HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO JA HYÖDYNTÄMINEN METSÄTEOLLISUUDEN INTEGRAATISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2024

Marika Bister

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Katja Kuparinen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Janne Mäkelä, Stora Enso Oyj

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Marika Bister

Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen metsäteollisuuden integraatissa

Energiatekniikan diplomityö

2024

63 sivua, 13 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori, TkT Katja Kuparinen

Avainsanat: BECCU, biogeenisen hiilidioksidin talteenotto, sellu- ja paperiteollisuus, hiilidioksidin hyötykäyttö, hiilidioksidin jatkojalostaminen, power-to-X

Sellu- ja paperiteollisuudella on tunnistettu olevan merkittävä potentiaali biogeenisen hiilidioksidin talteenottoon, varastointiin ja hyötykäyttöön Suomessa. Tuotantolaitosten hiilidioksidivaroja voidaan varastoinnin sijaan hyödyntää tehtaiden omissa prosesseissa tai jatkojalostaa power-to-X-prosesseja hyödyntäen.

Diplomityössä esitellään hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön mahdollisuuksia metsäteollisuusintegraatissa Stora Enson Imatran tehtaiden näkökulmasta. Työssä on esitelty tehtaiden hiilidioksidin lähteet ja perehdytty tarkemmin kohteisiin soveltuviin talteenottoteknologioihin. Hyödyntämismahdollisuuksien osalta on keskitytty integraatista löytyviin käyttökohteisiin, minkä lisäksi on esitelty hiilidioksidin jatkojalostuksen mahdollisuuksia sekä käyttökohteita muilla teollisuuden aloilla. Esiteltyjen konseptien vaikutusta tehtaan sähkön- ja höyrynkulutukseen on tutkittu Microsoft Excel – pohjaisella laskentatyökalulla.

Tehtaan suurimmat hiilidioksidin lähteet ovat soodakattilat, meesauunit sekä kuorikattila, joille on kaupallisesti saatavilla erilaisia kaasujen erotusteknologioita. Merkittävin talteenottopotentiaali osoittautui olevan soodakattiloilla mutta talteenottolaitteiston energiankulutuksen näkökulmasta meesauunit näyttäytyivät parempana vaihtoehtona. Tehtaan nykyinen hiilidioksidin käyttö on vähäistä verrattuna savukaasuista erotettavissa olevaan määrään mutta teknisesti käyttöpotentiaalia olisi enemmän. Nykyisten hiilidioksidimarkkinoiden sekä kuljetus- ja varastointimahdollisuuksien valossa kaasun ulosmyynti todettiin haastavaksi. Kaasun jatkojalostus tehtaalla todettiin houkuttelevaksi vaihtoehdoksi mutta lisätutkimusta vaadittaisiin erityisesti uusiutuvan sähkön saatavuuden osalta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Marika Bister

Carbon capture and utilization in forest industry integration

Master's thesis

2024

63 pages, 13 figures, 6 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Katja Kuparinen, D.Sc. (Tech.)

Keywords: BECCU, biogenic carbon capture, pulp and paper industry, carbon dioxide utilization, further processing of carbon dioxide, power-to-X

The pulp and paper industry has been identified to have significant potential for the capture, storage, and utilization of biogenic carbon dioxide in Finland. Instead of storage, the carbon dioxide reserves of production facilities can be utilized in the factories' own processes, or they can be further processed using power-to-X processes.

The thesis presents the possibilities of carbon capture and utilization in a forest industry integration from the perspective of Stora Enso's Imatra mills. The thesis also introduces the carbon dioxide sources of the mills and delves into the suitable capture technologies. Regarding utilization possibilities, the focus is on the usage opportunities found within the integration. In addition, the possibilities of further processing and usage of carbon dioxide in other industrial sectors are presented. The impact of the presented concepts on the factory's electricity and steam consumption has been examined using a Microsoft Excel-based calculation tool.

The largest carbon dioxide sources in the factory are recovery boilers, lime kilns, and bark boiler, for which various gas separation technologies are commercially available. The most significant capture potential was found to be in the recovery boilers, but from the perspective of the energy consumption of the capture process, lime kilns appeared to be a better option. The current usage of carbon dioxide in the factory is minimal compared to the available capacity in the flue gases, but there is more technical usage potential. Considering the current carbon dioxide markets as well as transportation and storage possibilities, selling the gas was found to be challenging. On-site gas processing was identified as an attractive option, but further research is needed, especially regarding the availability of renewable electricity.

KIITOKSET

Tahdon kiittää kaikkia tämän diplomityön puitteissa tapaamiani henkilöitä sekä Stora Ensolla että muissa yrityksissä. Työn taustalla on käyty monia inspiroivia ja ymmärrystäni avartavia keskusteluja, jotka eivät kuitenkaan näille sivuille asti ole päätyneet. Kiitos Imatran tehtaiden voimalaitoksen väelle, jonka kannustavassa seurassa olen saanut syventyä selluteollisuuden maailmaan. Kiitos erityisesti työni ohjaajalle, Janne Mäkelälle, joka mahdollisti tämän mielenkiintoisen diplomityön ja oli aina valmis jakamaan ideoitaan ja kattavaa tietämystään.

Kiitos kaikille ystävilleni, erityisesti ns. Marttakerhollemme, joiden kanssa olen saanut jakaa yliopisto-opintoni Lappeenrannassa. Suurimman kiitoksen tahdon kuitenkin osoittaa perheelleni, jonka jatkuva tuki ja kannustus koko opintojeni ajan on ollut korvaamaton etuoikeus kuluneiden vuosien myllerryksessä.

Lappeenrannassa 30.4.2024

Marika Bister

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

c	ominaislämpökapasiteetti	J/kgK
E	energia	J
H	entalpia	J/kg
p	paine	bar, Pa
q_m	massavirta	kg/s
Q	lämpöenergia	J
T	lämpötila	ºC, K

Lyhenteet

ADt	ilmakuiva sellutonni (Air Dry tonne)
AEL	alkalielektrolyysi (Alkaline Electrolysis)
BECCUS	bioenergian tuotantoon yhdistetty hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi (Bioenergy Combined with Carbon Capture, Utilization or Storage)
CaL	Calsium Looping
CCS	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage)
CCU	hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen (Carbon Capture and Utilization)
CHP	yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (Combined Heat and Power)
COD	kemiallinen hapenkulutus (Chemical Oxygen Demand)
EU	Euroopan Unioni
EOR	tehostettu öljyntuotanto (Enhanced Oil Recovery)
F-T	Fischer-Tropsch
HPC	kuuma kaliumkarbonaatti (Hot Potassium Carbonate)

IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEA	monoetanoliamiini
PCC	Precipitated Calcium Carbonate
PEM	protoninvaihtomembraani (Proton Exchange Membrane)
PSA	Pressure Swing Absorption
PtC	Power-to-Chemicals
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
rWGS	Käänteinen vesikaasureaktio (Reverse Water Gas Shift)
SOEC	Solid Oxide Electrolyze Cell
TSA	Temperature Swing Adsorption
VSA	Vacuum Swing Adsorption
VTT	Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 9
2 Sellutehtaan hiilidioksidipäästölähteet ... 11
2.1 Soodakattila ... 11
2.2 Meesauuni ... 12
2.2.1 Meesauunin fossiilivapaat polttoaineet ... 13
2.2.2 Sähköinen kalkintuotanto ... 14
2.3 Biomassakattila ... 15
3 Hiilidioksidin talteenottoteknologiat ... 17
3.1 Teknologioiden jaottelu ... 17
3.2 Liuotinpohjainen talteenotto ... 18
3.2.1 Amiinit ... 18
3.2.2 Suolat ... 19
3.3 Kiinteät adsorbentit ... 20
3.4 Muut teknologiavaihtoehdot ... 22
4 Hiilidioksidin hyödyntäminen ... 24
4.1 Hyödyntämiskohteet metsäteollisuudessa ... 24
4.1.1 Ruskean massan pesu ... 24
4.1.2 Valkaisu ... 25
4.1.3 Kartonki- ja paperikoneet ja sellun kuivaus ... 26
4.1.4 Ligniinin saostus ... 27
4.1.5 Mäntyöljyn valmistus ... 28
4.1.6 Jäteveden käsittely ... 29
4.2 Hiilidioksidin jatkojalostaminen ... 29
4.2.1 Power-to-X ... 30
4.2.2 Polttoaineet ... 31

4.2.3 Muovimateriaalit ... 32
4.3 Muut teollisuus ... 33
5 Logistiikka ja laatuvaatimukset ... 35
5.1 Kuljetus ja välivarastointi ... 35
5.2 Tuotekaasun puhtaus ... 38
6 Tehtaan tasetarkastelu ... 40
6.1 Laskentatyökalun esittely ... 40
6.2 Esitellyt konseptit Imatran tehtailla ... 41
6.3 Tarkasteltavat skenaariot ... 47
6.3.1 Skenaario 1: Talteenotto tehtaiden hyödyntämiskohteiden tarpeisiin ... 48
6.3.2 Skenaario 2: Maksimitalteenottokapasiteetti, nykyinen kuljetus- ja varastointikapasiteetti ... 49
6.3.3 Skenaario 3: Maksimitalteenottokapasiteetti, täysi kuljetus- ja varastointikapasiteetti ... 50
6.4 Tulosten tarkastelu ... 52
6.4.1 Skenaario 1 ... 52
6.4.2 Skenaariot 2 ja 3 ... 54
6.4.3 Prosessien ja ajotavan optimointi ... 55
6.4.4 Hiilidioksidin jatkojalostaminen ... 56
6.4.5 Hiilidioksidin myynti ... 58
6.4.6 Talteen otetun hiilidioksidin laatuvaatimukset ... 60
6.4.7 Hiilidioksidipäästöt ... 61
7 Yhteenveto ja johtopäätökset ... 62
Lähteet ... 64

Liitteet

Liite 1. Meesauunin energiatase

1 Johdanto

Hiilidioksidin talteenottoa, hyötykäyttöä sekä varastointia bioenergian tuotannossa (BECCUS) korostetaan monissa ilmastoskenaarioissa, joita on esitetty esimerkiksi IPCC:n Special Report (2018) - julkaisussa. Biogeenisen hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla saavutettava hiilidioksidin poistaminen ilmakehästä, toisin sanoen negatiiviset päästöt on tunnistettu välttämättömäksi, mikäli Parisiin ilmastosopimuksessa ilmastonmuutoksen rajoittamiseksi asetetut tavoitteet halutaan saavuttaa. Suomessa metsäteollisuudella, erityisesti sellu- ja paperitehtailla, on merkittävä potentiaali BECCUS-hankkeille alan biogeenisten hiilidioksidipäästöjen muodostaessa yli 40 % koko maan päästöistä. (EEA, 2023)

Vaikka biogeenisen hiilidioksidin varastoinnilla on selkeä ilmastohyöty, on sen taloudellinen kannattavuus vielä hyvin riippuvainen poliittisista kannustimista ja päästökaupan uudistamisesta. Varastoinnin sijaan niin metsä- kuin muiltakin teollisuuden aloilta löytyy monia käyttökohteita, joissa talteen otetun hiilidioksidin hyödyntämisellä voidaan saavuttaa taloushyötyjä, eikä arvoketju ole täysin riippuvainen poliittisista tukimekanismeista. Vaikka CCU ei aina suoraan johda negatiivisiin päästöihin, tarjoaa biogeenisen hiilidioksidin hyödyntäminen kestävämmän vaihtoehdon tuotantoketjuille, joiden päästöjä on muuten haastavaa vähentää.

Suomen metsäteollisuuden vähähiilisyystiekartassa (Metsäteollisuus, 2020) nostetaan esiin tahto sekä potentiaali päästä kokonaan eroon alan nyt jo suhteellisen vähäisestä fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Tiekartassa korostetaan investointeihin kannustavan politiikan merkitystä päästöistä rankaisemisen sijaan, kun samaan aikaan Suomen hallitus on esittänyt jopa hiilidioksidipäästöjen kieltämistä kokonaan (Laatikainen, 2023). Metsäteollisuuden vahvuus nähdään ennen kaikkea uusiutuvien tuotteiden valmistuksessa, mitä sellutehtaiden ja CCU:n yhdistäminen vahvasti tukee. CCU ei tarjoa metsäteollisuudelle ainoastaan mahdollisuutta laajentaa tuotantolaitosten tuotevalikoimaa vaan myös pyrkiä kohti täysin uusiutuvia tuotantoketjuja.

Toistaiseksi poliittisten ja taloudellisten kannustimien puute on hidastanut hiilidioksidin talteenoton kehittymistä sellu- ja paperiteollisuudessa sekä bioenergialaitoksissa. Vaikka alan on arvioitu olevan yksi potentiaalisimmista kohteista CCUS-hankkeille Suomessa, on

aiheesta tehtyjen tutkimusten sekä metsäteollisuuden hiilidioksidin käyttöön keskittyvien teosten määrä vähäinen. Tämä työ kokoaa yhteen hiilidioksidin suoran hyödyntämisen ja jatkojalostuksen mahdollisuuksia metsäteollisuuden tehdasintegraatissa keskittyen Stora Enson Imatran tehtaisiin.

Tämän diplomityön tarkoitus on tutkia hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön mahdollisuuksia Stora Enson Imatra tehtailla. Työssä käydään läpi sellutehtaan hiilidioksidin lähteet ja esitetyille kohteille soveltuvia talteenottoteknologioita. Tarkemmin perehdytään hiilidioksidin hyödyntämismahdollisuuksiin metsäteollisuudessa, kartoitetaan potentiaalisia käyttökohteita muilta teollisuuden aloilta sekä esitellään jatkojalostusmahdollisuuksia. Lisäksi tarkastellaan hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämiskohteiden tuomia muutoksia tehtaan sähkö-, höyry- ja hiilidioksiditaseisiin työtä varten tehdyllä Microsoft Excel-työkalulla. Yhdessä raportin sekä luodun laskentatyökalun on tarkoitus tarjota yritykselle väline hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen arviointiin metsäteollisuusintegraatissa.

2 Sellutehtaan hiilidioksidipäästölähteet

Sellutehtaalla syntyy sekä fossiilisia että biogeenisiä hiilidioksidipäästöjä polttoprosessista riippuen. Merkittävimmät päästölähteet ovat soodakattila, meesauuni ja biomassakattila. Muita mahdollisia hiilidioksidin lähteitä ovat hajukaasu- ja apukattilat sekä muut yksittäiset tuotantoprosessit. Tässä osiossa käydään läpi sellutehtaan suurimmat hiilidioksidipäästöjä tuottavat prosessit, niiden toimintaperiaate pääpiirteittäin sekä hiilidioksidipäästöihin liittyvät ominaisuudet. Hajukaasu- ja apukattiloiden tuottama vuotuinen hiilidioksidimäärä on yleensä vain muutama prosentti koko tehtaan hiilidioksidipäästöistä, minkä takia kyseiset prosessit on rajattu tarkemman tarkastelun ulkopuolelle. Lisäksi esitellään kaksi esimerkkiä fossiilivapaasta kalkin tuotannosta.

2.1 Soodakattila

Soodakattila on sellutehtaan kemikaalien talteenoton ydin. Sen päätehtäviin kuuluu höyryntuotanto, sellun keittokemikaalien talteenotto ja regenerointi sekä tehtaan eri jätevirtojen minimointi ympäristöystävällisesti. Kuitulinjalta, puukuiduista keiton jälkeen erotetun mustalipeän kuiva-ainepitoisuus nostetaan haihduttamolla noin 80 prosenttiin, minkä jälkeen se ohjataan poltettavaksi soodakattilaan. Palamisreaktiossa mustalipeän orgaaninen aines palaa vapauttaen lämpöä hyödynnettäväksi tulipesässä tapahtuvissa pelkistymisreaktioissa eli reduktiossa sekä höyryntuotannossa. Reduktiossa mustalipeässä olevat rikki- ja natrium yhdisteet reagoivat koksissa olevan hiilen kanssa muodostaen natriumsulfidia (Na_2S), hiilidioksidia (CO_2) ja hiilimonoksidia (CO). Palaessa epäorgaaninen aines muodostaa kattilan pohjalle sulamassan, jossa natrium voi edelleen hapen vaikutuksesta reagoida natriumsulfaatiksi (Na_2SO_4) ja natriumkarbonaatiksi (Na_2CO_3). Kattilasta keittokemikaalit poistetaan sulan mukana sulakourujen kautta jatkokäsittelyyn. (Prowledge, 2023b.)(Tikka et al., 2008b.)

Soodakattila on sellutehtaan suurin yksittäinen päästölähde tuottaen tyypillisesti noin 1600–2400 kg hiilidioksidia ilmakuivaa sellutonnia (ADt) kohden. Suurin osa, yli 90 %, soodakattilan hiilidioksidipäästöistä ovat biogeenisiä puupohjaisen mustalipeän ollessa prosessin pääpolttoaine. Fossiiliset hiilidioksidipäästöt ovat peräisin maakaasun tai öljyn poltosta,

joita käytetään kattilan ylös- ja alasajoissa sekä esimerkiksi laiterikosta aiheutuvissa erikoistilanteissa (Kuparinen, 2019). Imatran tehtailla on toiminnassa kaksi soodakattilaa, jotka tuottavat vuodessa yhteensä noin 1600 kt hiilidioksidia. Savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on soodakattiloille tyypillisellä tavalla matala, noin 10-12 %.

2.2 Meesauuni

Meesauuni on osa kemikaalien talteenoton kalkkikiertoa. Soodakattilasta poistettu sula käsitellään heikkovalkolipeällä, jolloin muodostuu viherlipeää. Soodakattilalta viherlipeä ohjataan uudelleen kaustisointiin, minkä tavoitteena on tuottaa mahdollisimman paljon sellun keitossa käytettävää valkolipeää mahdollisimman pienellä natriumkarbonaatin määrällä. Kaustisoinnissa viherlipeän sisältämä natriumkarbonaatti (Na_2CO_3) yhdistetään kalkin (CaO) kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia ($Ca(OH)_2$), joka reaktion edetessä reagoi edelleen natriumkarbonaatin (Na_2CO_3) kanssa natriumhydroksidiksi ($NaOH$) ja kalsiumkarbonaatiksi ($CaCO_3$) eli meesaksi. Syntynyttä seosta kutsustaan yleisesti kalkkimaidoksi, jota suodattamalla saadaan talteen pääasiassa natriumhydroksidia ja -sulfidia sisältävä valkolipeä. (Tikka et al., 2008c.)

Kalkkimaidosta erotetun meesan kuiva-aine pyritään nostamaan yli 80 prosenttiin ennen meesauuniin syöttöä. Meesauunissa kalsiumkarbonaatti hajoaa takaisin kaustisoinnissa hyödynnettäväksi kalsiumoksidiksi sekä hiilidioksidiksi

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

Kalsinoitumisreaktio vaatii vähintään 800 °C lämpötilan. Meesauunin huonojen lämmönsiirto-ominaisuuksien takia ympäröivän kaasun lämpötilan tulee kuitenkin olla huomattavasti korkeampi, yleensä noin 1000 °C (Prowledge, 2023b.). Tarvittava lämpö tuodaan uuniin polttamalla perinteisesti maakaasua tai öljyä mutta tarjolla on myös fossiilivapaita vaihtoehtoja. (Tikka et al., 2008c.)

Meesauunissa hiilidioksidia muodostuu sekä kalsinoitumisreaktiossa että polttoaineen palaessa, minkä takia hiilidioksidin osuus savukaasuissa on korkeampi verrattuna muihin sellutehtaan pistelähteisiin (Onarheim et al., 2017). Esimerkiksi Imatran tehtailla meesauunien savukaasujen kuivan osuuden hiilidioksidipitoisuus on välillä 15-18 %. Lisäksi meesauuni on yleensä nykyaikaisissa sellutehtaissa suurin fossiilisten hiilidioksidipäästöjen lähde

(Kuparinen, 2019). Kalsinoitumisreaktiossa syntyvän hiilidioksidin teoreettinen maksimimäärä kalkin ja hiilidioksidin moolimassojen suhteen avulla määritettynä on 0,785 $kgCO_2/kgCaO$. Kalsinoitumisreaktio ei kuitenkaan koskaan ole täydellinen, vaan kalkin lisäksi lopputuote muodostuu reagoimattomasta kalsiumkarbonaatista sekä muun muassa puun ja polttoaineiden mukana kemikaalikiertoon päätyneistä epäpuhtauksista. Reagoivan kalkin osuus lopputuotteesta on 85-90 %, jolloin syntyvän hiilidioksidin määrä on lähempänä 0,75 $kgCO_2/kgCaO$ (Tran, 2007). Sellutehtaalla kalsinoitumisreaktiossa syntynyt hiilidioksidi on biogeenistä ja vastaa noin 60 % meesauunin kokonaishiilidioksidipäästöistä (Onarheim et al., 2017). Käytetystä polttoaineesta riippuen loput uunin hiilidioksidipäästöistä ovat fossiilisia ja luokkaa 100-250 kg/ADt (Kuparinen, 2019). Imatran tehtaiden kahden käytössä olevan meesauunin kokonaishiilidioksidipäästöt ovat noin 200 kg/ADt vastaten 240 kt vuotuisia päästöjä. Uunien pääasialliset polttoaineet ovat raskas polttoöljy sekä maakaasu.

