead by Alar Konist, professor in the Department of Energy Technology at Tallinn University of Technology. The study carried out by the consortium included the following aspects:

- Carrying out a thorough literature review of CO₂ capture technologies (section "CO₂ emissions and CO₂ capture" and Appendix 1), transportation and sequestration (Appendix 2)
- Completing an overview of opportunities for utilization of CO₂ (section "CO₂ utilization in industry")
- Compiling an overview of the oil shale industry (Appendix 5)
- Calculating the CO₂ emissions of the oil shale industry both with CO₂ capture and without (Appendix 7)
- Evaluating the suitability of potential capture technologies for the oil shale industry (Appendix 6), possibilities for sequestration near Estonia (Appendix 3), and potential opportunities for utilizing the captured CO₂ (sections "Additional and explanatory comments about the applicability of using chemical and food grade CO₂ as a raw material" and "On the economic aspects of the utilization of captured CO₂ in industry")
- Carrying out experiments in a 60 kWth CCS pilot plant to evaluate the suitability of oxyfuel technology for oil shale combustion (Appendix 8)

- Analyzing the cost of CO₂ capture and storage (section "Economic analysis of CO₂ capture, purification, utilization, transportation and storage in the context of the Estonian oil shale industry" and Appendix 9)

As a result of the study it was found that, based on technological aspects of the oil shale industry, the most suitable CO₂ capture technologies in the near future are absorption and oxyfuel combustion. Depending on the CO₂ capture technology selected, the CO₂ footprint of electricity production would fall from 1026 kg CO₂ eq/MWh to 169 kg CO₂ eq/MWh (absorption) or 146 kg CO₂ eq/MWh (oxyfuel combustion), using the Auvere plant as the reference. CO₂ capture would not be financially feasible under the current market conditions – CO₂ capture, cleaning, transportation and storage (total at least 76-88 EUR/t CO₂ assuming full capacity operation) would significantly exceed the current alternative of CO₂ emission quota cost (approx. 40 EUR/t as of March 2021) and environmental charges. Feasibility of state aid for investments into CO₂ capture technologies or for operating these would be questionable as that would mean higher taxes or transferring the cost to the private sector, thereby reducing the overall competitiveness of the Estonian economy. Also, increase in the CO₂ emission quota tariff or in the cost of CO₂ capture and storage would mean an additional cost component in electricity generation, and thus be a competitive disadvantage for CO₂ emitting producers of energy from fossil fuels, including oil shale.

Additionally, it would be possible to reduce the CO₂ footprint of electricity production by reusing the ash produced during combustion. Using co-combustion of wood chips and oil shale it is also possible to achieve a negative CO₂ emission, assuming that the CO₂ produced from burning wood chips is not counted as CO₂ emissions. In this case, the total emissions, expressed in CO₂ equivalents, would be -398 kg CO₂ eq/MWh for a new power plant with a net capacity of 275 MWe that incorporates oxyfuel combustion technology.

Mõisted ja lühendid

AEJ – Auvere elektrijaam

ASU – õhu separatsiooni süsteem (ingl *Air Separation Unit*)

BEJ – Balti elektrijaam

Calcium looping – kaltsiumi ringlus

CCS – süsiniku püüdmine ja ladustamine (ingl *Carbon Capture and Storage*)

CCU – süsiniku püüdmine ja kasutamine (ingl *Carbon Capture and Utilization*)

CFBC – Circulating Fluidized Bed Combustion – tsirkuleeriv keevkihtpõletus

chemical grade – kemikaalipuhtus

Chemical looping – hapnikukandja ringlus

Compression – komprimeerimine

EJ – elektrijaam

EEJ – Eesti elektrijaam

EGR – Enhanced gas recovery – gaasi täiendav tootmine

EOR – Enhanced oil recovery – nafta täiendav tootmine

food grade – toidupuhtus (CO₂ puhtus)

FW – Foster Wheeler

IGCC – *Integrated gasification combined cycle* – kütuse gaasistamisega liitringprotsess (KGL)

Membranes – membraanid

Multiphase absorption – mitmefaasiline absorptsioon

NETL – Riiklik energiatehnoloogia labor (ingl *National Energy Technology Laboratory*)

OXY – hapnikus põletamine (ingl *Oxyfuel combustion*)