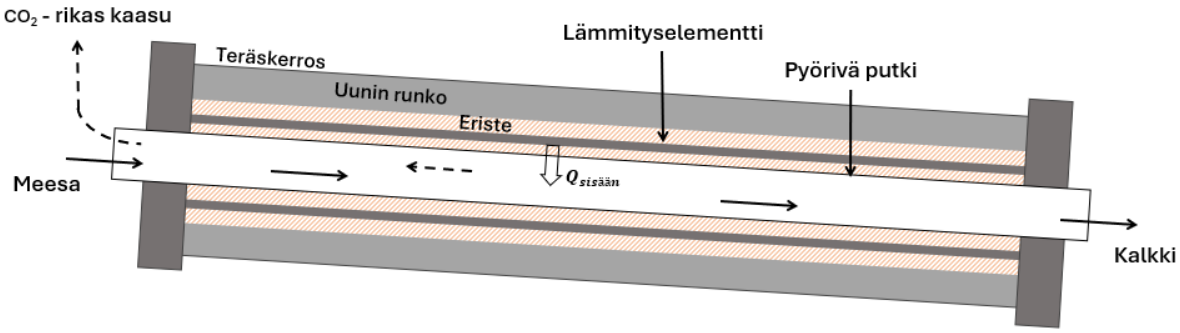
2.2.1 Meesauunin fossiilivapaat polttoaineet

Ilmastotavoitteiden valossa sekä fossiilisten polttoaineiden hintojen nousun johdosta viime vuosina kiinnostus fossiilivapaata kalkin tuotantoa kohtaan on kasvanut (Vakkilainen, 2018). Suomessa muutamilla sellutehtailla meesauunissa poltetaan maakaasun ja öljyn sijasta kaasutettua kuorta tai sahanpurua (Kuparinen, 2019). Muita mahdollisia polttoainevaihtoehtoja ovat vety, metanoli, tärpätti, pikiöljy ja ligniini, joista monia syntyy sulfaattisellutehtaalla sivuvirtoina. (Prowledge, 2023b.)

Imatran tehtaiden kohdalla parhaiten soveltuvaksi fossiilivapaaksi vaihtoehdoksi nykyisille meesauuneille on esitetty kaasutettua kuorta. Polttoaineen vaihdon myötä nykyiset meesauunit korvattaisiin uudella uunilla, jonka pääpolttoaine olisi kaasutettu kuori ja varapolttoaineena toimisi biokaasu, jolloin prosessin hiilidioksidipäästöt olisivat täysin biogeenisiä. Lisäksi polttoaineen vaihdos muuttaisi savukaasujen määrää ja koostumusta sekä kasvattaisi kalkkikierron vierasainepitoisuutta. Mäkelän (2019) työssä esitetyllä, suuren kapasiteetin uunilla hiilidioksidipäästöt tulisivat lähes kaksinkertaistumaan nykyisestä savukaasujen määrän kasvaessa. Päästöjen osalta huomionarvoista olisi myös typen oksidien muodostuminen. (Mäkelä, 2019.)

2.2.2 Sähköinen kalkintuotanto

Erityisesti teräs- ja sementtiteollisuuden hankalasti korvattavien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi myös kalkin tuotannolle on alettu tutkia sähköistämisvaihtoehtoja (Tsupari et al., 2022). Epäsuorasta sähköistämisestä puhutaan, kun reaktion vaatima lämpö tuodaan uuniin esimerkiksi polttamalla sähköenergialla tuotetusta vedystä ja synteesikaasusta muodostettua synteettistä polttoainetta. Suorasta sähköistämisestä puhutaan, kun sähköenergia toimii prosessin lähtöarvona. Esimerkkejä kalkin tuotannon sähköistämisestä ovat muun muassa sähköenergialla tuotetun plasman sekä, matalamman lämpötilatason tapauksissa, sähkövastusten hyödyntäminen lämmönlähteenä (SaltX Technology, 2024) (Katajisto, 2020). Teräs- ja sementtiteollisuuteen verrattuna sellutehtaalle soveltuvat matalamman lämpötilan prosessit, minkä takia tässä työssä esitellään tarkemmin sähkövastuksiin perustuvaa ratkaisua.



Kuva 1. Havainnekuva sähkölämmitteisestä meesauunista. (Mukaillen: (Katajisto, 2020))

Sähkölämmitteinen meesauuni on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin perinteinen polttoprosessia hyödyntävä uuni. Suurin ero on, että polttoprosessin sijaan lämpö tuodaan uuniin rungon ulkopuolelta kuten kuvassa 1 on havainnollistettu. Polttoprosessin uupuessa syntyvä hiilidioksidi on peräisin ainoastaan kalsinoitumisreaktiosta, mistä johtuen kalkintuotannon kokonaishiilidioksidipäästöt ovat selvästi pienemmät verrattuna perinteisiin uuneihin. Vaakasuuntaiseen sähkölämmitteiseen uuniin keskittyneessä Decarbonate-projektissa merkittävin kalsinoitumisreaktioon vaikuttava tekijä oli uunin reaktio-olosuhteet, jotka suhteessa perinteiseen uuniin eroavat ennen kaikkea ympäröivän hiilidioksidin osapaineessa. Loput kaasusta muodostuu pääasiassa vedestä. Syntyvän kaasun ollessa lähes puhdasta hiilidioksidia voidaan se ottaa suoraan talteen ilman erillistä erotusteknologiaa. (Katajisto, 2020.)

Pienempien hiilidioksidipäästöjen ja suoran talteenoton lisäksi sähkökäyttöisen uunin etuihin lukeutuu lämpötilajakauman helpompi hallittavuus perinteiseen uuniin verrattuna. Uunin tarkempi operointi samoin kuin polttoprosessissa syntyvien vierasaineiden uupuminen vaikuttaisivat positiivisesti myös tuotetun kalkin laatuun. Käyttökustannusten osalta etuihin lukeutuvat säästöt polttoaineessa sekä päästöoikeusmaksuissa, jolloin operointikulut muodostuisivat vain sähkönkulutuksesta. (Katajisto, 2020.)

Liitteessä 1 on esitetty epäsuorasti lämmitetyn uunin energiatasetarkastelu kahdessa tapauksessa. Ensimmäisessä tapauksessa syntyvä hiilidioksidi poistetaan poltetun kalkin kanssa samasta päädystä ja toisessa meesan syöttöpäädystä. Tasetarkastelun perusteella uunin ominaiskulutukseksi voidaan arvioida noin 5000 kJ tuotettua kalkkitonnia kohden eli 1,4 kWh/tCaO. Laskennassa ei oteta tarkemmin kantaa prosessiteknisiin kysymyksiin liittyen esimerkiksi kalkin viilentämiseen tai meesan lämmittämiseen kuumalla kalkilla. (Vakkilainen, 2024.)

Kalkintuotannon sähköistäminen on kehityksen osalta vielä laboratoriokokoluokassa, minkä takia referenssiarvoja sähköisen uunin kulutuksesta teollisuudessa ei ole saatavilla. Kun huomioidaan uunin kustannusten olevan vahvasti riippuvaisia sähkön hinnasta, täysin sähköistettyä uunia kannattavampi vaihtoehto saattaisi olla hybridiuuni, jossa olisi sähkövastusten lisäksi polttoprosessin käyttömahdollisuus. Suurimmat haasteet sähköisen uunin kehityksessä liittyvät kalkin pelkistymiseen, matalaan lämmönsiirron hyötysuhteeseen, suureen kalsinoitumisreaktion energiantarpeeseen sekä sintraantumisriskiin. (Katajisto, 2020.)

2.3 Biomassakattila

Mustalipeän lisäksi sellutehtailla syntyy polttoon kelpaavaa biomassaa erilaisina sivuvirtoina, joista merkittävin on puunkäsittelyssä syntyvä kuori. Lähes kaikilla sellutehtailla on käytössä biomassakattila tehtaan sivuvirtojen polttoa varten (Kuparinen, 2019). Kuoren lisäksi muita mahdollisia sivuvirtoja ovat sahausjäte, jätepuu, erilaiset lietteet sekä paperi- ja kartonkijätteet. Tyypillisesti biomassan poltossa käytetään leijupetikattilaa, jonka polttoaineeksi sopii ominaisuuksiltaan erilaiset, myös korkean kosteus- ja tuhkapitoisuuden omaavat polttoaineet. Eri polttoaineita voidaan polttaa myös samanaikaisesti. Lisäksi leijupetikattilan etuihin lukeutuu mahdollisuus typpi- ja rikkioksidipäästöjen hallintaan. (Prowledge, 2023b.)

Biomassakattilan hiilidioksidipäästöt ovat suurimmaksi osaksi biogeenisiä mutta pieni osa on peräisin myös fossiilisista polttoaineista, joita käytetään kattilan käynnistyksessä ja alasajossa sekä toisinaan korvaamaan tehtaan höyrypulaa. Fossiilisten hiilidioksidipäästöjen määrä on hyvin tehdaskohtainen mutta tyypillisesti vähintään 20 kgCO_2/ADt (Kuparinen, 2019). Imatran tehtaiden kohdalla biomassa- tai kuorikattilassa poltetaan nykyään pääasiassa kuorta ja sen tuottama vuotuinen hiilidioksidimäärä on noin 470 kt, mistä yli 98 % on biogeenistä alkuperää. Savukaasujen kuivan osuuden hiilidioksidipitoisuus on 11-12 %.

3 Hiilidioksidin talteenottoteknologiat

Hiilidioksidin talteenotossa käytettävää teknologiaa on tutkittu jo vuosikymmenten ajan. Ensimmäiset sovellukset kaasujen erotuksesta 1920-luvulta ovat luoneet pohjan nykyisille hiilidioksidin talteenottoprosesseille (IEAGHG, 2013). Perinteisten erotusprosessien merkittävimpiin haasteisiin kuuluu laitteiston suuri energiankulutus, jonka vähentämiseen nykyinen kehitystyö on hyvin pitkälle keskittynyt. Lisäksi kehitteillä on monia uusia erotusprosesseja, joiden kehittymistä esimerkiksi kansainvälinen energiajärjestö IEA seuraa aktiivisesti.

Tässä osiossa esitellään lyhyesti eri talteenottoteknologiatyypit ja niiden toimintaperiaatteet. Tarkemmin keskitytään sovelluksiin, jotka ovat saavuttaneet teknisesti riittävän kypsyystason ja soveltuvat luvussa 2 esitetyille päästölähteille. Lisäksi käydään läpi teknologioiden suurimmat edut ja haasteet sekä pohditaan soveltuvuutta Imatran tehtaiden näkökulmasta.

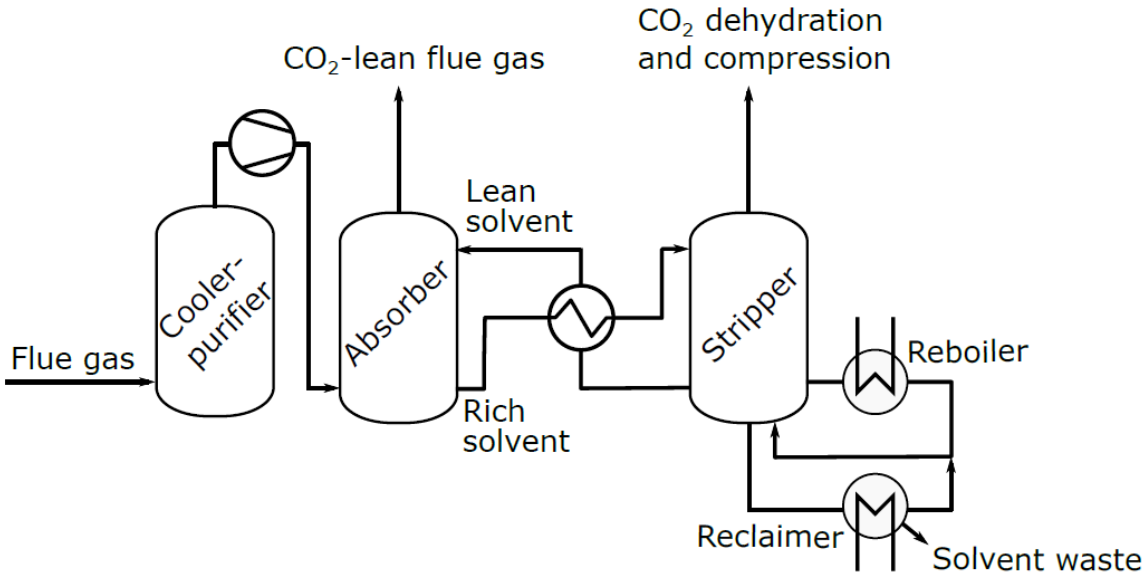
3.1 Teknologioiden jaottelu

Hiilidioksidin talteenotossa hyödynnettävät erotusteknologiat voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: polttoprosessin jälkeisiin, polttoa edeltäviin sekä happipolttoon perustuviin prosesseihin. Polttoprosessin jälkeisissä ratkaisuissa savukaasut puhdistetaan ensin tarpeen mukaan, minkä jälkeen hiilidioksidi erotetaan muusta kaasusta. Polttoa edeltävissä ratkaisuissa hiilidioksidi otetaan talteen polttoaineen kaasutuksen tai pyrolyysin tuotekaasusta ennen varsinaista polttoprosessia. Happipoltossa palamisilmana toimii happirikas kaasu ilman sijasta. Happipoltossa syntyneen savukaasun hiilidioksidipitoisuus on korkea, 80-95 %, jolloin erotukseen liittyvä energiankulutus laskee. (Kujanpää et al., 2023.)

Nykyään kypsimmät sovellusvaihtoehdot lukeutuvat polton jälkeisiin prosesseihin, jotka voidaan edelleen jakaa omiin alakategorioihinsa kuten liuotinpohjaiseen talteenottoon, kiinteisiin adsorbentteihin ja membraaneihin. Polton jälkeiset sovellukset eivät yleensä vaadi kohteeseen suuria prosessimuutoksia ja soveltuvat siten hyvin retrofit-tapauksiin (Kujanpää et al., 2023). Myös Imatran tehtailla hiilidioksidin erotus savukaasuista on järkevin vaihtoehto lähes kaikkien päästölähteiden tapauksissa, minkä takia tässä työssä esitellään tarkemmin kyseisen teknologiatyypin sovelluksia.

3.2 Liuotinpohjainen talteenotto

Kypsintä hiilidioksidin talteenottoteknologiaa edustaa liuotinpohjainen talteenotto. Prosessin toiminta perustuu kaksivaiheeseen massan siirtoon, joista ensimmäinen sitoo savukaasujen hiilidioksidin absorbenttiin ja toinen vapauttaa kaasun lähes puhtaana hiilidioksidina. Toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Tyypillinen liuotinpohjainen hiilidioksidin talteenottoprosessi. (Karjunen, 2022.)

Ensimmäisessä vaiheessa savukaasut tuodaan absorptiokolonniin, jossa hiilidioksidi reagoi liuottimen kanssa muuttuen samalla nestemäiseksi. Rikastunut seos ohjataan desorptiokolonniin, jossa hiilidioksidi erotetaan absorbentistä nostamalla lämpötilaa tai laskemalla painetta. Erotuksen jälkeen liuotin palautetaan takaisin absorptiovaiheeseen. (Teir et al., 2011.)

3.2.1 Amiinit

Liuotinpohjaiseen erotukseen on kehitetty erilaisia absorbenttejä, joista tutkituimpia ja jo laajasti kaupallisesti saatavilla olevia ovat erilaiset amiinipohjaiset liuottimet. Amiinien etuja ovat korkea, tyypillisesti noin 90 %:n luokkaa oleva talteenottokapasiteetti matalan hiilidioksidipitoisuuksien kohteissa, nopea reaktiokinetiikka sekä korkea, parhaimmillaan yli 99 % oleva tuotekaasun hiilidioksidipitoisuus. Amiinit soveltuvat laajasti erilaisiin kohteisiin ja olisivat sovellettavissa myös sellutehtaan pistelähteisiin (Onarheim et al., 2017). Amiinien käyttöön liittyy myös haasteita, kuten savukaasujen korkean lämpötilan ja

epäpuhtauksien aiheuttama liuottimen degradaatio, myrkylliset, amiinipohjaiset päästöt sekä korkea korroosion riski. Merkittävin haittapuoli on kuitenkin energiaintensiivinen desorptiovaihe, joka usein vaatii matalapainehöyryn käyttöä samalla laskien esimerkiksi voimalaitosten kohdalla merkittävästi kokonaishyötysuhdetta. (Linjala & Kajolinna, 2023.) (Teir et al., 2011.)

Useissa hiilidioksidin talteenottoa koskevissa tutkimuksissa liuottimeksi on valittu pitkään kehittyneintä teknologiaa edustanut monoetanoliamiini (MEA). Monien haittapuoliensa, kuten korkean regenerointienergiatarpeen ja liuottimen degradaation sekä korroosiohaasteiden takia MEAlle on alettu kehittää haastajia, joista esimerkiksi 2-amino-2-metyylipropanolin (AMP) ja piperatsiinin (PZ) seos on valittu kehittyneimmäksi vaihtoehdoksi IEAGHG:n (2019) listauksessa. Kaupallisesti saatavilla on useiden eri toimittajien sovelluksia, joiden energiantarpeesta ja suorituskyvystä on saatavilla tarkempaa tietoa lähdekirjallisuudessa. (Linjala & Kajolinna, 2023.)

3.2.2 Suolat

Vaihtoehto amiineille liuotinpohjaisessa absorptiossa ovat suolat, kuten kalium- ja natriumkarbonaatti (K_2CO_3, Na_2CO_3). Suhteessa amiineihin suolat ovat ympäristöystävällisempiä suurimman osan absorbenteistä ollessa päästöttömiä, minkä lisäksi ne ovat halpoja ja helposti saatavilla. Suolojen ja emäksien tapauksessa vältytään myös muilta amiinien heikkouksilta: desorptiovaihe ei vaadi yhtä paljon energiaa, savukaasujen korkea lämpötila tai epäpuhtaudet kuten rikin ja typen oksidit eivät aiheuta ongelmia absorptiossa, eikä suurta korroosioriskiä ole. Suolojen regeneroinnissa voidaan hyödyntää primäärihöyryn lisäksi myös sekundäärilämpöä tai pelkästään sähköä. Suolojen heikkouksia ovat hitaampi reaktiokinetiikka sekä riski ei-toivotun kiintoaineen muodostumisesta. Absorption kinetiikkaa on kuitenkin mahdollista nopeuttaa erilaisilla promoottoreilla ja katalyyteilla. Kehittyneimpien suolapohjaisten absorbenttien talteenottokapasiteetti sekä tuotekaasun puhtaus ovat samaa luokkaa amiinien kanssa. (Linjala & Kajolinna, 2023.)

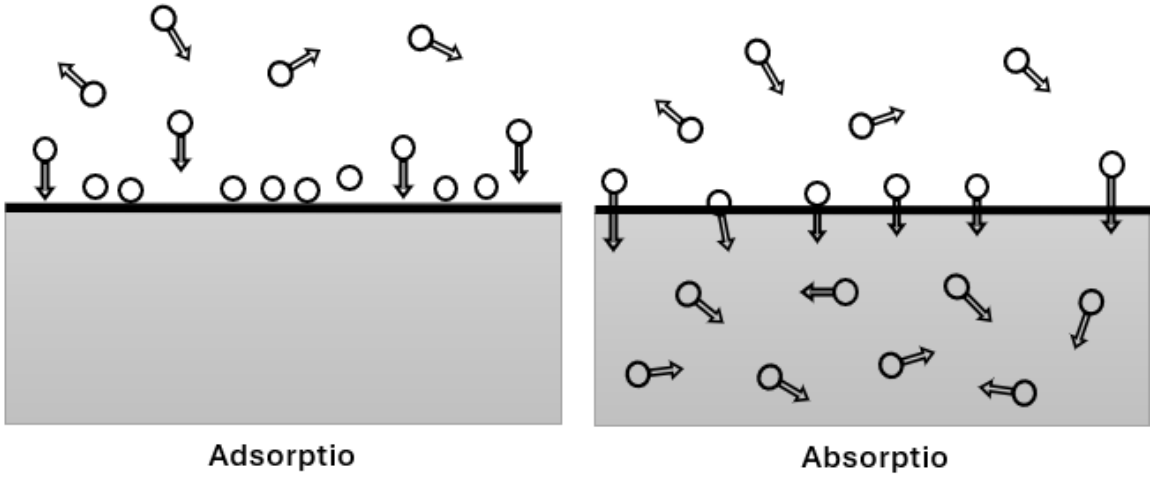
Suoloihin perustuva liuotinerotus on amiinien tapaan ollut yleisesti käytössä teollisissa kaasunpuhdistussovelluksissa. Suolapohjaisen kaasunpuhdistusprosessin sovellusta hiilidioksidin talteenottoon on demonstroitu onnistuneesti esimerkiksi Stockholm Exergin bio-CHP-laitoksella, jossa liuottimena toimi kuumaa kaliumkarbonaattia (HPC). Laitoksen on

tarkoitus aloittaa täyden mittakaavan tuotanto vuonna 2026. (Löfstedt, 2023) Toteutuneita hankkeita hiilidioksidin talteenotosta biovoimaloissa ei juurikaan ole, mutta Stockholm Exergin pilottilaitoksen myötä kuumaan kaliumkarbonaattiin perustuva liuotinerotus voisi olla potentiaalinen vaihtoehto myös Imatran tehtailla, esimerkiksi kuorikattilan tapauksessa. (Gustafson et al., 2021.) (Linjala & Kajolinna, 2023.)

Saipem on puolestaan kehittänyt sellutehtaallakin demonstroidun prosessin, jossa kaliumkarbonaatin toimintaa on tehostettu hiilihappoanhydraasi (CA) - entsyymillä. Sovelluksen suurimpiin etuihin erityisesti sellutehtaan näkökulmasta lukeutuu matala regenerointienergiantarve, joka primäärihöyryn sijasta voitaisiin kattaa sekundäärilämmöllä. Desorptiovaiheessa vaadittava lämpötila on noin 85 °C. Saipemin ratkaisusta on olemassa pienen mittakaavan kaupallinen laitos sellutehtaalla Quebecissa sekä käynnissä oleva demonstraatio Stora Enson sellutehtaalla Skutskärissä Ruotsissa. (CORDIS, 2023) (Linjala & Kajolinna, 2023.)

3.3 Kiinteät adsorbentit

Energiankulutukseltaan parempana vaihtoehtona liuottimille ovat kiinteät adsorbentit, kuten aktivoitu hiili, zeoliitit tai karbonaatit. Kaasujen erotus tapahtuu petireaktorissa, joka voi olla esimerkiksi kiinteäpeti- tai leijupetityyppinen. Toisin kuin liuotinerotuksessa, hiilidioksidi ei erotusvaiheessa sulaudu aineeseen vaan sitoutuu adsorbentin pintaan kemiallisesti tai fysikaalisesti kuten kuvassa 3 on havainnollistettu. Kemiallisella adsorptiolla tarkoitetaan aineen sitoutumista kemiallisten sidosten avulla, kun taas fysikaalisessa adsorptiossa molekyylit kiinnittyvät toisiinsa fysikaalisten van der Waals -voimien vaikutuksesta. Kemiallisten adsorbenttien regenerointi toteutetaan yleensä lämpötilavaihtelun ja fysikaalisten adsorbenttien paineenvaihtelun avulla. Regenerointitavan mukaan teknologiaratkaisut on yleisesti jaoteltu TSA (temperature swing adsorption) -, PSA (pressure swing adsorption) - ja VSA (Vacuum Swing Adsorbtion) -sovelluksiin. (Linjala & Kajolinna, 2023.)



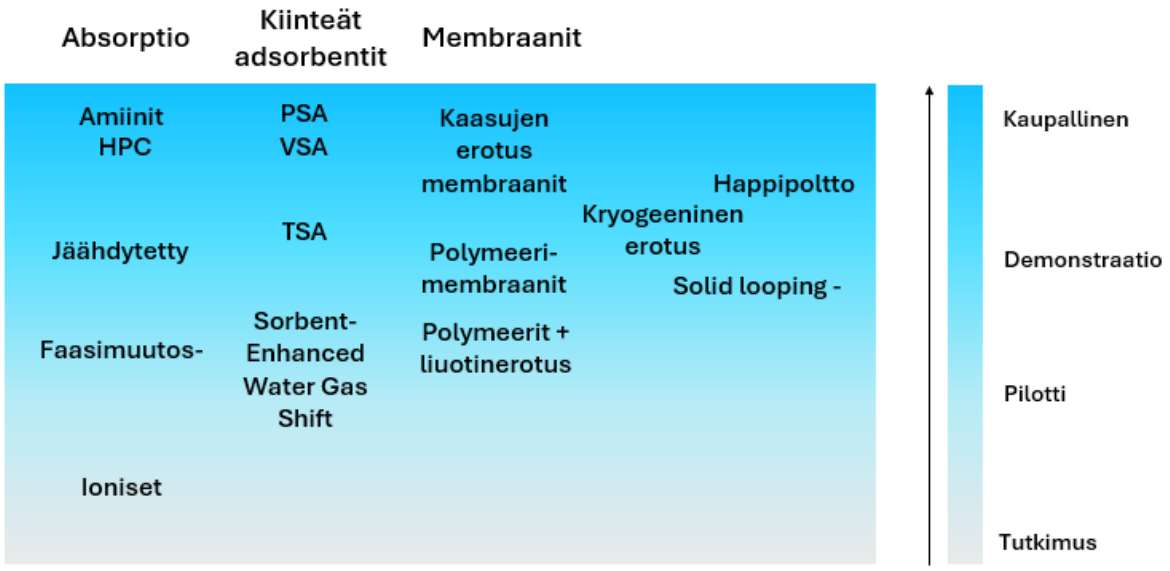
Kuva 3. Hiukkasten sitoutuminen aineeseen absorption ja adsorption avulla. (shutterstock: 738426712)

Kiinteiden adsorbenttien tapauksessa ei jouduta regeneroimaan suuria määriä välittäjäainetta ja adsorptioon ja desorptioon liittyvät sidosenergiat ovat pienempiä, minkä ansiosta prosessin energiantarve on huomattavasti pienempi verrattuna liuotinpohjaiseen talteenottoon. PSA-sovelluksissa regenerointi ei myöskään vaadi höyryn käyttöä vaan toteutetaan kokonaan sähköllä. Kemiallisen adsorption tapauksessa haasteeksi voi nousta hidas reaktiokinetiikka, minkä lisäksi regenerointi on usein toteutettava energiaintensiivisellä TSA-erotuksella, joka yleensä vaatii sekä sähkön että höyryn käyttöä. Fysikaalisessa adsorptiossa selektiivisyys on huonompi vaikuttaen tuotekaasun puhtauteen, joka sovelluksesta riippuen on välillä 80 – 95 %. Puhtausastetta voidaan kuitenkin nostaa lisäämällä prosessiin useampia syklejä. Huonompi selektiivisyys laskee myös talteenottokapasiteettia, joka on demonstraatioissa ollut noin 80 %. (IEAGHG, 2019.) (Linjala & Kajolinna, 2023.)

Kiinteät adsorbentit ovat kaasunpuhdistussovelluksien myötä saavuttaneet kaupallisen asteen myös hiilidioksidin talteenoton sovelluksissa (IEAGHG, 2019) (Itul et al., 2023). Imatran tehtailla potentiaalinen käyttökohde olisi meesauunit, joille esimerkiksi Linde Gas on tarjonnut PSA-ratkaisuaan. (Stubb & Laine, 2024.)

3.4 Muut teknologiavaihtoehdot

Kuvassa 4 on esitetty IEA:n arvioita eri hiilidioksidin erotusteknologioista ja niiden kehitysvaiheesta. Vaikka kaupallisesti saatavilla on useita teknologiavaihtoehtoja, ei esimerkkejä hiilidioksidin talteenotosta kaupallisessa mittakaavassa selluteollisuudesta ja bioenergialaitoksissa juurikaan ole. Kiinnostus hiilidioksidin talteenottoon sellutehtailla on kuitenkin kasvanut viime vuosina muun muassa EU:n ympäristötavoitteiden valossa ja uusia, sellutehtaan pistelähteille soveltuvia ratkaisuja kehitetään jatkuvasti. Tutkimuksissa lupaavina vaihtoehtoina nousevista teknologioista esiin on nostettu esimerkiksi happipoltto soodakattiloilla sekä Calcium Looping (CaL) teknologia meesauuneille, jotka ovat tällä hetkellä demonstraatiokokoluokassa (Kuparinen, 2019) (Itul et al., 2023). Kuvassa 4 esitettyjen teknologioiden lisäksi demonstraatiokokoluokasta löytyy prosesseja, jotka kehittyessään voivat tarjota varteenotettavan vaihtoehdon hiilidioksidin talteenottoon pienemmässä mittakaavassa, kuten esimerkiksi Suomessakin kehitteillä oleva vesiabsorptioon perustuva tekniikka.

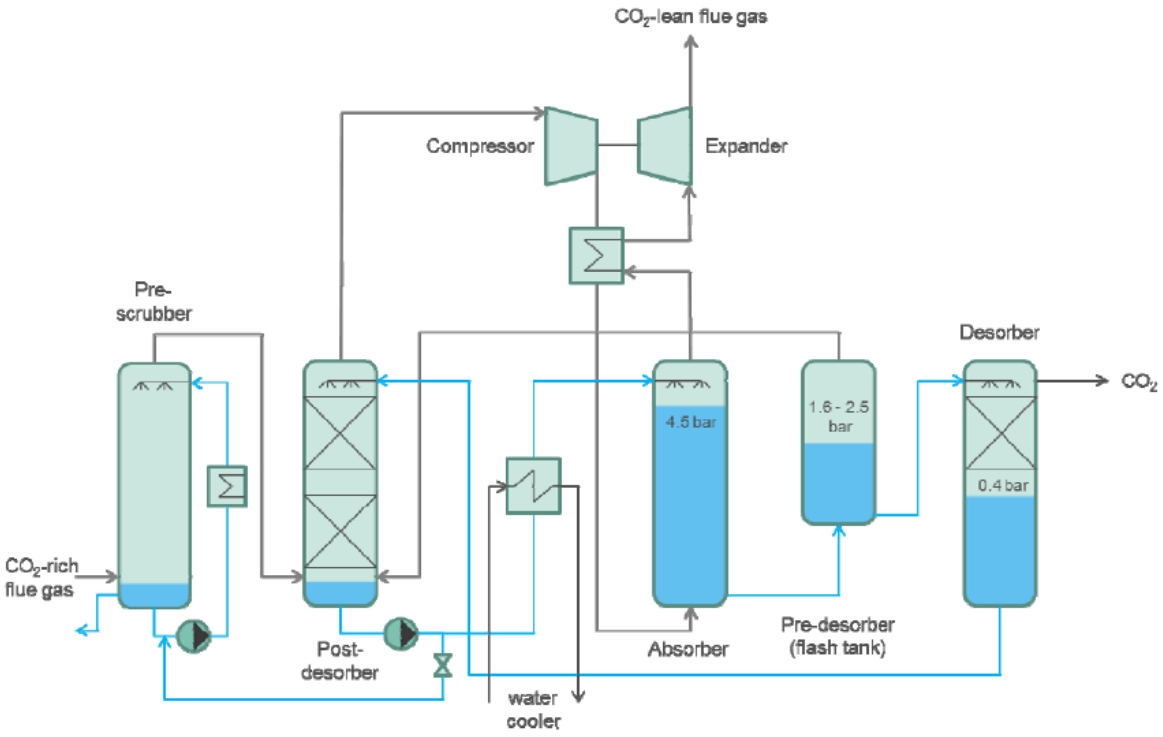


Kuva 4. Hiilidioksidin talteenottoteknologioita ja niiden tekninen kypsyysaste. (Itul et al., 2023.)

Biokaasun puhdistuksessa käytettyä, vettä absorbenttinä hyödyntävää liuotinerotusta on kehitetty hiilidioksidin talteenottoon savukaasuista kuvan 5 mukaisella prosessilla. Toisin kuin perinteisessä vesierotuslaitteistossa, kehitetyssä versiossa absorptio ja desorptio tapahtuvat useammassa vaiheessa, mikä mahdollistaa korkeamman talteenottokapasiteetin. Prosessin merkittävimpiin etuihin lukeutuu sen ympäristöystävällisyys liuottimen ollessa vettä, minkä lisäksi degradaation tuomaa liuottimen lisäystarvetta ei ole. Prosessi on myös täysin

sähkökäyttöinen energiantarpeen perustuessa lähinnä savukaasun paineistukseen ja veden pumppaukseen. Yksi merkittäväimmistä haasteista teknologian hyödyntämisessä polton jälkeisissä, erityisesti matalan hiilidioksidipitoisuuden kohteissa, on prosessin suuri vedenkulutus absorptiovaiheessa hiilidioksidin imeytyessä veteen heikosti. Prosessi on myös herkkä savukaasujen vesiliukoisille epäpuhtauksille, kuten rikkidioksidille ja vetykloridille.

(Teir et al., 2014)



Kuva 5. Vesiabsorptioon perustuva hiilidioksidin talteenottoprosessi. (Teir et al., 2014.)

Vesipohjainen liuotinerotus on vielä varhaisessa kehitysvaiheessa polton jälkeisessä hiilidioksidin talteenotossa, mutta ensimmäiset pilottihankkeiden tulokset ovat lupaavia. Esimerkiksi Linjalan (2021) työssä teolliseen kokoluokkaan kehitettyä vesiabsorptiotekniikkaa testattiin biomassanpoltossa syntyviin savukaasuihin, joiden hiilidioksidipitoisuus oli 12,8 %. Testissä saavutettu tuotekaasun puhtaus oli 90-95 % mutta talteenoton hyötysuhde vain 60-70 %. Matalan talteenottokapasiteettinsa takia vesiabsorptiota ei ole nostettu vaihtoehdoksi hiilidioksidin varastointia koskevissa tutkimuskissa, mutta CCU-hankkeissa matalampi talteenottoaste ei välttämättä näyttäydy ongelmana. Kaupallisen tason saavuttaessaan vesiabsorptio olisi varteen otettava vaihtoehto sellutehtaalla esimerkiksi meesauunille, jonka savukaasujen korkeampi CO_2 -pitoisuus laskee prosessin energiankulutusta. (Teir et al., 2014.)

4 Hiilidioksidin hyödyntäminen

Talteen otettu hiilidioksidi on mahdollista varastoida pysyvästi esimerkiksi geologisiin varastoihin, mutta vaihtoehtoisesti se voidaan hyödyntää sellaisenaan tai jatkojalostaa. Hiilidioksidia käytetään maailmanlaajuisesti vuosittain noin 230 Mt, josta suurin osa kuluu urean valmistukseen ja öljynpumppauksen tehostamiseen. Muita käyttökohteita löytyy muun muassa elintarvike-, kemikaali- sekä rakennusteollisuudessa. Suomessa vuotuinen käyttö on reilu 200 kt, josta suurin osa on keskittynyt elintarviketeollisuuteen sekä hyödyntämiseen kasvihuoneissa. (Linjala & Kiviranta, 2023) Viime vuosina Suomessa on käynnistetty myös hiilidioksidin jatkojalostukseen liittyviä hankkeita, jotka voivat nostaa kysyntää tulevaisuudessa.

Tässä kappaleessa perehdytään tarkemmin hiilidioksidin käyttökohteisiin metsäteollisuudessa sekä jatkojalostusmahdollisuuksiin. Lopuksi esitellään käyttökohteita muilta teollisuuden aloilta.

4.1 Hyödyntämiskohteet metsäteollisuudessa

Kemiallisessa metsäteollisuudessa hiilidioksidia voidaan hyödyntää useissa eri prosesseissa. Pääasiassa käyttömahdollisuudet liittyvät yhdisteen pH-arvoa säätäviin ominaisuuksiin, joiden ansiosta hiilidioksidilla voidaan korvata esimerkiksi rikkihapon käyttöä. Käyttökohteita löytyy laajasti eri osastoilta aina kuitulinjoilta kartongin ja paperin valmistukseen asti. Kulutukseltaan suurimmat käyttökohteet liittyvät mustalipeän käsittelyyn haihduttamojen yhteydessä sekä paperin täyteaineena käytettävän kalsiumkarbonaatin (precipitated calcium carbonate, PCC) valmistukseen.

4.1.1 Ruskean massan pesu

Sellutehtaan kuitulinjat käsittävät monia prosesseja aina puuhakkeen käsittelystä valkaistun sellun jälkikäsittelyyn ja kuivaukseen. Keittovaihetta, jossa puukuidut erotellaan toisistaan valkolipeällä, seuraa useita eri pesuvaiheita. Ruskean massan pesussa tavoitteena on erottaa

sellukuidut talteen otettavista keittokemikaaleista hyödyntäen mahdollisimman vähän pesukemikaaleja. Onnistuneella pesutuloksella minimoidaan häviöt tehtaan kemikaalikierrossa, vähennetään kemikaalien kulutusta valkaisussa, maksimoidaan energiantuotannossa hyödynnettävän kuiva-aineen osuus sekä vähennetään ympäristövaikutuksia. Ruskean massan pesua seuraavassa valkaisussa pesuvaiheiden tarkoitus on erottaa massasta aineet, jotka ovat haitallisia seuraavissa vaiheissa. (Alén et al., 2011.)

Ruskean massan pesussa hiilidioksidia voidaan käyttää pHn säätelyssä ja siten saavuttaa merkittäviä säästöjä orgaanisten aineiden (chemical oxygen demand, COD) ja natriumin pesuhäviöissä sekä pesuveden määrässä. Hiilidioksidin käytöllä on raportoitu olevan pesutuloksen kannalta positiivinen vaikutus massan suotautuvuuteen, diffuusioon perustuvaan aineensiirtoon pesussa sekä kuitujen pinnassa olevien, ionisoituneiden molekyylien desorptioon. Saavutettuja hyötyjä ovat esimerkiksi ruskealle massalle tyypillisten uuteaineiden aiheuttaman vaahtoamisen väheneminen ja saostumien hallinta, mikä edelleen parantaa pesun ajettavuutta ja vähentää laitteiston huoltotarvetta. Merkittävin yksittäinen hyöty saadaan massan suotautuvuuden paranemisesta. Lähdekirjallisuudessa raportoitu hiilidioksidin kulutus pesuvaiheessa vaihtelee välillä 2-4,5 kg CO_2/ADt. Korkeimmillaan kulutus on yksittäisillä havusellulinjoilla jopa 8,5 kgCO_2/ADt. (Ruostemaa, 2018.)

4.1.2 Valkaisu

Ruskean massan pesun jälkeen sellun käsittely jatkuu valkaisuvaiheessa, jonka tavoitteena on poistaa massassa jäljellä oleva ligniini ja muut värjäävät yhdisteet sekä saavuttaa lopputuotteen tasainen vaaleus. Valkaisu koostuu useasta vaiheesta, joissa jäännösligniiniä poistetaan hapettavilla kemikaaleilla, kuten klooridioksidilla, hapella ja vetyperoksidilla. Oleellisena osana valkaisuvaiheiden välillä on massan pesu, jotta liuennut ligniini saadaan erotettua ja eri valkaisukemikaalien päätyminen seuraaviin vaiheisiin estettyä. Valkaisun viimeisessä vaiheessa massan vaaleus on jo korkea ja kemikaalia kuluu lähinnä jäljellä olevien, värillisten ryhmien hapettamiseen värittömiksi sekä pesussa jälkikellertymistä aiheuttavien rakenteiden poistoon. (Alén et al., 2011.) (Prowledge, 2023b.)

Valkaisuvaiheen pesuja voidaan tehostaa hiilidioksidin lisäyksellä massan joukkoon ennen tai jälkeen pesuvaiheen. Siirryttäessä alkalisesta vaiheesta happamaan voidaan valkaisukemikaalien kulutusta vähentää laskemalla massan pH-arvoa ennen pesuvaihetta hiilidioksidin

avulla. Mikäli hiilidioksidia lisätään vasta pesuvaiheen jälkeen, voidaan puolestaan kasvattaa ligniinin erotuksen selektiivisyyttä, mikä edelleen vähentää kemikaalikulutusta valkaisuvaiheessa. Lisäksi pienempi kemikaalikulutus voi liittyä hiilidioksidin kykyyn irrottaa ligniinistä kalsiumioneja, joiden arvioidaan vaikuttavan massan väriin. Pesujen selektiivisyyteen sekä massan pH-arvon laskuun liittyvissä tutkimuksissa hiilidioksidin kulutukseksi on arvioitu 2-4 kg/ADt saavuttaen 4 kg ClO_2/ADt säästö kemikaalikulutuksessa. Massan kalsiumkemiaan liittyvissä testeissä kaasun kulutus oli 3 ja 4 kg CO_2/ADt, minkä seurauksena saavutettiin 3 kg ClO_2/ADt ja 5 kg H_2O_2/ADt säästöt. (Ruostemaa, 2018)

Imatran tehtailla hiilidioksidia on hyödynnetty kuitulinjoilla ruskean massan pesussa ja valkaisussa jo useita vuosia. Linjojen vuotuinen kulutus on tällä hetkellä yhteensä noin 3600 tonnia vastaten 7 kg CO_2/ADt. Havusellulinjalla hiilidioksidia annostellaan ruskean massan pesuun lajittamon saostimilla ja koivusellua tuottavalla linjalla lajittamolla sekä valkaisussa. Myös havusellulinjalla hiilidioksidia on kokeiltu syöttää valkaisun loppuvaiheeseen, mutta käytöstä luovuttiin lisäyksen vaikutuksen ollessa merkityksetön. Tällä hetkellä hiilidioksidin käytön lisäämiselle ei nähdä tarvetta tulevaisuudessa. (Ollila, 2024.)