PCC – järelpüüdmine (ingl *post-combustion capture*)

RWGS (*reverse water gas shift*) – pööratud vesigaasi nihkereaktsioon

Solvent absorption – absorptsioon

Supercritical – ülekritiline

TVT – tehnoloogia valmidustase (ingl *Technology readiness level* – TRL)

VALCOE (*value-adjusted levelised costs of electricity*) – loodava koondväärtusega kohandatud ajaväärtust arvestav elektritootmise kogukulu

VKG – Viru Keemia Grupp

Viidatud allikad

- [1] "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, Nov. 2014.
- [2] "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change," Intergovernmental Panel on Climate Change, Nov. 2018.
- [3] "2030 climate & energy framework | Climate Action." .
- [4] "Kasvuhoonegaaside heitkoguste poliitika, meetmed ja prognoosid | Keskkonnaministeerium." Oct-2019.
- [5] S. Meeliste, L. Tammiste, K. Kirsimaa, K. Suik, and M. Org, "Eesti kliimaambitsiooni tõstmise võimaluste analüüs," SEI Tallinn, Nov. 2019.
- [6] H. Ritchie and M. Roser, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions," *Our World Data*, Nov. 2017.
- [7] C. Le Quéré *et al.*, "Global Carbon Budget 2018," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 4, pp. 2141–2194, Nov. 2018.
- [8] IEA, "GECO 2019." [Online]. Available: <https://www.iea.org/geco/>. [Accessed: 29-Oct-2019].
- [9] "What is the Paris Agreement? UNFCCC." Oct-2019.
- [10] P. Friedlingstein *et al.*, "Global Carbon Budget 2020," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 12, no. 4, pp. 3269–3340, Dec. 2020.
- [11] International Energy Agency, *20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment*. Paris, France: International Energy Agency, 2016.
- [12] M. Bui *et al.*, "Carbon capture and storage (CCS): the way forward," *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 1062–1176, Nov. 2018.
- [13] B. Metz, O. Davidson, H. De Coninck, M. Loos, and L. Meyer, "IPCC special report on carbon dioxide capture and storage," Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [14] E. S. Rubin, "Understanding the pitfalls of CCS cost estimates," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 10, pp. 181–190, Nov. 2012.
- [15] *Commission Regulation (EU) No 601/2012*, vol. 601/2012. 2012.
- [16] K. Lauri, R. Jouko, N. Nicklas, and T. Sebastian, "Scenarios and new technologies for a North-European CO₂ transport infrastructure in 2050," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 2738–2756, 2014.
- [17] ZEP (Zero Emissions Platform), "The costs of CO₂ transport: post-demonstration CCS in the EU," 2011.
- [18] H. J. Rubin, E. S. Davison, J. E. and Herzog, "The cost of CO₂ capture and storage," *J. Greenh. Gas Control*, vol. 40, pp. 378–400, 2015.
- [19] ZEP (Zero Emissions Platform), "The costs of CO₂ storage: post-demonstration CCS in the EU, European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants," 2011.
- [20] U. (US D. of Energy, "FE/NETL CO₂ saline storage cost model: model description and baseline results, Report No. DOE/NETL-2014/1659," 2014.