4.1.3 Kartonki- ja paperikoneet ja sellun kuivaus

Paperin ja kartongin valmistuksessa sekä sellun kuivatuksessa hiilidioksidilla on mahdollista tehostaa vedenpoistoa. Paperi-, kartonki- ja kuivauskoneilla puukuituja syötetään tuotantolinjan alussa olevaan perälaatikkoon, josta massa levitetään tasaisena suihkuna viiraosuudelle. Viiraosuudella massasta poistetaan vettä suotauttamalla ja kasvatetaan massan kuiva-ainepitoisuutta puristinosuudelle sopivaksi. Puristin- ja kuivatusosuudella veden poistoa jatketaan edelleen, kunnes tuote on valmis jälkikäsittelyyn. (Prowledge, 2023a.)(Prowledge, 2023b.)

Suurin osa vedestä poistuu prosessin alussa viiraosuudella, mitä voidaan tehostaa syöttämällä perälaatikkoon hiilidioksidia. Ilmiön varsinainen kemiallinen mekanismi ei toistaiseksi ole tiedossa, vaan ominaisuus on huomattu teollisuudessa kokemusperäisesti. Annostelemalla hiilidioksidia 2 kg/Pt voidaan saavuttaa paperin tuotantokapasiteetin kasvu tai kuitujen syöttökonsentraation lasku. (Ruostemaa, 2018.)

Lisäksi kartongin- ja paperin valmistuksessa hiilidioksidin vaikutusta pH-arvoon voidaan hyödyntää kalsiumkemian hallinnassa, mikäli täyteaineena käytetään kalsiumkarbonaattia. Vesikiertoon liuennut kalsiumkarbonaatti on haitallista, sillä se nostaa veden kovuutta ja siten lisää katkoriskiä. Haitallista liukenemista vesikiertoon voidaan ehkäistä syöttämällä paperimassan sekaan natriumbikarbonaattia tai hiilidioksidia. Mikäli tavoitellut prosessiolosuhteet ovat emäksisellä alueella, voidaan haluttu pH saavuttaa syöttämällä hiilidioksidia massan sekaan yhdessä natriumhydroksidin kanssa, jotka reagoivat natriumbikarbonaatiksi ($NaHCO_3$). (Ruostemaa, 2018.)

4.1.4 Ligniinin saostus

Kuitulinjalta haihduttamolle tulevasta mustalipeästä on mahdollista erottaa ligniiniä, joka hemiselluloosan kanssa muodostaa suurimmaksi osaksi mustalipeän kuiva-aineen (Kuparinen, 2019). Yksi tunnetuista ligniinin erotukseen mustalipeästä käytettävistä menetelmistä on Valmetin kehittämä LignoBoost-menetelmä. Prosessin alussa haihduttamolle tulevaa mustalipeää johdetaan saostusosioon 30-40 % kuiva-aineessa. Saostuksessa lipeän pH-arvoa lasketaan rikkihapolla tai hiilidioksidilla, jolloin ligniini alkaa erottua. Saostunut ligniini suodatetaan ja pestään happamalla liuoksella, jotta ligniiniin sitoutunut natrium saadaan palautettua pesusuodoksen mukana takaisin talteenoton kemikaalikiertoon. Ennen lopullista pesua suodatettu ligniinikakku hajotetaan kertaalleen sekä pestään ja suodatetaan uudestaan kemikaalikulutuksen minimoimiseksi. Hiilidioksidin kulutus prosessissa riippuu siitä, kuinka paljon ligniiniä halutaan erottaa. Lähdekirjallisuuden perusteella erotettava määrä on välillä 100-220 kg/ADt. Vastaavaksi hiilidioksidin kulutukseksi on arvioitu 120-250 kg/tonni ligniiniä (Ruostemaa, 2018) (Kuparinen et al., 2018). Erotuskosteudessa ligniiniä voidaan myydä raaka-aineeksi esimerkiksi pakkausmateriaalien tai uusiutuvien polttoaineiden valmistukseen tai hyödyntää kuivattuna meesauunin polttoaineena. (Vakkilainen & Kivistö, 2008.) (Valmet, 2017.)

Hiilidioksidin hyödyntämisen kannalta ligniinin erotus on otollista sen kulutuksen ollessa yksi suurimmista yksittäisistä käyttökohteista. Lisäksi ligniinin erotus tarjoaa ratkaisun tehtaille, joiden soodakattila on tuotannon pullonkaula. Ligniinin erotus laskee polttoon päätyvän mustalipeän kuiva-aine pitoisuutta, mikä tarkoittaa pienempää lämpökuormaa soodakattiloilla. Mikäli tehtaan tuotanto kuitenkin halutaan säilyttää muuttumattomana, on vaikutus

höyryn- ja sähköntuotantoon negatiivinen. Lisäksi tehtaan taseiden osalta tulee huomioida erotusprosessin myötä tehtaan kasvava sähkönkulutus sekä pesusuodosten tuoma lisäkuorma haihduttamolla. (Kuparinen, 2019.)

4.1.5 Mäntyöljyn valmistus

Haihduttamon yhteydessä mustalipeästä erotetaan suopaa, jota voidaan edelleen jatkojalostaa mäntyöljyksi. Mäntyöljyn valmistuksen lisäksi suovan erotuksella varmistetaan tehtaan sujuva tuotanto. Mäntyöljyä voidaan hyödyntää monien tuotteiden valmistuksessa fossiilisten raaka-aineiden sijasta ja on siten arvokas sivutuote sellutehtaalla. (Tikka et al., 2008a.)

Suovan erotusta seuraava mäntyöljyn valmistusprosessi koostuu neljästä vaiheesta: suovan lämmitys, hapotus, öljyn erotus emävedestä, ligniinistä ja kalsiumista sekä öljyn kuivaus. Haihduttamolla suopaa erotetaan pesusuodoksesta, heikkomustalipeästä ja välimustalipeästä. Lipeäsäiliöissä aineena tiheämpi lipeä valuu pohjalle päästäen huokoisemman suovan nousemaan pinnalle. Säiliön yläosassa olevista kouruista suopa siirtyy edelleen suopasäiliöön, jossa jäljellä olevan mustalipeän annetaan erottua. Mustalipeä nostaa merkittävästi kemikaalin kulutusta hapotusvaiheessa, minkä takia suovan tulee antaa olla säiliössä vähintään kahdeksan tuntia mahdollisimman hyvän erotusasteen saavuttamiseksi. Suopasäiliöstä suopa siirretään lämmityksen kautta hapotusvaiheeseen. Perinteisessä hapotusprosessissa suovan sekaan lisätään vettä ja rikkihappoa, minkä vaikutuksesta suovassa olevat rasvat ja risiinit muuttuvat happomuotoon. Syntynyt seos johdetaan erotusvaiheeseen, jossa mäntyöljy erottuu emävedestä, ligniinistä ja kalsiumista prosessista riippuen dekantterissa tai sentrifugissa. (Tikka et al., 2008a.)

Perinteisessä mäntyöljyn valmistusprosessissa ongelmana on suuri rikkihapon kulutus, mikä häiritsee sellutehtaan kemikaalikierron rikin ja natriumin suhdetta. Ratkaisuksi ongelmaan on kehitetty kaksivaiheinen hapotus, jossa ennen varsinaista hapotusta suopaa palstoitetaan natriumbisulfiitilla tai hiilidioksidilla. Molemmissa tapauksissa kierron rikki- ja natriumtase pysyy muuttumattomana, sillä natriumbisulfiittia voidaan valmistaa tehtaan savukaasuista erotetun rikkidioksidin avulla. Esipalstoituksen ansioista hapotuksen rikkidioksidin kulutusta voidaan vähentää jopa 50 %. (Tikka et al., 2008a.)

Suovan esipalstoituksessa käytettävän hiilidioksidin puhtaudella ei ole suurta merkitystä, minkä vuoksi tehtaan savukaasuista talteen otettu hiilidioksidi soveltuu tarkoitukseen hyvin. Hiilidioksidin kulutus on riippuvainen suovan erotusasteesta lipeäsäiliöissä ja on tavallisesti välillä 70-120 kg raakamäntyöljytonnia kohden (Ruostemaa, 2018). Tehtaan muiden taseiden osalta tulee huomioida haihduttamon höyrynkulutuksen kasvu haihdutuskiertoon palautuvan veden myötä.

4.1.6 Jäteveden käsittely

Jäteveden käsittelyssä hiilidioksidia on mahdollisuus käyttää rikkihapon sijasta esimerkiksi neutralointiin ja ylijäämälietteen vedenpoistoon. Hiilidioksidin käytön etuihin lukeutuu sen helpompi säädettävyys, laitteistojen pienemmät korroosionkesto- ja käyttöturvallisuusvaatimukset sekä vähentynyt kemikaalien, kuten vaahdonestoaineiden, polymeerien sekä saostusaineiden kulutus suhteessa rikkihapon käyttöön. Kohentunut vedenpoisto sekä säästöt kemikaalien kulutuksessa voidaan saavuttaa annostuksella 30 kg CO_2 400 m^3 jätevettä kohden. Mahdollinen haittapuoli hiilidioksidin käytössä liittyy neutralointiin vaadittavaan aikaan, jonka on raportoitu olevan pidempi suhteessa rikkihapon käyttöön. (C.G. Enyj, 2007.) (Ruostemaa, 2018.)

Imatran tehtailla jäteveden käsittely koostuu kemiallisesta ja biologisesta puhdistamosta, joissa käytetään vuosittain yhteensä 600-700 tonnia rikkihappoa. Puhdistamoilla ei ole käytetty hiilidioksidia jätevesien käsittelyssä aikaisemmin. Mikäli tehtailla olisi tulevaisuudessa savukaasuista talteen otettua hiilidioksidia tarjolla, olisivat olosuhteet kaasun hyödyntämiseen vesien käsittelyssä otolliset ja hyödyntämiskohteen tarkempi tarkastelu suositeltavaa.

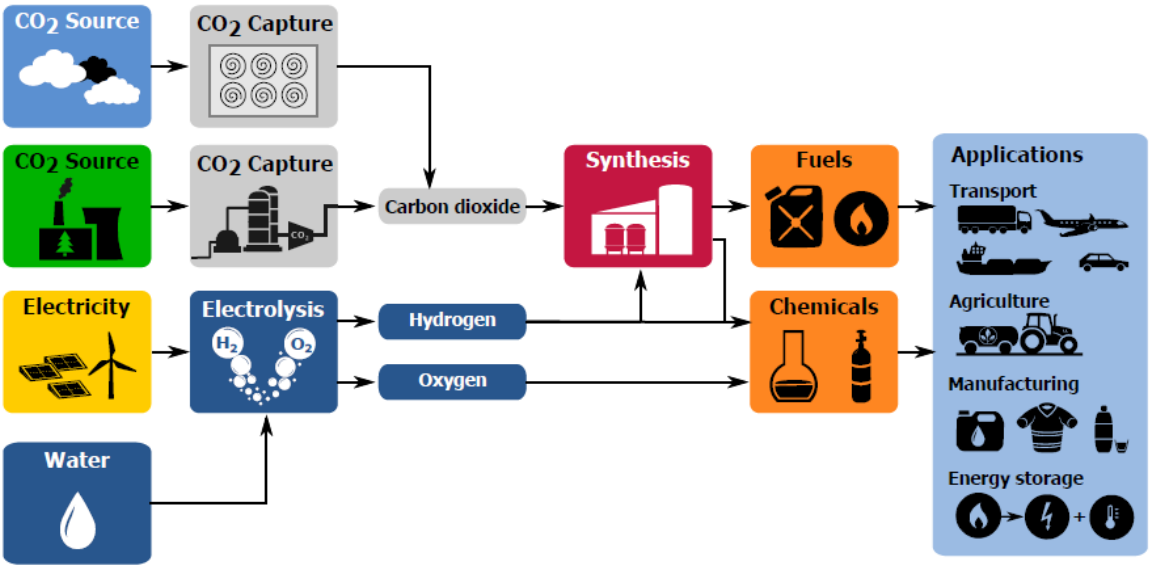
4.2 Hiilidioksidin jatkojalostaminen

Suoran hyödyntämisen sijaan vaihtoehtona on jalostaa hiilidioksidi myytäväksi tuotteeksi. Yhdessä vedyn kanssa hiilidioksidista voidaan valmistaa esimerkiksi polttoaineita ja kemikaaliteollisuuden raaka-aineita. Jatkojalostaminen tarjoaa houkuttelevan mahdollisuuden laajentaa tuoteportfoliota erityisesti niillä sellutehtailla, jotka ovat sähköntuotannon suhteen yliomavaraisia (Kuparinen, 2019). Jos hiilidioksidia ei jatkojalosteta talteenottokohteessa,

voi metsäteollisuuden tuotantolaitoksen rooli olla biogeenisen hiilidioksidin tarjoajana tuotantoketjussa.

4.2.1 Power-to-X

Tulevaisuudessa talteen otetun hiilidioksidin suurimmat käyttökohteet ovat useiden tutkimusten ja ilmastoskenaarioiden valossa polttoaineiden ja kemikaalien valmistuksessa power-to-X (PtX) prosesseja hyödyntäen (IEA, 2019) (Karjunen, 2022). PtX tarkoittaa prosesseja, joissa sähköenergialla tuotettu vety ja hiiliyhdiste reagoivat muodostaen erilaisia tuotteita. Lopputuote voi olla esimerkiksi kaasua, nestettä tai kemikaalia, minkä mukaan määrittyy prosessien erilaiset nimitykset kuten power-to-gas (PtG), power-to-liquid (PtL) ja power-to-chemical (PtC). Prosessivaihtoehtoja sekä lopputuotteita on useita, joista muutamia on esitetty kuvassa 6. (Dahiru et al., 2022.)



Kuva 6. Esimerkkejä power-to-X-tuotantoketjuista. (Karjunen, 2022.)

Polttoaineiden ja kemikaalien valmistus PtX-prosessilla perustuu usein synteesikaasun muuntamiseen halutuksi kemikaaliksi. Synteesikaasulla voidaan tarkoittaa useampaa erilaista kaasuseosta mutta tässä työssä termillä viitataan vedyn ja hiilimonoksidin tai hiilidioksidin muodostamaan seokseen, jota jatkojalostetaan katalyyttisella reaktiolla. Synteesikaasun lähteenä voi toimia kaasutuskaasu tai se voidaan valmistaa sekoittamalla vetyä ja talteen otettua hiilidioksidia tai hiilidioksidista käänteisellä vesikaasureaktiolla (reverse water gas shift, rWGS) tuotettua hiilimonoksidia. (Mankonen et al., 2022.)

Olennainen osa PtX-prosesseja on vedyn tuotanto, joka perinteisesti on toteutettu maakaasun höyryhajotuksella ja hiilen kaasutuksella. Fossiilisiin raaka-aineisiin perustuvalle vedyn valmistukselle kestävämpi vaihtoehto on vesielektrolyysi, jossa uusiutuvilla energialähteillä tuotetulla sähköllä vedestä erotetaan vetyä ja happea. Elektrolyysin kohdalla tuotannon päästöt riippuvat pääasiassa prosessiin käytetyn sähkön tuotantotavasta. Teknisesti kypsimmät teknologiavaihtoehdot ovat alkalista nestettä elektrolyyttinä hyödyntävä elektrolyysi (AEL) ja protoninvaihtomembraaniin pohjautuva elektrolyysi (PEM). Vaikka PEM on elektrolyyseistä vähemmän tunnettu, on teknologian kehitys ottanut merkittäviä harppauksia viime vuosina ja on tietyiltä ominaisuuksiltaan, kuten hyötysuhteen ja operoinnin dynaamisuuden osalta, arvioitu kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi AEL-prosessille. AEL- ja PEM-elektrolyysien lisäksi vaihtoehtona on hyötysuhteeltaan paremmin suoriutuva kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC). Parempi hyötysuhde perustuu prosessiin korkeaan, 700–1000 °C:n toimintalämpötilaan, mikä mahdollistaa myös muita elektrolyysejä tehokkaamman integroinnin toisiin prosesseihin. Toistaiseksi SOEC on kuitenkin varhaisessa kehitysvaiheessa, eikä siten vielä kaupallisesti kypsää teknologiaa. (Dahiru et al., 2022.) (Karjunen, 2022.)

Vety itsessään on arvokas raaka-aine ja energiankantaja, jota voidaan synteesiprosessien lisäksi hyödyntää esimerkiksi polttoaineena meesauunissa. Vedyn kysynnälle ennustetaan suurta kasvua monissa ilmastoskenaarioissa ja perinteisten tuotantotapojen arvioidaan korvaantuvan osin elektrolyyseillä vuoteen 2030 mennessä. Tällä hetkellä suurin ongelma kestävän vedyn tuotannossa liittyy elektrolyysien suureen tehontarpeeseen ja siten myös uusiutuvan energian saatavuuteen. (IEA, 2022.)

4.2.2 Polttoaineet

Hiilidioksidia voidaan hyödyntää synteettisten polttoaineiden valmistuksessa suoraan tai muuntamalla se ensin synteesikaasuksi metanolisynteesiä tai F-T-reaktiota varten. Mahdollisia polttoainevaihtoehtoja ovat metaani, metanoli sekä F-T-prosessilla tuotettu diesel, joista merkittävin monien tutkimusten valossa on metanoli. Metaania voidaan valmistaa suoraan hiilidioksidista ja vedystä katalyyttiä hyödyntäen Sabatier-reaktiolla. Myös metanolisynteesi ja F-T-reaktio ovat katalyyttisiä prosesseja mutta vaativat perinteisesti hiilidioksidin muuntamisen synteesikaasuksi. Myös metanolia on mahdollista valmistaa suoraan hiilidioksidista

mutta prosessi on synteesikaasureittiä tuntemattomampi. (Mankonen et al., 2022.) (Dahiru et al., 2022.)

Teknisesti F-T-reaktio eroaa metanolisynteesistä käytetyn katalyytin, paineen ja lämpötilan osalta samoin kuin synteesikaasun hiilimonoksidi-vety-suhteeltaan halutusta lopputuotteesta riippuen. Metanolia voidaan jatkojalostaa bensiiniksi mutta sitä on mahdollista hyödyntää myös sellaisenaan polttoaineena tai sekoittaa bensiiniin ja siten kasvattaa uusiutuvien liikennepolttoaineiden osuutta (IEA, 2019). F-T-reaktiossa syntyvä neste muistuttaa dieseliä mutta vaatii jatkojalostusta liikennepolttoaineena käytettäväksi. Kun reaktioissa käytettävä hiilidioksidi on peräisin savukaasuista, puhutaan yleisesti E-polttoaineista, kuten E-metanoli ja E-diesel. (Mankonen et al., 2022)

Synteettisten polttoaineiden valmistus on vielä pienessä mittakaavassa, mutta osuuden arvioidaan tulevaisuudessa kasvavan ja olevan yksi merkittävimmistä hiilidioksidin käyttökohteista. Esimerkiksi Bazannella ja Ausfelder (2017) arvioivat tutkimuksessaan synteettisten polttoaineiden valmistuksen lisäävän hiilidioksidin kysyntää pelkästään Euroopassa 380 Mt. Synteettisiä polttoaineita valmistetaan nykyään muun muassa Saksassa, mutta käynnissä olevia pilottihankkeita on myös Suomessa. Esimerkiksi Lappeenrantaan on suunnitteilla sementtitehtaan hiilidioksidipäästöjä synteettisten polttoaineiden valmistuksessa hyödyntävä pilottilaitos, minkä lisäksi Harjavaltaan jo rakenteilla olevan laitoksen on tarkoitus aloittaa uusiutuvan vedyn ja E-metaanin valmistus teollisessa mittakaavassa vuoden 2024 aikana (Plit, 2023). Mikäli synteettisten polttoaineiden valmistus käynnistyisi Kaakkois-Suomessa, tarjoaisi se Imatran tehtaille muun metsäteollisuuden kanssa mahdollisuuden toimia tuotantoketjussa pääasiallisena biogeenisen hiilidioksidin toimittajana. Täysin uusiutuvalle F-T-nesteelle voi puolestaan löytyä kysyntää myös ulkomailta. (Mankonen et al., 2022.) (Karjunen, 2022.)

4.2.3 Muovimateriaalit

Kiertotalouden näkökulmasta kiinnostava kohde PtX-prosesseista on muovituotteiden fossiilisten tuotantoketjujen korvaaminen biopohjaisilla ratkaisuilla. Viime vuosina biomassan jalostukseen perustuva muovituotanto on saanut osakseen paljon huomiota ympäristöystävällisempänä vaihtoehtona fossiiliselle tuotannolle. Toisaalta tutkimuksissa on nostettu esiin

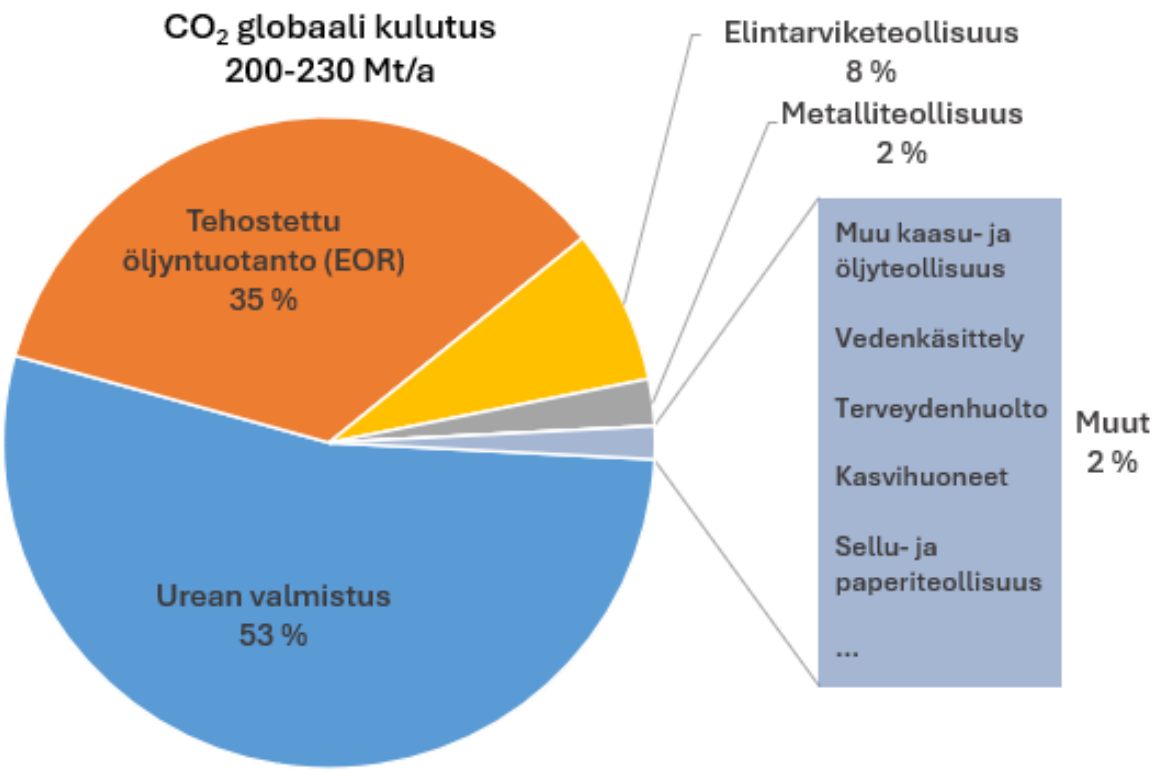
myös biopohjaisten muovien kestävyyshaasteet esimerkiksi maan käyttöön sekä ympäristölle haitallisiin tuotantoketjuihin liittyen. (Tsang et al., 2019.) (Brizga et al., 2020.)

Polttoaineiden valmistuksen lisäksi E-metanolia voidaan jatkojalostaa muovituotteiksi. F-T-reaktiolla puolestaan on mahdollista tuottaa synteesikaasusta suoraan kevyitä hiilivetyjä muovituotantoon. Biogeenistä hiilidioksidia ja vesielektrolyysillä tuotettua vetyä hyödyntävällä F-T reaktiolla tuotettujen hiilivetyjen valmistusta on tutkittu esimerkiksi VTT:n ja suomalaisten teollisuusyhtiöiden Decarbonate- ja Forest CUMP- projekteissa. (Mankonen et al., 2022.) (VTT, 2024.)

Imatran tehtailla suurin osa kartongin päällystemateriaalina käytettävästä muovista on fossiilisesti tuotettua polyeteeniä. Lisäksi pieni osa polyeteenistä on biopohjaista muovia, joka on pääosin tuotettu Brasiliassa. E-metanoliin tai F-T-reaktioon perustuva polyeteenin tuotanto tarjoaa nykyisin käytössä oleville päällystemateriaaleille kestävämmän vaihtoehdon. Metanolin tai olefiinien tuotanto ja jatkojalostus polyeteeniksi yhteistyössä esimerkiksi Borealiksen kanssa nostaisi Imatran tehtaiden päällystemateriaalin kotimaisuusastetta sekä sitoisi koko tuotantoketjun yhä vahvemmin osaksi kiertotaloutta.

4.3 Muut teollisuus

Metsäteollisuuden hyödyntämiskohteiden sekä tässä osiossa esiteltyjen jatkojalostusmahdollisuuksien lisäksi hiilidioksidille on lukuisia käyttökohteita muilla teollisuuden aloilla. Maailmanlaajuisesti suurimmat käyttökohteet ovat urean valmistus, öljyn pumppauksen tehostaminen (EOR) sekä elintarviketeollisuus (IEA, 2019). Yksi lupaavimmista, Suomessakin kaupallisen tuotannon kynnyksellä olevista, käyttösovelluksista on betonin valmistus, jossa hiilidioksidi varastoidaan materiaaliin mineralisoimalla (Vehmas, 2022). Myös Suomessa elintarviketeollisuus vastaa suuresta osasta hiilidioksidin kokonaiskulutuksessa, minkä lisäksi hiilidioksidia hyödynnetään esimerkiksi kasvihuoneissa, metalli- ja rakennusteollisuudessa sekä terveydenhuollossa (Teir et al., 2011). Hiilidioksidin käyttökohteita ja kulutuksen jakautuminen aloittain on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Hiilidioksidin globaali kulutus ja käyttökohteet. (Karjunen, 2022.)

Muiden teollisuuden alojen käyttökohteiden hiilidioksidin kulutus on verrattain pientä, eikä niille arvioida merkittävää kasvua tulevaisuudessa. Suomesta geologisia varastoja hiilidioksidille ei löydy, mutta varastointiin maaperän kiviainekseen mineralisoimalla on arvioitu olevan suuri potentiaali. Suomen maaperästä löytyviin serpentiinivaroihin olisi arviolta mahdollista sitoa jopa 2-3 Gt hiilidioksidia. (Teir et al., 2011.)

5 Logistiikka ja laatuvaatimukset

Hiilidioksidin sekä muiden hyödykkeiden kuljetus- ja välivarastointi ovat välttämättömiä lähes kaikissa CCU-arvoketjuissa. Mitä laajempi kokonaisuus on, sitä enemmän vaaditaan joustovaraa eri käyttökohteiden tarpeiden mukaan. Hiilidioksidin jatkojalostaminen talteenottokohteessa tuo mahdollisuuden toteuttaa kuljetus lopputuotteen muodossa, mutta tällöin logistiikkaa tule pohtia myös muiden hyödykkeiden, kuten vedyn ja sähkön osalta. Tässä työssä rajaus on kuitenkin tehty vain hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin. Luvussa esitellään hiilidioksidin yleisimmät kuljetusvaihtoehdot ja niiden tekniset vaatimukset. Lisäksi käydään läpi vaatimuksia välivarastonnin sekä talteen otetulle hiilidioksidille asetettavan puhtaustason osalta.

5.1 Kuljetus ja välivarastointi

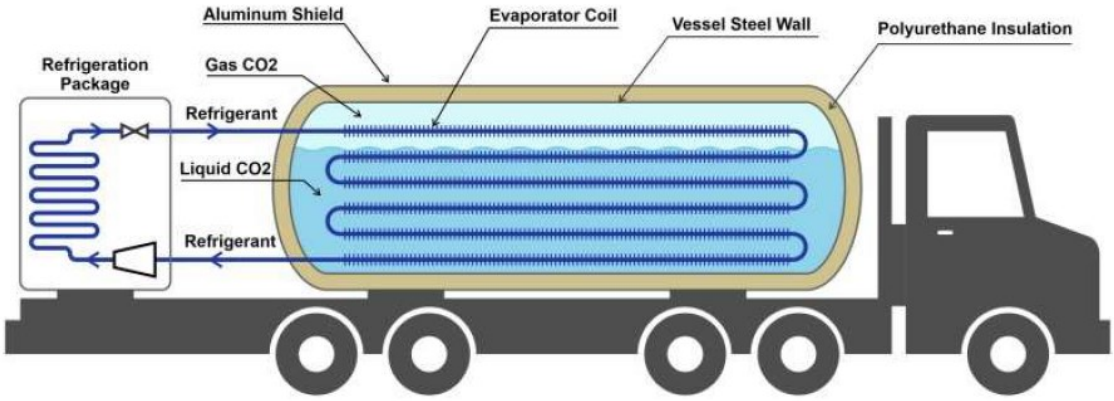
Mikäli hiilidioksidia otetaan talteen enemmän kuin tehtaalla voidaan kuluttaa ja myydään teollisuuskäyttöön, arvoketjussa korostuu kuljetuksen ja välivarastoinnin tarve. Hiilidioksidille on eri kuljetusmahdollisuuksia, joista sopivimman valinta riippuu pääasiassa siirtomatkasta sekä tarvittavasta kuljetuskapasiteetista. Muita merkittäviä tekijöitä ovat esimerkiksi olemassa oleva infrastruktuuri, maantieteelliset tekijät kuten topografia sekä käyttökohteen laatuvaatimukset hiilidioksidille. Lisäksi eri kuljetusmuodot ja varastointi asettavat erilaisia vaatimuksia hiilidioksidin puhtaudelle ja esikäsittelytarpeelle. (Karjunen, 2022.)

Pitkillä välimatkoilla taloudellisesti kannattavimmat kuljetusvaihtoehdot ovat putki- ja laivakuljetus, jotka molemmat ovat teknisesti hyvin tunnettuja menetelmiä. Pitkällä aikavälillä putkikuljetus voi olla kannattavampi vaihtoehto myös lyhyemmissä CCU-arvoketjuissa, vaikka jouduttaisiin investoimaan kalliin kuljetusinfran rakentamiseen. Putkikuljetuksen kustannuksia laskevat erityisesti infrastruktuurin mahdollistama skaalausetu sekä mahdollisuus kuljettaa hiilidioksidi kaasufaasissa, jolloin myös esikäsittelyn tarve on matala vaatien pienimmillään vain kaasun paineistamisen ja veden poiston (Teir et al., 2011). Putkessa hiilidioksidia voidaan kuljettaa matalimmillaan 20 barin paineessa kaasuna tai korkeassa, 85-115 barin paineessa, tiheänä kaasuna tai superkriittisenä nesteenä. Suhteessa matalamman painetason systeemiin, kuljetus korkeapaineessa mahdollistaa lähes viisinkertaisen

kuljetuskapasiteetin, joka voi olla vuositasolla kulutuksesta riippuen muutamasta miljoonatonnista aina kymmeniin miljoonatonneihin hiilidioksidia. Pitkillä välimatkoilla kuljetus toteutetaan yleensä korkeapainesysteemissä mutta lyhyemmillä matkoilla ja esimerkiksi hiilidioksidin talteenottokohteessa oleviin hyödyntämiskohteisiin voidaan siirto toteuttaa matalan painetason putkikuljetuksena. (Karjunen, 2022.)

Laivakuljetuksessa painetaso on huomattavasti putkikuljetusta pienempi, mutta hiilidioksidi tulee aina nesteyttää, mikä nostaa merkittävästi esikäsittelyn vaatimaa energiantarvetta ja siten myös kustannuksia. Nesteytettynä hiilidioksidi kuljetetaan säiliöissä 7-20 barin paineessa ja haihtumisen minimoimiseksi -20 ja - 56 °C:n välillä. Riittävän matalan lämpötilan ja nestefaasin saavuttamiseksi hiilidioksidia tulee paineistaa ja lauhduttaa useammassa vaiheessa, minkä takia nesteytyksen vaatima energiantarve on kaasun komprimointia suurempi. Lisäksi laivakuljetus asettaa putkikuljetusta korkeammat vaatimukset hiilidioksidin puhtaudelle esimerkiksi vesi-, hiilidioksidi- ja haihtuvien aineiden pitoisuuksien osalta. (Teir et al., 2011.)

Hiilidioksidin hyödyntämiskohteet voivat sijaita huomattavasti lähempänä päästölähteitä kuin geologiset varastot ja kuljetusmäärät ovat usein pienempiä, mikä mahdollistaa myös rekka- ja raidekuljetuksen. Molemmissa tapauksissa kuljetus tapahtuu yleensä laivakuljetuksen tapaan nesteytettynä kuten kuvassa 8 on havainnollistettu, mutta pieninä määrinä kuljetus myös kaasuna painesäiliössä on mahdollista. Rekkakuljetuksen kapasiteetti vaihtelee yleisesti välillä 18-22 tonnia ja on arvioitu taloudellisesti kannattavaksi alle 100 kilotonnin vuosikapasiteetilla sekä alle 300 kilometrin välimatkoilla. Raidekuljetuksen tapauksessa kuljetuskapasiteetti voi olla jopa 80 tonnia ja olemassa oleva rataverkko mahdollistaa pidemmät kuljetusmatkat sekä rekkakuljetusta suuremman vuotuisen siirtokapasiteetin. (Teir et al., 2011.)



Kuva 8. Periaatekuva hiilidioksidin rekka- ja raidekuljetuksesta nesteytettynä. (Sani et al., 2022.)

CCU-arvoketjussa käytettävät kemialliset prosessit eivät tyypillisesti siedä suuria toiminta-arvojen muutoksia, minkä takia puskurivarasto tarvitaan tasalaatuisen hiilidioksidin syötön varmistamiseksi. Välivarastointi tapahtuu yleensä hiilidioksidin nestefaasissa, joten tekniset vaatimukset ovat pitkälti samat kuin laivakuljetuksen osalta. Kuljetusinfra itsessään tarjoaa varastointikapasiteettia esimerkiksi putkiverkoston paineensiedon sekä kuljetustankkien kapasiteetin rajoissa. Laivakuljetus vaatii satamaan vähintään yhden laivan kapasiteettia vastaavan välivaraston, jota voitaisiin hyödyntää myös maan sisäisissä CCU-arvoketjuissa (Kujanpää et al., 2016). Pienet puskurivarastot ja muu kuljetusinfrastruktuuri eivät kuitenkaan välttämättä pysty tarjoamaan riittävää kapasiteettia pidemmällä aikavälillä, minkä takia hiilidioksidilähteiden ja hyödyntämiskohteiden ulkopuoliset, suuremmat välivarastot voivat osoittautua paremmaksi ratkaisuksi. (Karjunen, 2022.)

Maanlaajuisen logistiikkaketjun kehittäminen tarjoaisi merkittäviä kustannussäästöjä CCUS-hankkeissa hiilidioksidimarkkinoiden kasvaessa (Kujanpää et al., 2016). Suomessa ei kuitenkaan tällä hetkellä ole hiilidioksidille suuren mittakaavan varasto- ja kuljetusinfrastruktuuria, mikä rajoittaa kuljetusvaihtoehtoja myös Imatran tehtaiden osalta. Kansainvälisen vesiyhteyden puuttuessa jää ainoiksi kuljetusvaihtoehdoiksi raide- ja rekkakuljetus. Imatran tehtaiden yhteys julkiseen rataverkkoon mahdollistaa kuitenkin hiilidioksidin kuljetuksen Suomen laajuisesti. Hiilidioksidin sijaan kuljetus voidaan toteuttaa myös lopputuotteen muodossa, mikäli jatkojalostus esimerkiksi metanoliksi tapahtuisi tehtaalla. Integraatin sisäisiin kohteisiin hiilidioksidi kannattaa johtaa kaasuna suoraan talteenottoyksiköltä. Varastokapasiteettia Imatran tehtailta löytyy nesteytetylle hiilidioksidille kymmenen kuution verran kuitulinjojen nykyistä kulutusta varten.

5.2 Tuotekaasun puhtaus

Talteen otetun hiilidioksidin puhtausvaatimukset määräytyvät käyttökohteen, kuljetuksen sekä varastoinnin mukaan. Kun laatuvaatimukset on asetettu, riippuu tuotekaasun esikäsittelyn tarve talteenottotekniikasta. Polttoprosesseissa savukaasuissa on usein merkittävä määrä erilaisia epäpuhtauksia, kuten rikin ja typen oksideja, jotka valitusta tekniikasta riippuen saattavat päätyä talteen otetun hiilidioksidin sekaan ja vaatia puhdistusta ennen jatkokäyttöä.

Metsäteollisuuden hyödyntämiskohteet kartonkikoneita luukuun ottamatta eivät yleensä vaadi täysin puhdasta hiilidioksidia vaan noin 80 %:n hiilidioksidipitoisuus on riittävä (Stubb & Laine, 2023). Epäpuhtauksien osalta huomiota tulee kiinnittää tuotekaasun rikkiyhdisteisiin, joiden määrä saattaa kasvaa merkitykselliseksi esimerkiksi vesiabsorptioon perustuvan talteenoton kohdalla. Muissa teollisuuden suorissa hyödyntämiskohteissa hyvänä vertailukohtana voidaan käyttää taulukossa 1 esitettyjä virvoitusjuomateollisuuden laatuvaatimuksia, jotka ovat metsäteollisuuden vaatimuksia selvästi tiukemmat.

Hiilidioksidin jatkojalostuksessa, kuten kemikaalien ja polttoaineiden valmistuksessa, puhtaus määräytyy pääasiassa synteesiprosesseissa käytettävän katalyytin mukaan. Monet katalyytit ovat herkkiä erityisesti rikki- ja typpiyhdisteille sekä metalleille, joiden läsnäolo laskee synteesiprosessin hyötysuhdetta merkittävästi (Heracleous et al. 2022). Kuljetuksen ja varastoinnin osalta puhdistustarve liittyy paineistuksen ja nesteytyksen tehontarpeeseen, jota kaasun epäpuhtaudet nostavat. Luvussa 5.1 todettiin laatuvaatimusten olevan tiukimmat laivakuljetuksen osalta liittyen pääosin tuotekaasun veden sekä haihtuvien aineiden pitoisuuksiin. (Teir et al. 2011.) (Ruostemaa, 2018.)

Taulukko 1. Virvoitusjuomateollisuuden laatuvaatimukset hiilidioksidille. (Ruostemaa, 2018.)

Parametri	Ohjearvo	Perustelu
Puhtaus	99,99 % v/v min.	Prosessi
Kosteus	20 ppm v/v max.	Prosessi
Happi, O_2	30 ppm v/v max.	Aistillinen
Hiilimonoksidi, CO	10 ppm v/v max.	Prosessi
Ammoniakki, NH_3	2,5 ppm v/v max.	Prosessi
Typpidioksidi, NO_2	2,5 ppm v/v max.	Sääntely
Typpimonoksidi, NO	2,5 ppm v/v max.	Sääntely
Ei haihtuva jäännös	10 ppm v/v max.	Aistillinen
Fosfiini PH_3	Läpäistäkseen testin (0,3 ppm v/v max.)	Sääntely
Haihtuvien hiilivetyjen kokonaismäärä	50 ppm v/v max.	Aistillinen
Asetaldehydi	0,2 ppm v/v max.	Aistillinen
Aromaattinen hiilivetypitoisuus	20 ppb v/v max.	Sääntely
TRS	0,1 ppm v/v max.	Aistillinen
SO_2	1 ppm v/v max.	Aistillinen
Kiinteän CO_2 haju	Ei vieraita hajuja	Aistillinen
Ulkonäkö vedessä	Ei väriä tai sameutta	Aistillinen
Haju tai maku vedessä	Ei vieraita hajuja tai makuja	Aistillinen

6 Tehtaan tasetarkastelu

Yhdistetty sellun- ja paperintuotanto on hyvin energiaintensiivinen teollisuuden ala. Hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön mahdollinen höyryn- sekä sähkönkulutus voivat tuoda merkittäviä muutoksia tehtaan energiataseisiin. Tehtaan omaan sähköntuotantoon rajatuissa tapauksissa voi hiilidioksidin hyödyntäminen olla haastavaa yhdessä energiaintensiivisen talteenoton kanssa. (Kuparinen, 2019.)

Tässä kappaleessa tutkitaan, miten hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen vaikuttaisivat Imatran tehtaiden sähkön- ja höyrynkulutukseen sekä hiilidioksidipäästöihin. Aluksi esitellään luotu Microsoft Excel-työkalu sekä perustelut valituille päästölähteille, talteenottoteknologioille ja hyödyntämiskohteille sekä prosesseihin liittyvät rajaukset ja kulutusarvot. Laskentatyökalun avulla tutkitaan kolmea erilaista skenaariota, joiden tuloksia tarkastellaan energiankulutuksen näkökulmasta sekä pohditaan hiilidioksidin talteenoton tuomia haasteita ja mahdollisuuksia.

6.1 Laskentatyökalun esittely

Hiilidioksidin talteenoton integrointi metsäteollisuuden integraattiin tuo muutoksia tehtaan eri energia- ja massataseisiin. Tässä työssä tutkittaviksi taseiksi on valittu hiilidioksidi, höyry ja sähkö. Työkalussa käyttäjä voi valita hiilidioksidin lähteen ja vertailussa huomioitavat hiilidioksidin hyödyntämiskohteet tehtaan sisällä. Lisäksi käyttäjällä on mahdollisuus valita talteenottoteknologia niille päästölähteille, joille on esitetty soveltuvaksi useampi eri erotusprosessi.