- [21] D. P. Koelbl, B. S., Van den Broek, M. A., van Ruijven, B. J., Faaij, A. P. C., & Van Vuuren, "Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty.," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 27, pp. 81–102, 2014.
- [22] J. . Allinson W. G., Nguyen, D. N. and Bradshaw, "The economics of geological storage of CO₂ in Australia," *APPEA J.*, 2003.
- [23] GCCSI (Global CCS Institute), "Economic assessment of carbon capture and storage technologies," 2011.
- [24] S. . Godec, M. L., Riestenberg, D. and Cyphers, "Potential issues and costs associated with verifying CO₂ storage during and after CO₂-EOR," *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 7399–7414, 2017.
- [25] F. Hendriks, C., Graus, W. and van Bergen, "Global carbon dioxide storage potential and costs," 2002.
- [26] C. Fernández-Dacosta *et al.*, "Prospective techno-economic and environmental assessment of carbon capture at a refinery and CO₂ utilisation in polyol synthesis," *J. CO₂ Util.*, vol. 21, pp. 405–422, 2017.
- [27] R. Chauvy, N. Meunier, D. Thomas, and G. De Weireld, "Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment," *Appl. Energy*, vol. 236, pp. 662–680, 2019.
- [28] M. Kauw, R. M. J. Benders, and C. Visser, "Green methanol from hydrogen and carbon dioxide using geothermal energy and/or hydropower in Iceland or excess renewable electricity in Germany," *Energy*, vol. 90, pp. 208–217, 2015.
- [29] S. Rönsch *et al.*, "Review on methanation - From fundamentals to current projects," *Fuel*, vol. 166, pp. 276–296, 2016.
- [30] O. Araújo, J. L. De Medeiros, and R. M. B. Alves, "CO₂ Utilization : A Process Systems Engineering Vision," in *CO₂ Sequestration and valorization*, V. Esteves, Ed. InTech, 2014, pp. 35–88.
- [31] M. Matzen and Y. Demirel, "Methanol and dimethyl ether from renewable hydrogen and carbon dioxide: Alternative fuels production and life-cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 139, pp. 1068–1077, 2016.
- [32] Q. Chen, M. Lv, Z. Tang, H. Wang, W. Wei, and Y. Sun, "Opportunities of integrated systems with CO₂ utilization technologies for green fuel & chemicals production in a carbon-constrained society," *J. CO₂ Util.*, vol. 14, pp. 1–9, 2016.
- [33] L. F. S. Souza, P. R. R. Ferreira, J. L. De Medeiros, R. M. B. Alves, and O. Q. F. Araújo, "Production of DMC from CO₂ via indirect route: Technical-economical-environmental assessment and analysis," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 62–69, 2014.
- [34] M. Pérez-Fortes, J. C. Schöneberger, A. Boulamanti, G. Harrison, and E. Tzimas, "Formic acid synthesis using CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental evaluation and market potential," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 37, pp. 16444–16462, 2016.
- [35] C. Ampelli, S. Perathoner, and G. Centi, "CO₂ utilization: An enabling element to move to a resource-and energy-efficient chemical and fuel production," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 373, no. 2037, 2015.
- [36] J. Langanke, A. Wolf, and M. Peters, *Polymers from CO₂ - An Industrial Perspective*. 2015.

- [37] M. Aresta, A. Dibenedetto, and A. Angelini, "Catalysis for the valorization of exhaust carbon: From CO₂ to chemicals, materials, and fuels. technological use of CO₂," *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 3, pp. 1709–1742, 2014.
- [38] R. Bhandari, C. A. Trudewind, and P. Zapp, "Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 85, pp. 151–163, 2014.
- [39] A. Dutta, S. Farooq, I. A. Karimi, and S. A. Khan, "Assessing the potential of CO₂ utilization with an integrated framework for producing power and chemicals," *J. CO₂ Util.*, vol. 19, pp. 49–57, 2017.
- [40] N. Von Der Assen, P. Voll, M. Peters, and A. Bardow, "Life cycle assessment of CO₂ capture and utilization: A tutorial review," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 23, pp. 7982–7994, 2014.
- [41] F. Suleman, I. Dincer, and M. Agelin-Chaab, "Comparative impact assessment study of various hydrogen production methods in terms of emissions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 8364–8375, 2016.
- [42] "CO₂ emissions from fuel combustion 2011." .
- [43] L. Forti and F. Fosse, "Chemical recycling of CO₂ " *IFP Energies Nouvelles*, 2016. .
- [44] E. I. Koytsoumpa, C. Bergins, and E. Kakaras, "The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 132, pp. 3–16, 2018.
- [45] A. Goeppert, M. Czaun, J.-P. Jones, G. K. Surya Prakash, and G. A. Olah, "Recycling of carbon dioxide to methanol and derived products-closing the loop," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 23, pp. 7995–8048, 2014.
- [46] A. Al-Mamoori, A. Krishnamurthy, A. A. Rownaghi, and F. Rezaei, "Carbon Capture and Utilization Update," *Energy Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 834–849, 2017.
- [47] E. Alper and O. Yuksel Orhan, "CO₂ utilization: Developments in conversion processes," vol. 3, no. 1, pp. 109–126, 2017.
- [48] A. W. Zimmermann and R. Schomäcker, "Assessing Early-Stage CO₂ utilization Technologies—Comparing Apples and Oranges?," *Energy Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 850–860, 2017.
- [49] J. Patricio, A. Angelis-Dimakis, A. Castillo-Castillo, Y. Kalmykova, and L. Rosado, "Region prioritization for the development of carbon capture and utilization technologies," *J. CO₂ Util.*, vol. 17, pp. 50–59, 2017.
- [50] J. Patricio, A. Angelis-Dimakis, A. Castillo-Castillo, Y. Kalmykova, and L. Rosado, "Method to identify opportunities for CCU at regional level - Matching sources and receivers," *J. CO₂ Util.*, vol. 22, pp. 330–345, 2017.
- [51] K. Armstrong, *Emerging Industrial Applications*. 2015.
- [52] E. A. Quadrelli, G. Centi, J.-L. Duplan, and S. Perathoner, "Carbon dioxide recycling: Emerging large-scale technologies with industrial potential," *ChemSusChem*, vol. 4, no. 9, pp. 1194–1215, 2011.
- [53] I. Merino-Garcia, E. Alvarez-Guerra, J. Albo, and A. Irabien, "Electrochemical membrane reactors for the utilisation of carbon dioxide," *Chem. Eng. J.*, vol. 305, pp. 104–120, 2016.
- [54] M. Jouny, W. Luc, and F. Jiao, "General Techno-Economic Analysis of CO₂ Electrolysis Systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, no. 6, pp. 2165–2177, 2018.
- [55] J. Feng, S. Zeng, J. Feng, H. Dong, and X. Zhang, "CO₂ Electroreduction in Ionic Liquids: A

- Review," *Chinese J. Chem.*, vol. 36, no. 10, pp. 961–970, 2018.
- [56] L. Zhang, S. Hu, X. Zhu, and W. Yang, "Electrochemical reduction of CO₂ in solid oxide electrolysis cells," *J. Energy Chem.*, vol. 26, no. 4, pp. 593–601, 2017.
- [57] S. D. Ebbesen, S. H. Jensen, A. Hauch, and M. B. Mogensen, "High temperature electrolysis in alkaline cells, solid proton conducting cells, and solid oxide cells," *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 21, pp. 10697–10734, 2014.
- [58] M. Samavati, A. Martin, V. Nemanova, and M. Santarelli, "Integration of solid oxide electrolyser, entrained gasification, and Fischer-Tropsch process for synthetic diesel production: Thermodynamic analysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 10, pp. 4785–4803, 2018.
- [59] I. M. Remmers, R. H. Wijffels, M. J. Barbosa, and P. P. Lamers, "Can We Approach Theoretical Lipid Yields in Microalgae?," *Trends Biotechnol.*, vol. 36, no. 3, pp. 265–276, 2018.
- [60] H. Karan, C. Funk, M. Grabert, M. Oey, and B. Hankamer, "Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy," *Trends Plant Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 237–249, 2019.
- [61] E. Stephens *et al.*, "An economic and technical evaluation of microalgal biofuels," *Nat. Biotechnol.*, vol. 28, no. 2, pp. 126–128, 2010.
- [62] M. Esmeijer, *CO₂ in greenhouse horticulture. 3rd edition.* 1999.
- [63] T. Mikunda, F. Neele, F. Wilschut, and M. Hanegraaf, "A secure and affordable CO₂ supply for the Dutch greenhouse sector," 2015.
- [64] P. C. M. Vermeulen and C. J. M. van der Lans, "CO₂ dosering in de biologische glastuinbouw. Rapport GTB-1085. (in Dutch)," Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen, Netherlands, 2010.
- [65] E. Nederhoff, "Carbon Dioxide Enrichment," *Pract. Hydroponics Greenhouses*, pp. 50–59, 2004.
- [66] "[http://nbsm.gov.np/uploads/files/ISO_817_2014\(E\)-Character_PDF_document.pdf](http://nbsm.gov.np/uploads/files/ISO_817_2014(E)-Character_PDF_document.pdf)."
- [67] "http://www.ahrinet.org/App_Content/ahri/files/STANDARDS/AHRI/AHRI_Standard_700-2016_with_Addendum_1.pdf."
- [68] R. Barchas and R. Davis, "The Kerr-McGee/ABB Lummus Crest technology for the recovery of CO₂ from stack gases," *Energy Convers. Manag.*, vol. 33, no. 5–8, pp. 333–340, May 1992.
- [69] R. Yan, Y. L. Ng, D. T. Liang, C. S. Lim, and J. H. Tay, "Bench-Scale Experimental Study on the Effect of Flue Gas Composition on Mercury Removal by Activated Carbon Adsorption," *Energy and Fuels*, vol. 17, no. 6, pp. 1528–1535, Nov. 2003.
- [70] N. National Energy Technology Laboratory, "Cost and Performance for Low-Rank Pulverized Coal Oxycombustion Energy Plants," 2010.
- [71] S. Melien, T., & Brown-Roijen, "Economics," in *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project*, vol. 3, 2009, pp. 237–264.
- [72] Global CO₂ Initiative at the University of Michigan, "Global Roadmap for Implementing CO₂ Utilization," 2016.
- [73] Markets Insider, "CO₂ European Emission Allowances."
- [74] "Keskkonnatasude seadus. RT I, 10.07.2020, 50," *Riigi Teataja*, 2020. .