Talteenotosta ylijäävän hiilidioksidin oletetaan menevän kokonaisuudessaan tehtaan ulkopuoliseen hyötykäyttöön tai varastointiin mutta ei jäävän tehtaalle. Mikäli meesauuni on valittu päästölähteeksi, on käyttäjällä mahdollisuus muuttaa myös kalkin päivätuotantoa. Kun käyttäjä on tehnyt valinnat, päivittyvät tehtaan höyryn- ja sähkönkulutuksen luvut sekä hiilidioksidivirrat. Työkalun pääsivulla on näkyvissä yhteenveto, jossa simuloitua tilannetta verrataan tehtaan nykyiseen kulutukseen.

Laskentaa varten osa tuotantoon ja energiankulutukseen liittyvistä arvoista asetettiin vakioiksi tehtaan kulutushistoriaan perustuen. Valitut arvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Laskennalle asetettuja tuotanto- ja kulutusarvoja.

Sellun tuotanto [ADt/a]	1 000 000
Käyntiaika [h/a] (uudet prosessit)	8400
Kalkin tuotanto [t/d] (nykyiset uunit ja sähköinen)	713
Kalkin tuotanto [t/d] (kaasutettu kuori)	1 200
Sähkön omakäyttö [GWh/a]	1 300
Sähkön myynti [GWh/a]	4,8
Höyryn omakäyttö [GWh/a]	3 700
Hiilidioksidipäästöt yhteensä [kt/a]	2 400

6.2 Esitellyt konseptit Imatran tehtailla

Päästölähteiden valinta

Imatran tehtailla hiilidioksidin päästölähteitä on useita ja savukaasut johdetaan ympäristöön omissa kanavissaan, joista osa sijaitsee etäällä toisistaan. Kun huomioidaan tehtaan sisäinen infrastruktuuri ja eri lähteille soveltuvat erilaiset erotusteknologiat, on oletettavaa, ettei hiilidioksidin talteenottoa ole kannattavaa hyödyntää kaikilla lähteillä (Kuparinen, 2019). Talteenoton taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta merkittävimmät tekijät ovat hiilidioksidin määrä ja osapaine savukaasuissa (Teir et al., 2011). Imatran tehtaiden merkittävimpien hiilidioksidilähteiden savukaasujen ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Imatran tehtaiden hiilidioksidilähteiden kuivien savukaasujen ominaisuuksia. Epäpuhtaudet 6 % happitasossa.

	Yhteensä [kt/a]	Bio. [%]	Fos. [%]	CO_2 [til-%]	Merkittävimmät epäpuhtaudet [mg/m^3]
Soodakattilat	1614	83	17	10-12	Hiukkaset: 10-15 NOx : 170
Nykyiset meesauunit (713 t/d)	238	70	30	15-18	Hiukkaset: 10-30 NOx : 100-300
Meesauuni, kaasutettu kuori (1200 t/d)	505	100	0	16	-
Meesauuni (sähköinen)	166	100	0	> 90	-
Kuorikattila	475	99	1	11-12	NOx : 150-170 SO_2 : 20-40 CO: 10-20 Pienmetallit [µg/m^3]: Mn: 500, Zn: 12, Cu: 3, Ni: 1,5, (muut < 1)

Taulukossa 3 esitettyjen lähteiden lisäksi hiilidioksidipäästöjä syntyy hajukaasu- ja apukaasukattiloista sekä integraatin yksittäisistä prosesseista noin 80 kt. Tehtaiden nykyisistä hiilidioksidipäästöistä yli 90 % ovat biogeenisiä.

Määrällisesti suurin yksittäinen hiilidioksidin päästölähde on soodakattilat. Huomattavaa kuitenkin on hiilidioksidin matala osapaine savukaasuissa, kun taas meesauunien kohdalla hiilidioksidipitoisuus on korkea sekä polttoprosessia hyödyntävien että sähköisen meesauunin tapauksessa. Puhtausvaatimusten osalta lähteistä korostuu kuorikattila, jonka savukaasuille ei partikkelien poiston lisäksi ole muuta puhdistusta. Korkeampien typpi- ja rikkipäästöjen lisäksi savukaasuista on mittauksissa löydetty vaihteleva määrä muita epäpuhtauksia kuten mangaania, kuparia, lyijyä ja elohopeaa. Metallien vaikutuksia talteenoton hyötysuhteeseen ei lähdemateriaalien perusteella ole tutkittu laajasti, mutta ongelmia voi esiintyä esimerkiksi kuljetuksessa ja hiilidioksidin jatkojalostuksessa kuten katalyyttisessä synteesireaktiossa.

Pistelähdettä valittaessa ja talteenoton kannattavuutta ajatellen on tärkeää pohtia hankkeelle asetettavia tavoitteita. Mikäli tavoitellaan puhtaasti mahdollisimman suurta talteenottokapasiteettia, on selvää, että päästölähteeksi kannattaa valita soodakattilat. CCU-arvoketjuissa hyödynnettävä hiilidioksidin määrä voi kuitenkin olla huomattavasti pienempi verrattuna tarjolla olevaan talteenottokapasiteettiin, jolloin energiankulutuksen näkökulmasta kannattavampaa on keskittyä korkean hiilidioksidipitoisuuden lähteisiin, jotka Imatran tehtaiden tapauksessa on meesauunit.

Yksi näkökulma tavoitteita tarkasteltaessa on hiilidioksidin biogeenisyys. Taulukosta 3 huomataan suurimman fossiilisen hiilidioksidin lähteen olevan meesauunit, joiden tuotanto voitaisiin kuitenkin tulevaisuudessa muuttaa fossiilivapaaksi polttamalla uunissa kaasutettua kuorta tai sähköistetyllä kalkin tuotannolla. Stora Enson ensisijainen ympäristötavoite on luopua fossiilisten polttoaineiden käytöstä sen sijaan, että fossiilisia hiilidioksidipäästöjä pyrittäisiin vähentämään talteenotolla (Alaraudanjoki, 2024). Myös Imatran tehtaiden kohdalla tulee fossiilisten hiilidioksidipäästöjen vähentäminen rajata pois talteenotolle asetettavista tavoitteista. Uunien nykyinen tuotanto fossiilisilla polttoaineilla säilytetään kuitenkin vertailukohtana tasetarkastelussa.

Imatran tehtailla infrastruktuuri ei aiheuta suuria haasteita talteenottolaitteiston sijoitukselle. Sekä soodakattiloiden että kuorikattilan savupiippujen läheisyydessä on tilaa talteenottolaitteistolle sekä kohtuullinen liitäntämatka tarvittaville hyödykkeille, kuten höyrylle ja sähkölle. Meesauunien kohdalla voitaisiin hyödyntää käytöstä poistetulle PCC:n valmistuslaitokselle menevää savukaasulinjaa, joka mahdollistaa laitteiston sijoituksen tilavammalle alueelle, josta kuitenkin löytyy yhteys tehtaan höyry- ja sähköverkkoon.

Talteenottoteknologian valinta

Amiineihin perustuva liuotinpohjainen absorptio edustaa kaupallisesti kypsintä talteenottoteknologiaa ja soveltuu teknisesti kaikille sellutehtaan pistelähteille. Amiinit mahdollistavat korkean talteenottokapasiteetin kohteisiin, joissa hiilidioksidin konsentraatio savukaasussa on pieni, minkä takia teknologia on valittu ensisijaiseksi vaihtoehdoksi soodakattiloiden tapauksessa. Imatran tehtailla soodakattiloiden savukaasujen puhdistusjärjestelmään kuuluu hiukkasten erotuksen lisäksi rikkiyhdisteiden pesu, mikä vähentää amiinin degradaation riskiä. Amiinien todellisesta kulutuksesta ja mahdollisista päästöistä ei kuitenkaan ole raportoitu aiemmissa tutkimuksissa tai yritysten toimesta tarkasti, mikä tulee huomioida teknologian ympäristövaikutuksia tarkasteltaessa. Merkittävin haittapuoli amiineissa kartonkia valmistavan tehdasintegraatin tapauksessa on korkea matalapainehöyrynkulutus desorptiovaiheessa. Imatran tehtailla höyrynkulutusaste on nykyisellään korkea, mikä voi osoittautua ongelmaksi suuren mittakaavan hiilidioksidin talteenotolle, mikäli höyryntuotannon bioperäisyys halutaan säilyttää korkeana.

Savukaasujen korkean hiilidioksidipitoisuuden ansioista meesauuneille on tarjolla useampia vaihtoehtoja erotusteknologioissa amiinien rinnalla. Sähköisen uunin tapauksessa

erotusteknologiaa ei tarvita, joten talteenoton energiankulutus oletetaan merkityksettömäksi. Ensisijaiseksi vaihtoehdoksi polttoprosesseja hyödyntäville uuneille on valittu fysikaaliseen adsorptioon perustuva PSA-teknologia. Merkittävin hyöty teknologiassa on sen sähkökäyttöisyys. Kaasun ja öljyn sekä kaasutetun kuoren poltossa uunien savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on samaa luokkaa, joten fysikaalinen adsorptio on soveltuva vaihtoehto kummassakin tapauksessa.

Osiossa 3.4 todettiin vesiabsorption olevan potentiaalinen vaihtoehto sellutehtaalle sen sähkökäyttöisyyden sekä ympäristöystävällisen absorbentin ansiosta. Teknologiaa on demonstroitu useassa hankkeessa, joiden perusteella voidaan arvioida prosessin suorituskykyä ja energiankulutusta. Vesiabsorption soveltuessa parhaiten korkean hiilidioksidipitoisuuden kohteisiin, on se valittu vaihtoehtoiseksi teknologiaksi meesauuneille. Aikaisemmissa tutkimuksissa talteenoton hyötysuhde on ollut välillä 60–70 %, joten prosessin vuotuiseksi talteenottokapasiteetiksi oletetaan maksimissaan 65 % tulosten perustuessa vain pienen mittakaavan demonstraatioihin. Imatran tehtailla meesauuneilla ei partikkelien poiston lisäksi ole muuta puhdistusta, mikä vesiabsorption tapauksessa voi vaatia rikin poiston ennen kaasujen erotusta.

Kuorikattilalle harkittavia teknologioita ovat amiineihin ja suoloihin perustuva liuotinerotus sekä vesiabsorptio. Savukaasujen muita lähteitä korkeampi rikkipitoisuus voi kuitenkin johtaa kompromissiin savukaasujen puhdistuksen ja talteenottoteknologian valinnan suhteen. Aiemman tutkimuksen (Onarheim et al., 2017) mukaisesti hyväksytään amiinien tapauksessa absorbentin suurempi kulutus rikinpoistojärjestelmään investoimisen sijaan, kun taas suolojen tapauksessa rikin ja typen oksidit eivät ole ongelmallisia. Vesiabsorptiossa rikinpoistosta ei voida tinkiä, eikä muiden epäpuhtauksien vaikutuksesta vesiabsorptioon myöskään ole tarkempaa tutkimusta, minkä takia vaihtoehto rajattiin pois kuorikattilan kohdalla ja ensisijaiseksi teknologiaksi on valittu amiinit.

Toiseksi vaihtoehdoksi kuorikattilalle on valittu kuumaan kaliumkarbonaattiin pohjautuva erotus, jossa savukaasujen epäpuhtaudet eivät aiheuta ongelmia rikki- ja typpiyhdisteiden muodostaessa vakaita suoloja reagoidessaan absorbentin kanssa. Desorptiovaihe ei myöskään vaadi höyryä, vaan erotus voidaan toteuttaa kokonaan sähköllä. Suoloihin ja emäksiin pohjautuvista ratkaisuista myös Saipemin entsyymillä tehostettu kaliumkarbonaattipohjainen erotus voi osoittautua Skutskärin demonstraation myötä varteenotettavaksi vaihtoehdoksi Imatran tehtaille. Entsyymillä tehostetun kaliumkarbonaatin desorptio oletetaan

olevan mahdollista toteuttaa kokonaisuudessaan sekundäärilämmöllä, eikä siten vaikuttavan tehtaan höyrytaseeseen. Yhtiön julkaisun mukaan lämpöenergiantarve olisi vajaa 700 kWh/tCO_2, mikä on verrattavissa amiinien kulutukseen. Prosessin sähköenergiantarpeesta ja talteenottokapasiteetista suuressa mittakaavassa ei ole saatavilla tietoa, minkä takia kyseinen teknologia on kuitenkin jätetty pois vertailusta.

Taulukko 4. Valittujen talteenottoteknologioiden kulutustiedot. (IEAGHG, 2019), (CO2 Capsol, 2022), (Teir et al., 2014)

	Sähkönkulutus [kWh/tCO_2]	Höyrynkulutus [kWh/tCO_2]
Amiinit	22	778
HPC	278	0
PSA	665	0
Vesiabsorptio	350	0

Taulukossa 4 on esitetty aikaisempiin tutkimuksiin sekä demonstraatioihin perustuvat arviot valittujen teknologioiden energiankulutuksesta. Taulukon arvot eivät kuitenkaan huomioi mahdollista tuotekaasun puhdistusta ja paineistusta. Mikäli hiilidioksidia myydään tehtaan ulkopuolelle, tulee tasetarkastelun tuloksiin lisätä kuljetuksen ja välivarastoinnin vaatima paineistuksen ja mahdollisen nesteytyksen energiankulutus. Aspelund et al. (2007) tutkimuksen mukaisesti nesteytyksen tuoma lisäenergiantarve on noin 100 kWh/tCO_2 kaasun lähtöpaineesta riippuen.

Tuotekaasun puhtaus

Useimpien talteenottoteknologioiden tuotekaasun hiilidioksidipitoisuus yltää yli 95 prosenttiin, minkä oletetaan tässä työssä olevan riittävä myyntiä ja kuljetusta varten. PSA-teknologian kohdalla yksi vaihtoehto on valita yksisyklinen prosessi, jolla tuotekaasun puhtaus jää lähemmäs 80 %:a, mikä laskee laitoksen investointikustannuksia mutta tällöin kaasulle ei välttämättä löytyisi kysyntää tehtaan ulkopuolelta. Epäpuhtauksien suhteen merkittävin puhdistustarve liittyy rikkiyhdisteisiin, joiden poisto voidaan toteuttaa esimerkiksi vesipesurilla. Muita puhdistusjärjestelmiä tulee harkita tarkemmin hiilidioksidin käyttökohteen mukaan.

Hiilidioksidin hyödyntämiskohteet

Tasetarkasteluun on valittu osiossa 4.1 esitellyt metsäteollisuuden hyödyntämiskohteet, joiden kulutustiedot on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Hiilidioksidin käyttökohteiden kulutustiedot.

	CO_2 kulutus [$kgCO_2$ / ADt]	Vaikutukset muuhun tuotantoon
Ruskean massan pesu ja valkaisu	4	
Kartonki- ja kuivauskoneet	2	
Mäntyöljyn valmistus	3	Haihduttamon lisäkuorma
Ligniinin erotus	23	Sähkönkulutus: 80 $kWh/t_{ligniini}$ Kuivauksen lämpöteho: 30 kW
Jätevesien käsittely	3,8	

Imatran tehtailla ei nykyisellään käytetä hiilidioksidia ruskean massan pesun ja valkaisun lisäksi muualla, minkä takia kuitulinjoja lukuun ottamatta kulutusarvot perustuvat lähdekirjallisuudessa esitettyihin arvioihin. Ligniinin tuotannon osalta huomioidaan erotuslaitteiston tuoma lisä sähkönkulutukseen (Kuparinen, 2019). Kuivaukseen vaadittava lämpö oletetaan laskennassa katettavan pääasiassa ylimääräisellä sekundäärilämmöllä esimerkiksi soodakattiloiden savukaasupesureilta, eikä sen siten katsota vaikuttavan höyrytaseeseen. Merkittävin vaikutus ligniinin erotuksen seurauksena on soodakattilan höyryntuotannon aleneminen, mikä Imatran tehtaiden kohdalla olisi korkean höyryn käytön vuoksi nykyisellään epäedullista. Laskennassa sähköntuotannon laskua ei kuitenkaan huomioida tämän työn pääpainoin ollessa hiilidioksidin talteenoton mahdollisuuksien sekä hyödyntämiskohteiden kartoittamisessa.

Muiden hyödyntämiskohteiden ei oleteta vaikuttavan merkittävästi tehtaan sähkö- ja höyrytaseisiin. Uusien prosessien myötä lisäkuormaa syntyy talousveden kulutukseen, haihduttamoille sekä jätevesien käsittelyyn. Kirjallisuuskatsauksen perusteella määrät oletetaan kuitenkin vähäisiksi tehtaan mittakaavassa eikä niiden oleteta vaikuttavan merkittävästi tuotantoon.

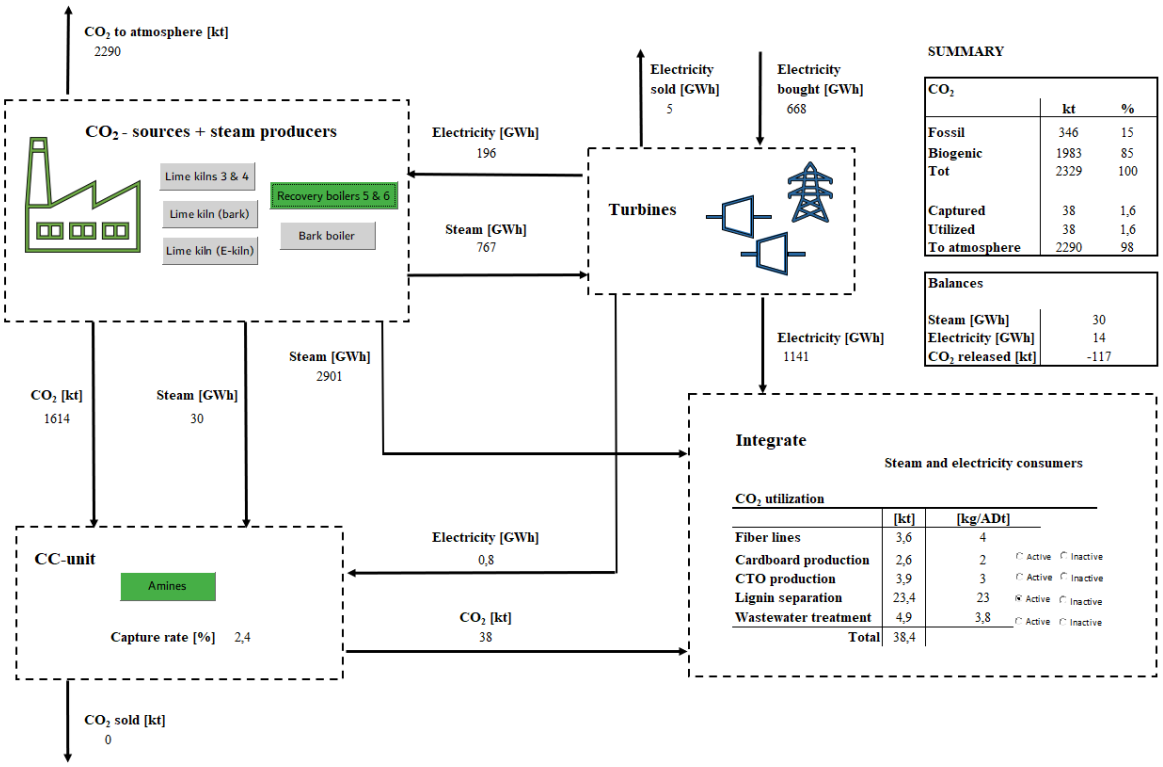
Kaikki esitellyt konseptit hiilidioksidin suorasta hyödyntämisestä metsäteollisuudessa olisivat potentiaalisia ja teknisesti hyödynnettävissä Imatran tehtailla. Ligniinin erotus on selkeästi suurin hiilidioksidin kuluttaja, mutta prosessin vaikuttaessa merkittävästi myös tehtaan muuhun kulutukseen ja erityisesti höyryntuotantoon, tulee hyödyntämiskohdetta tarkastella varauksella. Laskentatyökalussa talteenotosta ylijäävän hiilidioksidin talteenottokapasiteetin määrittämänä oletetaan menevän kokonaisuudessaan myyntiin mutta käyttökohteisiin ja määriin ei oteta kantaa.

6.3 Tarkasteltavat skenaariot

Tarkasteltaviksi skenaarioiksi työhön on valittu kolme erilaista tilannetta talteen otettavan, hyödynnettävän ja myytävän hiilidioksidin määrän suhteen. Ensimmäisessä skenaariossa tutkitaan tilannetta, jossa tehtaalla oletetaan olevan käytössä kaikki esitellyt metsäteollisuuden hyödyntämiskohteet, joiden kulutus määrää myös hiilidioksidin talteenottokapasiteetin. Toisessa skenaariossa tutkitaan tilannetta, jossa talteenottokapasiteetti pyritään maksimoimaan, mutta tehtaan käytöstä ylijäävän hiilidioksidin myynti rajoittuu nykyisiin hiilidioksidimarkkinoihin sekä kuljetus- ja varastointi-infrastruktuuriin. Kolmannessa skenaariossa pohditaan tilannetta kaksi näkökulmasta, jossa logistiikka ei ole esteenä laajemman mittakaavan talteenotolle ja myynnille.

6.3.1 Skenaario 1: Talteenotto tehtaiden hyödyntämiskohteiden tarpeisiin

Kuvassa 9 on esitettynä skenaario yksi ja valittuna päästölähteenä soodakattilat. Tilanteessa hiilidioksidia saataisiin hyödynnettyä 38 kilotonnia vuodessa, mikä vastaa noin 2,4 % soodakattilan päästöistä ja alle 2 % tehtaan kokonaispäästöistä. Talteenottoteknologian ja valittujen hyödyntämiskohteiden tuoma lisä höyrynkulutukseen on 30 GWh ja sähkönkulutukseen 14 GWh. Suurin osa kasvaneesta energiantarpeesta liittyy talteenottolaitteiston kulutukseen.



Kuva 9. Skenaario 1.

Skenaariossa talteenottokapasiteetti määräytyy hyödyntämiskohteiden mukaan mutta päästölähde ja erotusteknologia on käyttäjän valittavissa. Taulukossa 6 on esitetty tasemuutokset eri päästölähteiden ja talteenottoteknologioiden tapauksissa.

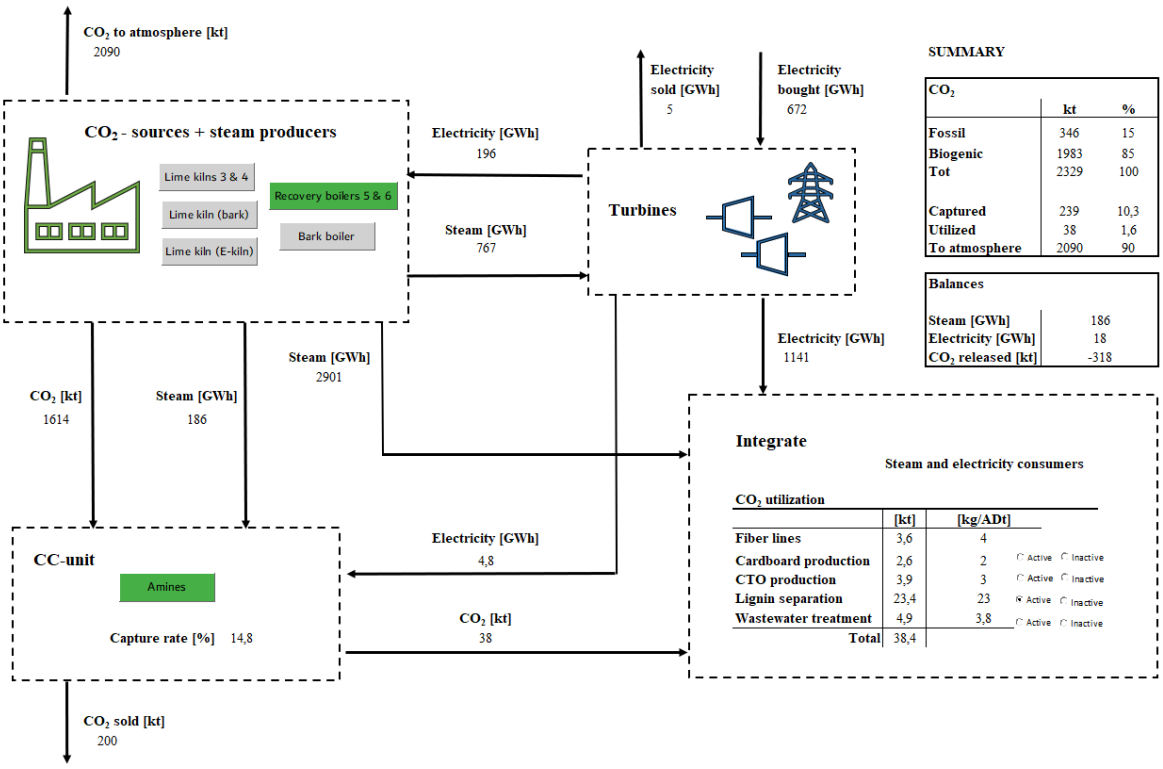
Taulukko 6. Tasemuutokset eri päästölähteiden ja talteenottoteknologioiden tapauksessa.

	Teknologia	Höyry [GWh] (vuotuinen muutos)	Sähkö [GWh] (vuotuinen muutos)	CO_2 ympäristöön
Soodakattilat	Amiinit	30	14	-117
Meesauunit	PSA	0	38	-117
	Vesiabsorptio	0	26	-117
Meesauuni (kaasutettu kuori)	PSA	70	70	150
	Vesiabsorptio	70	58	150
Sähköinen meesauuni	Suora talteenotto	0	321	-189
Kuorikattila	Amiinit	30	14	-117
	HPC	0	24	-117

6.3.2 Skenaario 2: Maksimitalteenottokapasiteetti, nykyinen kuljetus- ja varastointikapasiteetti

Skenaariossa 2 hiilidioksidin talteenottoa ei ole rajoitettu vain integraatin omiin käyttökohteisiin, vaan talteenottokapasiteettia on kasvatettu myös kaasun myyntiä silmällä pitäen. Rajoittavaksi tekijäksi skenaariossa 2 on asetettu tehtaan nykyiset kuljetus- ja varastointimahdollisuudet. Varastoinnin osalta oletetaan tehtaiden nykyisen hiilidioksidisäiliön kapasiteetti. Kuljetuksen osalta arvioidaan kirjallisuuslähteisiin perustuen nykyisten

kuljetusvaihtoehtojen maksimisiirtokapasiteetiksi 200 kt. Skenaarion 2 tase, kun päästölähteeksi on valittu soodakattilat, on esitetty kuvassa 10.

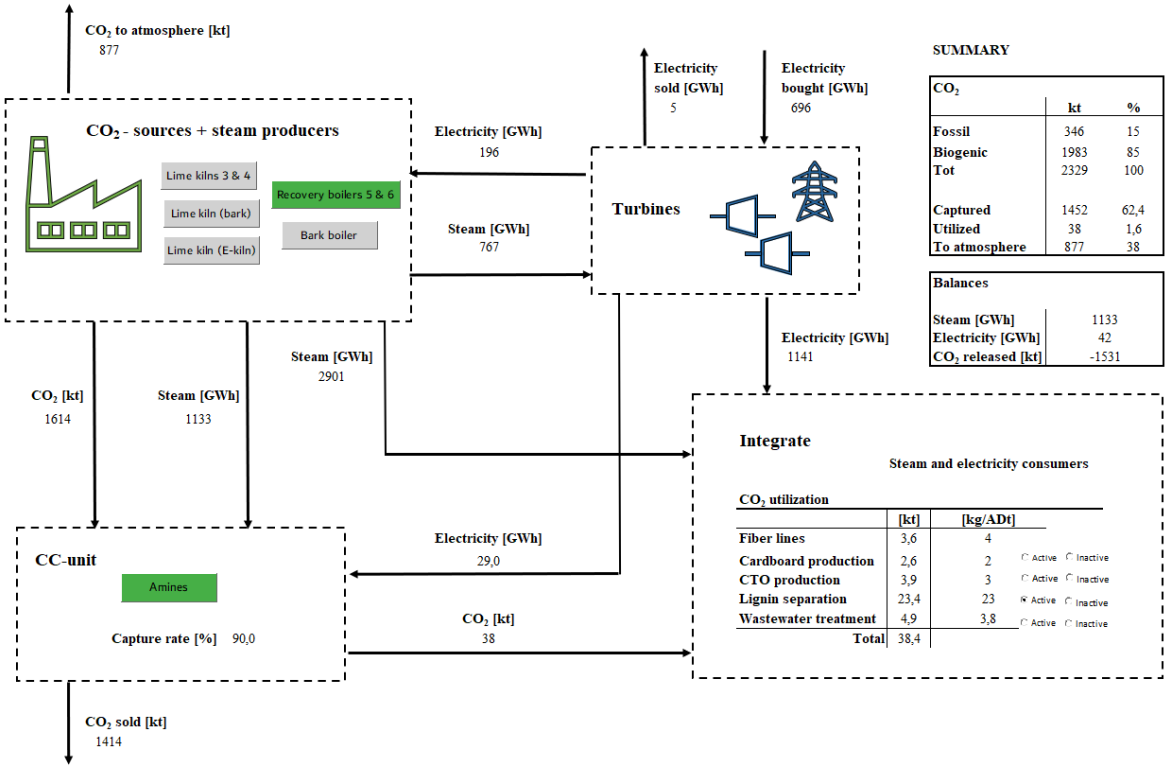


Kuva 10. Skenaario 2.

Hiilidioksidin myynnin tuoma lisä nostaa talteenoton kapasiteetin lähes 15 %:iin. Energiankulutuksen osalta huomattava ero suhteessa skenaarioon 1 tapahtuu höyryntarpeessa, joka moninkertaistuu kasvaneen talteenoton myötä. Vaikka sähkönkulutuksen kasvu on huomattavasti maltillisempi, tulee kuvan 10 taseen lisäksi huomioida kaasun mahdollinen nesteytys. Imatran tehtaiden tapauksessa nykyiset hiilidioksidin kuljetusvaihtoehdot sekä välivarastointi vaativat nesteytyksen, mikä nostaisi vuotuista sähköenergiankulutusta edelleen 20 GWh.

6.3.3 Skenaario 3: Maksimitalteenottokapasiteetti, täysi kuljetus- ja varastointikapasiteetti

Kolmannessa skenaariossa kuljetus- ja varastointikapasiteetin oletetaan pystyvän vastaamaan tehtaiden maksimaaliseen talteenottopotentiaaliin. Kuvassa 11 on esitetty skenaarion 3 tilanne, jossa ainoa talteenottoa rajoittava tekijä on erotuslaitteiston hyötysuhde.



Kuva 11. Skenaario 3.

Talteenottokapasiteetti on pyritty maksimoimaan valitsemalla päästölähteeksi soodakattilat ja olettamalla amiinien maksimitalteenottokapasiteetiksi 90 %. Tällöin talteen otetun hiilidioksidin määrä nousee lähes 1500 kilotonniin ja tehtaan kokonaistalteenottokapasiteetiksi saadaan yli 60 %. Talteenottokapasiteetin kasvun myötä nousevat erotuslaitteiston vaatima höyryn ja sähkönkulutus monikymmenkertaisesti.

Tehtaan sisäistä puskurivarastoa saattaa olla tarvetta kasvattaa mutta välivarastointi suuremmassa mittakaavassa oletetaan mahdolliseksi esimerkiksi alueellisissa yhteisvarastoissa. Pääasialliseksi kuljetusmuodoksi oletetaan putkikuljetus, jolloin nesteytys ei ole välttämätöntä ja paineistuksen energiantarve on pienempi verrattuna nykyisiin kuljetusmuotoihin. Jos oletetaan putkiverkoston ulottuvan useamman sadan kilometrin matkalle Kaakkois-Suomen alueella, tulee kuljetus kuitenkin toteuttaa vähintään 85 barin paineessa yksifaasisen virtauksen varmistamiseksi. Muut kuljetusmuodot ja varastointi oletetaan vaativan nesteytyksen mutta määriin ja jakaumaan ei tässä työssä oteta kantaa.

6.4 Tulosten tarkastelu

6.4.1 Skenaario 1

Tehtaan tasetarkastelu asetettiin tässä työssä ensisijaisesti tehtaalla teknisesti hyödynnettävissä olevan hiilidioksidin käyttökohteiden kulutuksen ohjaamaksi. Skenaarion 1 tulosten perusteella käyttökohteiden tarjoama hyödyntämiskapasiteetti on prosentuaalinen suhteessa savukaasuissa tarjolla olevaan hiilidioksidiin. Arvioitujen kulutusarvojen mukaan tehtaalla voitaisiin hyödyntää vuodessa maksimissaan vajaa 40 kt hiilidioksidia, mikä suhteutettuna koko tehtaan vuotuisiin päästöihin on alle kaksi prosenttia. Merkittävin yksittäinen käyttökohde on ligniinin erotus sen vastatessa suurimmasta osasta koko tehtaan hyödyntämispotentiaalia. Ilman ligniinin erotusta hyödyntämiskapasiteetti olisi vain noin 0,6 % tehtaan kokonaispäästöistä.

Hyödyntämiskohteiden vaikutus muihin taseisiin oletettiin vähäiseksi suhteessa tehtaan muuhun kulutukseen lukuun ottamatta ligniinin erotusta. Ligniinin erotus arvioidulla kulutuksella lisää sähkön tarvetta noin 10,4 GWh vuodessa sekä nostaa haihduttamojen kuormaa. Myös suovan esipalstoitus nostaa haihdutustarvetta. Haihduttamojen lisäkuorman ei kuitenkaan oleteta vaativan haihdutuksen kapasiteetin nostoa (Kuparinen, 2019).

Skenaarion 1 tuloksista nähdään erotuslaitteiston ja hiilidioksidin hyödyntämiskohteiden vaikutukset tehtaan höyry- ja sähkötaseeseen. Amiineihin perustuvan talteenoton tapauksessa höyrynkulutus kasvaisi 30 GWh, mikä vastaa noin 0,8 % koko tehtaan vuotuisesta kulutuksesta. Vaikka määrä ei vuositasolla näyttäydy merkittävänä, voi kulutus silti aiheuttaa haasteita päivätasolla etenkin talviaikaan. Kun huomioidaan, että höyrystä on harvoin ylitarjontaa, jouduttaisiin hiilidioksidin erotuksesta tinkimään, mikä edelleen vaatisi joustavuutta erotuslaitteiston ajettavuudessa. Suuremman talteenottokapasiteetin skenaariossa korostuu höyryntarve yhä selkeämmin myös vuositasolla, jolloin vuotuinen kulutus vastaisi 30 % koko tehtaan kulutuksesta.

Kuorikattilalle valitulla HPC-teknologialla höyryä ei tarvita lainkaan, joten vain sähkönkulutus kasvaa. Myöskään meesauunien tapauksessa hiilidioksidin erotus ei tarvitse höyryä mutta kaasutetun kuoren poltossa kuoren kuivauksen vaatima lämpö on oletettu katettavaksi kokonaan primäärihöyryllä, mikä nostaa vuotuista höyrynkulutusta 70 GWh. Lisäksi kuoren

polttoon vaaditut esikäsittelyprosessit kasvattavat sähkönkulutusta yli 30 GWh, minkä takia tase-ero on huomattavasti suurempi kuin nykyisten meesauunien tapauksessa. Meesauuneja vertailtaessa tulee huomioida kaasutettua kuorta polttavalle uunille arvioitu suurempi tuotantokapasiteetti, jonka mukaan myös kuoren esikäsittelylaitteistojen energiankulutus on määritetty.

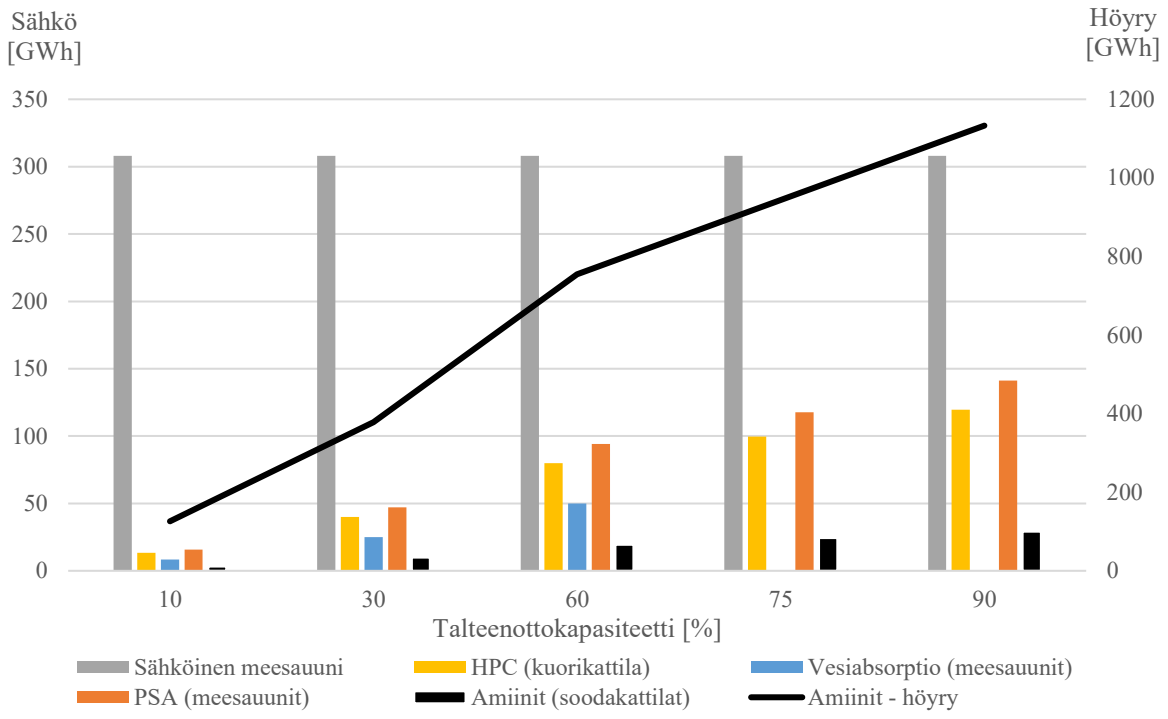
Meesauunien tapauksessa tehtaan sähkönkulutuksen kasvusta yli 60 % koostuu hiilidioksidin talteenotosta PSA-teknologialla ja loput ligniinin erotuksesta. Vesiabsorption sähköenergiantarve on PSA-teknologiaa matalampi ja sähkönkulutuksen kasvu jakautuu lähes tasan talteenottoprosessin ja ligniinin erotuslaitteiston kesken. Vaikka sähkötaseiden osalta muutos on suuri verrattaessa amiineihin, erottuvat sähköiset vaihtoehdot edukseen höyrynkulutuksen suhteen. Erityisesti sähköisten vaihtoehtojen edut korostuvat, jos kuoren polttoon päädyttäisiin riippumatta siitä, harkitaanko hiilidioksidin talteenottoa vai ei. Lisäksi kaasutetun kuoren tapauksessa esikäsittelyn primäärihöyryn tarvetta voidaan vähentää hyödyntämällä tehtaan sekundäärilämpöä.

Suurin muutos sähkötaseeseen syntyy sähköisen meesauunin tapauksessa, jolloin vuotuinen kasvu olisi yli 300 GWh. Huomattavaa kuitenkin on, että energiantarve muodostuu tässä suurimmaksi osaksi uunin ominaiskulutuksesta hiilidioksidin talteenoton ollessa mahdollista ilman erillistä erotusteknologiaa. Mikäli uuni on kokonaan sähkölämmitteinen, syntyy säästöä myös polttoaineeseen ja sen mahdolliseen esikäsittelyyn liittyvissä kuluissa. Sähköisen uunin käyttökulut mukaan lukien talteenotto olisi siis vahvasti riippuvaisia sähkön hinnasta, jonka näkökulmasta kannattavuutta tulisi erityisesti arvioida.

Kuorikattilan tapauksessa erotusteknologian sähkönkulutus ja siten myös koko talteenoton energiantarve on vaihtoehdoista matalin. Epävarmuutta kuorikattilan tapauksessa luovat kuitenkin savukaasujen epäpuhtaudet, jotka saattavat päätyä tuotekaasun sekaan. Mikäli tuotekaasun puhdistustarve olisi korkea, tulisivat jälkikäsittelyprosessit lisäämään talteenoton investointi- sekä käyttökustannuksia. Teknologia on joka tapauksessa kiinnostava vaihtoehto matalan energiatarpeensa takia ja voi osoittautua kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi Imatran tehtaille Stockholm Exergiin hankkeen kehityksen myötä.

6.4.2 Skenaariot 2 ja 3

Skenaarioissa 2 ja 3 talteen otetun hiilidioksidin määrä pyrittiin maksimoimaan, minkä takia päästölähteeksi oli valittu vain soodakattilat. Amiinipohjaisen erotuksen suuren energiankulutuksen valossa kannattaa vertailua kuitenkin laajentaa myös muihin pistelähteisiin. Kuvassa 12 on havainnollistettu talteenottoteknologioiden energiankulutusta päästölähteittäin talteenottokapasiteetin kasvaessa.



Kuva 12. Talteenottoteknologioiden energiankulutus talteenottokapasiteetin suhteen.