- [75] P. De Luna, C. Hahn, D. Higgins, S. A. Jaffer, T. F. Jaramillo, and E. H. Sargent, "What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes?," *Science*, vol. 364, no. 6438, 2019.
- [76] C. Hepburn *et al.*, "The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal," *Nature*, vol. 575, no. 7781, pp. 87–97, 2019.
- [77] "Construction products – Carbon8 Systems." [Online]. Available: <https://c8s.co.uk/construction-products/>. [Accessed: 27-Jan-2021].
- [78] S. Roussanaly, G. Skaugen, A. Aasen, J. Jakobsen, and L. Vesely, "Techno-economic evaluation of CO₂ transport from a lignite-fired IGCC plant in the Czech Republic," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 65, pp. 235–250, 2017.
- [79] G. Skaugen, S. Roussanaly, J. Jakobsen, and A. Brunsvold, "Techno-economic evaluation of the effects of impurities on conditioning and transport of CO₂ by pipeline," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 54, pp. 627–639, 2016.
- [80] F. Engel and A. Kather, "Improvements on the liquefaction of a pipeline CO₂ stream for ship transport," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 72, pp. 214–221, 2018.
- [81] A. P. C. Knoope, M. M. J., Ramírez, A., & Faaij, "Investing in CO₂ transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 41, pp. 174–193, 2015.
- [82] M. Böcher, "A theoretical framework for explaining the choice of instruments in environmental policy," *For. Policy Econ.*, vol. 16, pp. 14–22, Mar. 2012.
- [83] H. Groenenberg, A. Seebregts, and P. Boot, "Policy instruments for advancing CCS in Dutch power generation," in *Energy Procedia*, 2011, vol. 4, pp. 5822–5829.
- [84] H. Pihkola *et al.*, "Integrated Sustainability Assessment of CCS - Identifying Non-technical Barriers and Drivers for CCS Implementation in Finland," in *Energy Procedia*, 2017, vol. 114, pp. 7625–7637.
- [85] F. Kern, J. Gaede, J. Meadowcroft, and J. Watson, "The political economy of carbon capture and storage: An analysis of two demonstration projects," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 102, pp. 250–260, Jan. 2016.
- [86] IEA, "A Policy Strategy for Carbon Capture and Storage – Analysis," 2012.
- [87] ZERO, "Policy instruments for large-scale CCS," 2013.
- [88] B. Johansson, L. J. Nilsson, and M. Åhman, "Towards zero carbon emissions – climate policy instruments for energy intensive industries, materials and products," in *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings*, 2018, pp. 33–42.
- [89] S. Morgan, "Norway's €2.1bn carbon-capture mega-project gets approval," *Euractiv.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/norways-e2-1bn-carbon-capture-mega-project-gets-approval/>. [Accessed: 27-Jan-2021].
- [90] Rahandusministeerium, "Riigiabi käsiraamat." p. 53, 2017.
- [91] G. Myhre *et al.*, "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," *Chang. IPCC Clim.*, pp. 659–740, 2013.