Mikäli talteenottokapasiteettia halutaan kasvattaa mutta maksimimäärästä ollaan valmiita tinkimään, tarjoavat myös muut päästölähteet soodakattiloiden rinnalla taloudellisesti varteenotettavan vertailukohdan. Vaikka hiilidioksidin talteenoton sähkönkulutus soodakattiloilla on suurellakin talteenottokapasiteetilla maltillinen verrattuna muihin lähteisiin, laskee laitteiston suuri höyrynkulutus erotuksen kannattavuutta. Soodakattiloiden jälkeen suurin talteenottokapasiteetti on saavutettavissa adsorptioon perustuvalla erotuksella meesauuneilla ja HPC-teknologialla kuorikattilalla. Teknologioille on arvioitu 90 %:n talteenoton hyötysuhde, jolloin tehtaan kokonaispäästöistä saataisiin talteen 18 % kuorta polttavan meesauunin ja kuorikattilan tapauksessa sekä 9 % nykyisten uunien tapauksessa. Vaikka määrä on prosentuaalisesti huomattavasti pienempi verrattuna soodakattiloihin, jäisi hiilidioksidia metsäteollisuuden käyttökohteiden lisäksi myytäväksi satoja kilotonneja. Meesauuneille

valitulla vesiabsorptiolla talteenoton 65 prosentin maksimihyötysuhde rajoittaa tehtaan kokonaistalteenottoasteen vain 7 ja 13 prosenttiin mutta myytäväksi jää tällöinkin yli 100 kt hiilidioksidia molemmissa tapauksissa.

Kasvatettaessa talteenottokapasiteettia kasvaa myös sähköisen meesauunin kannattavuus sähkönkulutuksen ollessa riippumaton talteenotosta. Sähköisen meesauunin talteenoton hyötysuhde oletetaan olevan 90 %, mutta päästöjen ollessa pienemmät verrattuna uunien nykyisiin päästöihin on myös kokonaistalteenottoaste pienempi. Sähköisen kalkintuotannon ollessa kuitenkin vielä hyvin varhaisessa kehitysvaiheessa näyttäytyvät muut sähköiset teknologiavaihtoehdot otollisemmilta lähitulevaisuudessa.

6.4.3 Prosessien ja ajotavan optimointi

Hiilidioksidin eri talteenotto- ja hyödyntämisvaihtoehtojen kannattavuus on vahvasti riippuvainen sähkön hinnasta. Sähkön pörssihinnan kasvu vaikuttaa suoraan erotuslaitteiston käyttökustannuksiin. Amiinien tapauksessa höyrynkulutus voi aiheuttaa myös sähköntuotannonmenetyksiä, mikäli erotukseen käytettävä höyry voitaisiin muuten hyödyntää turbiineilla. Ajotavan optimoinnilla voidaan pyrkiä ottamaan hiilidioksidia talteen sähkön hinnan ollessa matala ja korkealla hinnalla tuottaa höyryllä sähköä. Riippumatta erotusteknologiasta tulee ajotavan optimoinnissa varmistaa hiilidioksidin tuotanto tehtaan kulutukseen ja myyntiin riittävän puskurivaraston avulla.

Talteenoton kannattavuutta erotuslaitteiston ajoa optimoimalla on korostettu myös aikaisemmissa tutkimuksissa. Yleisesti pelkästään sähköä hyödyntävät, pienemmän kokoluokan erotuslaitteistot tarjoavat paremmin säätövaraa niiden mahdollistaessa nopeat ylös- ja alasajot. Höyryä hyödyntävään liuotinerotukseen on ehdotettu ratkaisuksi liuottimen hyödyntämistä puskurivarastona, mikä mahdollistaisi absorption savukaasuista desorptiovaiheen ollessa pysähdyksissä samanaikaisesti. Suuremmassa mittaluokassa laitetoimittajat kuitenkin suosittelevat pääsääntöisesti jatkuvaa tuotantoa talteenoton maksimoimiseksi.

Sähkön ja höyrynkulutuksen optimoinnin lisäksi kustannussäästöjä voidaan saavuttaa sekundäärilämmön hyödyntämisellä. Sekä ligniinin että meesauunilla poltettavan kuoren kuivauksen lisäksi osassa erotusteknologioista, kuten HPC-teknologiassa sekä entsyymitehosteisessa liuotinerotuksessa, desorptiossa vaadittava lämpö voidaan kattaa osin tai jopa

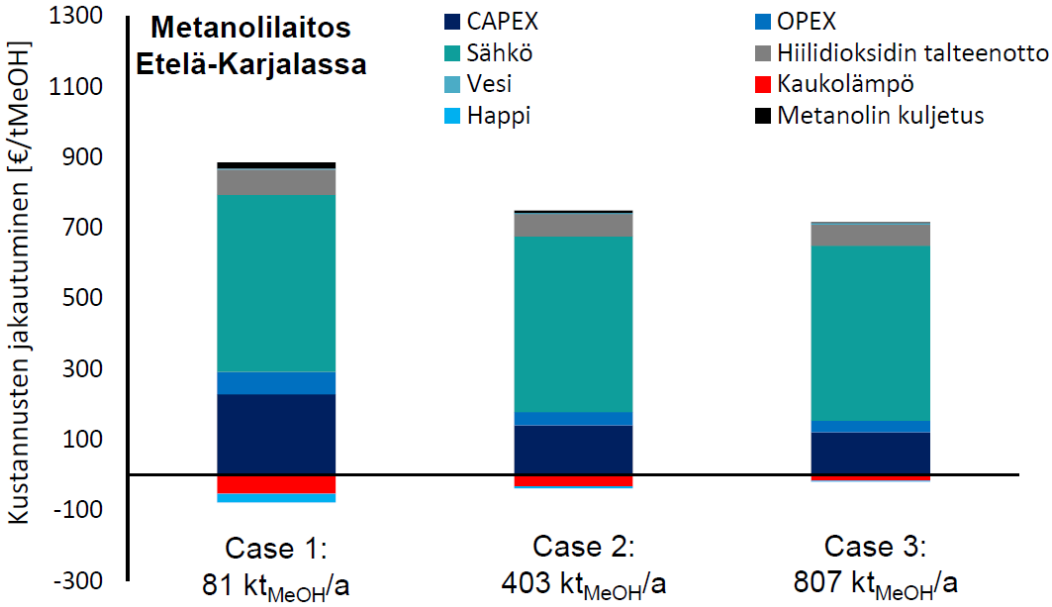
kokonaan hukkalämmöllä. Imatran tehtailla saatavilla on useita kymmeniä gigawattitunteja hukkalämpöä, joka olisi johdettavissa helposti hyödynnettäväksi soodakattiloiden savukaasupesureilta.

6.4.4 Hiilidioksidin jatkojalostaminen

Talteenottokapasiteettia kasvatettaessa tulee tehtaan hyödyntämiskohteista ylijäävä hiilidioksidi myydä tai jatkojalostaa tehtaalla. Maksimi talteenottokapasiteetilla hiilidioksidista jää myyntiä tai jatkojalostusta varten noin 1400 kt. Skenaariossa 2 oletettiin kuljetuksen ja varastoinnin osalta nykyinen kapasiteetti, mikä ei mahdollista myyntiä varten merkittävää joustovaraa. Vaikka kaikelle ylijäämähiilidioksidille olisi tarpeeksi ostajia, ei nykyisten kuljetusmahdollisuuksien valossa pystyttäisi todennäköisesti toimittamaan edes puolia tarjolla olevasta määrästä. Myöskään nykyinen varastokapasiteetti ei todennäköisesti tarjoaisi riittävää puskurivarastoa sekä tehtaan omiin että myynnin tarpeisiin.

Hiilidioksidin myyntimahdollisuuksien ollessa rajoittuneet jää vaihtoehdoksi jalostaa kaasu tehtaalla myytäväksi tuotteeksi. Kannattavimpina tuotevaihtoehtoina näyttäytyvät synteettiset polttoaineet tai kemikaalit, joista monien tutkimusten perusteella metanoli erottuu selvästi muista korkean hintansa ansiosta. Tuotteiden kuljetusta ajatellen metaanin valmistus tarjoaisi varteenotettavan vaihtoehdon Etelä-Suomen maakaasuverkon ulottuessa myös Imatralle. Metaanin matalamman hinnan takia kuljetuksen helppous ei välttämättä tarjoa merkittävää kilpailuetua metanoliin, jonka kuljetus ja varastointi ovat myös suhteellisen halpaa ja teknisesti helppoa.

E-metanolin valmistusta sellu- ja paperitehtailla on mallinnettu aikaisemmissa tutkimuksissa. Jatkojalostus nähdään houkuttelevana vaihtoehtoina erityisesti niillä sellutehtailla, jotka tuottavat sähköä reilusti yli oman tarpeen. Karjunen et al. (2023) tutkimuksessa on kuitenkin todettu, että metanolin valmistus voisi olla kannattavaa myös paperia ja kartonkia tuottavassa tehdasintegraatissa jopa nykyisellään tietyillä sähkön hinnoilla. Energiankulutukseen liittyvissä kuluissa merkittävin osuus on vedyn tuotannolla, joka muodostaa suurimman osan tuotannon kokonaiskustannuksista, kuten esimerkiksi Lipiäisen (2024) tutkimuksessa on todettu.



Kuva 13. Kustannusten jakautuminen metanolin tuotannossa. (Lipiäinen, 2024.)

Laaksosen (2022) työssä metanolin tuotantoa on mallinnettu Imatran tehtailla olettamalla käytettävissä olevaksi hiilidioksidin määräksi tehtaiden kokonaispäästöt eli vajaa 2,1 Mt, jolloin vastaava metanolin saanto olisi 1,5 Mt. Vastaavaksi elektrolyysin ja synteesiprosessin sähköenergian tarpeeksi on arvioitu 17 TWh/a, mikä on moninkertainen määrä suhteessa koko tehtaiden nykyiseen sähkönkulutukseen. Lisäksi vedyn tuotanto kasvattaa tehtaan vuotuista veden kulutusta noin 2550 kt, mikä edelleen tuo lisäkuormaa vedenpuhdistamolle. Käytännössä metanolin tuotantopotentiaali ja siten myös tasemuutokset ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä, kun oletetaan järkevästi talteen otettavan hiilidioksidin maksimimäärän olevan skenaarion 3 mukaisesti lähes puolet pienempi, noin 1,4 Mt, kuin Laaksosen työssä.

Synteettiselle metanolille löytyy kysyntää jo nykyisellään Kaakkois-Suomesta ja esimerkiksi vuodessa noin 50 000 tonnia metanolia käyttävä Bakelite Oy olisi potentiaalinen ostaja. Metanolin kysynnän kannalta etuna ovat useat käyttökohteet polttoaineiden sekä kemikaalien tuotannossa. Myynnin lisäksi metanolia voidaan hyödyntää myös tehtaan sisällä esimerkiksi klooridioksidin valmistuksessa. Imatran tehtailla metanolin kulutus on kuitenkin vain muutaman tonnin luokkaa, joten valmistus vain omaan käyttöön ei todennäköisesti olisi kannattavaa.

Synteettisten polttoaineiden sijaan mahdollinen jatkojalostusvaihtoehto olisi olefiinien tuotanto ja myynti muoviteollisuuteen. Yhteistyö Borealiksen kanssa tarjoaisi mahdollisuuden

kasvattaa kotimaisen muovituotannon ja siten myös Imatran tehtailla päällystemateriaalina käytettävän polyeteenin kotimaisuusastetta. Olefiinien tuotanto F-T-prosessilla ei ole teknisesti kuitenkaan yhtä tunnettua kuin metanolin valmistus, joten todellista kulutusta ja kannattavuutta on toistaiseksi hankala arvioida. Lisäksi haasteeksi voi muodostua lopputuotteen rajalliset markkinat Suomessa, minkä takia mahdollisia ostajia olisi hyvä kartoittaa myös ulkomailta.

Lopputuotteiden lisäksi PtX-prosesseissa syntyy sivutuotteena happea ja lämpöä, jotka voidaan hyödyntää tehtaan omissa prosesseissa kuten esimerkiksi sellun valkaisussa kuitulinjoilla. Aiemmassa tutkimuksessa (Karjunen et al., 2023) on arvioitu, että vesielektrolyysissä syntyvällä hapella olisi mahdollista korvata jopa koko sellutehtaan hapen tarve. Laaksosen työssä happea on arvioitu syntyvän 302 098 kg/h, jolloin vuotuinen tuotanto ylittäisi Imatran tehtaiden kulutuksen moninkertaisesti. Toisaalta happea voitaisiin myös hyödyntää palamisilman seassa esimerkiksi soodakattiloilla, mikä kasvattaa savukaasujen hiilidioksidipitoisuutta ja siten vähentää talteenoton energiankulutusta. Lisäksi elektrolyysissä ja synteesiprosessissa syntyy reilusti hukkalämpöä, joka voitaisiin hyödyntää esimerkiksi hiilidioksidin talteenotossa.

Hiilidioksidin jatkojalostusta harkitessa huomiota tulee kiinnittää erityisesti uusien prosessien tuomaan energiantarpeeseen ja laitteistojen dynaamisuuteen. Ajotavan optimointi sähkön hinnan mukaan vaatii dynaamisten prosessien lisäksi riittävät puskurivarastot vedylle ja hiilidioksidille, mikä edelleen kasvattaa investointi- ja käyttökustannuksia. Vedyn varastointi on myös teknisesti haastavampaa ja kalliimpaa kuin hiilidioksidin ja vaatii hankekohtaista jatkoselvitystä. Lisäksi synteesiprosessi asettaa hiilidioksidille korkeat puhtausvaatimukset, minkä takia talteen otettu hiilidioksidi saattaa vaatia esikäsittelyvaiheita ennen prosessiin syöttöä.

6.4.5 Hiilidioksidin myynti

Skenaariossa 3 kuljetus- ja varastointikapasiteetti oletettiin tarpeeksi suureksi vastaamaan hiilidioksidin täyden talteenottokapasiteetin myynnin vaatimuksia. Mikäli kuljetus olisi mahdollista toteuttaa kokonaan putkiverkoston kautta, nostaisi hiilidioksidin paineistus

vuotuista energiatarvetta noin 126 GWh. Myös välivarastoinnin oletetaan olevan mahdollista tehtaan ulkopuolisissa kohteissa. Mikäli välivarastointi tapahtuisi tehtaalla, vaatisi kaasu nesteytyksen, jolloin paineistuksen energiantarve kasvaisi edelleen ja olisi vuodessa noin 140 GWh. Suuremmat välivarastot on kuitenkin arvioitu tehdaskohtaisia kannattavammiksi sekä lisäävän tuotannon joustavuutta.

Kysyntää hiilidioksidin suoralle käytölle löytyy nykyisellään suhteellisen vähän mutta potentiaalisia ostajia Etelä-Karjalan voisivat olla esimerkiksi kasvihuoneet ja hitsauskaasua hyödyntävät yritykset. Tulevaisuudessa hiilidioksidin suurimmat käyttökohteet tulevat kuitenkin mitä todennäköisimmin keskittymään jatkojalostukseen synteettisiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. PtX - prosesseihin keskittyviä tutkimushankkeita on käynnissä esimerkiksi Borealiksella sekä Nesteellä. Myös kaupalliseen tuotantoon lähivuosina tähtäävät uusiutuvan metaanin tuotantolaitokset Harjavallassa, Lahdessa ja Vantaalla tulevat todennäköisesti nostamaan biogeenisen hiilidioksidin kysyntää mutta ovat sijaintinsa takia haasteellisempia kohteita Imatran tehtaiden näkökulmasta. Nykyisellään hiilidioksidin talteenotto ja jatkojalostus ovat kuitenkin hyvin varhaisessa vaiheessa Suomessa, minkä takia tarkempi ostajien haarukointi on vielä haastavaa. Biogeeniselle hiilidioksidille voi tulevaisuudessa löytyä kysyntää myös kansainvälisiltä markkinoilta, joille Kotkan satama tarjoaa meriyhteyden.

Hiilidioksidin jatkojalostusta talteenoton kanssa samassa kohteessa suhteessa hiilidioksidin kuljettamiseen muualle on vertailtu esimerkiksi Lipiäisen (2024) tutkimuksessa. E-metanolin tuotanto Etelä-Karjalassa todettiin 7-9 % edullisemmaksi kuin hiilidioksidin kuljetus Kotkaan jalostettavaksi sähkön hinnan ollessa sama molemmissa kohteissa. Eroa kustannuksiin tuo metanolin selkeästi hiilidioksidia matalammat kuljetuskustannukset, minkä lisäksi paikallisessa tuotannossa elektrolyysin ja synteesiprosessin hukkalämpöä voidaan hyödyntää talteenotossa. Sähkön hinnalla, paikallisella tuotantokapasiteetilla sekä siirtoverkkojen ominaisuuksilla on kuitenkin suuri merkitys lopputuotteen hintaan. Tutkimuksen mukaan 5-10 €/MWh hintaero voi kääntää tuloksen toisin päin. Mikäli sähköä saadaan tuotettua muualla edullisemmin, kuten Kotkan tapauksessa esimerkiksi merituulivoimalla, voi hiilidioksidin jatkojalostus olla järkevämpää toteuttaa tehtaan ulkopuolella. Toisaalta toimiminen vain hiilidioksidin toimittajana on myös yksinkertaisempaa tehtaalle sijoitettavien yksikköprosessien rajautuessa vain hiilidioksidin talteenottoon ja tuotekaasun esikäsittelyyn.

Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö ovat vahvasti sidoksissa vetytalouskonseptiin, jota myös Kaakkois-Suomeen on mallinnettu Vetyä, virtaa Kaakkoon-hankkeessa. Kaakkois-Suomen potentiaali nähdään ennen kaikkea alueelle keskittyneen metsäteollisuuden biogeenisessä hiilidioksidissa, jonka tuotannosta myös Imatran tehtaat vastaavat suurelta osin. Hankkeessa painotettiin ennen kaikkea uusiutuvan sähköntuotannon sekä siirtoverkkojen kapasiteetin kasvattamista. Myös vedyn ja hiilidioksidin kuljetus- ja välivarastointi-infrastruktuurin nopea kehittäminen arvioitiin välttämättömäksi. Hiilidioksidin putkiverkoston rakentaminen Kaakkois-Suomen alueelle on kallista, mutta valmistuessaan mahdollistaisi talteen otetun hiilidioksidin kustannustehokkaan kuljettamisen useammasta lähteestä sekä tarjoaisi joustovaraa myös paikallisen jatkojalostuksen tapauksessa. Hankkeen yksi tavoitteista oli kehittää alueen toimijoiden, kuten yritysten ja kaupunkien yhteistyötä. Myös Imatran tehtaille alueelle kehittyvä vetytalous tarjoaisi hyvät mahdollisuudet hyödyntää biogeeniset hiilidioksidivaransa ja panostaa alueelliseen yhteistyöhön.

6.4.6 Talteen otetun hiilidioksidin laatuvaatimukset

Tuotekaasun tavoiteltu puhtaus linkittyy vahvasti tavoitteisiin, jotka hiilidioksidin talteenotolle asetetaan. Mikäli hiilidioksidin pääasiallinen käyttökohde on tehtaan sisäiset prosessit, ovat vaatimukset tuotekaasun puhtaudelle metsäteollisuuden integraatin tapauksessa matalat. Jos hiilidioksidi halutaan jatkojalostaa talteenottokohteessa tai myydä, joudutaan mahdollisesti investoimaan ylimääräisiin puhdistus- ja esikäsittelyprosesseihin, jotka nostavat sekä käyttö- että investointikustannuksia. Mikäli hiilidioksidille on käytössä useita hyödyntämiskohteita, voi halutun puhtaustason asettaminen olla haastavaa. Imatran tehtaiden kohdalla hiilidioksidin myynti nykyisellään tulisi todennäköisesti vaatimaan nesteytyksen kuljetusta ja välivarastointia varten, mikä käytännössä asettaa vähimmäisvaatimukset tuotekaasun puhtaudelle.

6.4.7 Hiilidioksidipäästöt

Päästöjen vähentämisen näkökulmasta ei hiilidioksidin hyödyntäminen ainoastaan tehtaan sisäisissä kohteissa tarjoa merkittävää hyötyä. Skenaariossa 1 tehtaan hiilidioksidipäästöt vähenisivät alle prosentilla, kun taas täydellä talteenottokapasiteetilla voitaisiin nykyiset päästöt jopa puolittaa. Ympäristötavoitteiden näkökulmasta tärkeämpää on kuitenkin keskittyä meesauunin tuotannon muuttamiseen fossiilivapaaksi ja hiilidioksidin talteenottoon näissä tapauksissa. Toisin kuin biogeenisen hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen, siirtyminen fossiilivapaaseen tuotantoon tuo myös suoria taloushyötyjä päästöoikeusmaksujen vähentyessä. EU:n päästökauppadirektiiviä ollaan kuitenkin uudistamassa siten, että se huomioisi sekä negatiiviset päästöt että CCU:n kautta saavutetut ympäristöhyödyt, kuten fossiilisten tuotantoketjujen korvaaminen biogeeniseen hiilidioksidiin pohjautuen, vaikka hiilidioksidi vapautuisi lopulta takaisin ilmakehään. ETS-direktiivin uudistuksen myötä taloudellista hyötyä voidaan mahdollisesti saavuttaa myös metsäteollisuuden hyödyntämiskohteista. EU:n nykyinen CCU-ketjuihin liittyvä lainsäädäntö tukee lähinnä liikennesektoria ja sen siirtymistä CCU-pohjaisiin polttoaineisiin. (European Comission, 2024)

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kemiallinen metsäteollisuus on yksi potentiaalisimmista kohteista hiilidioksidin talteenotolle ja hyödyntämiselle Suomessa. Tuotantolaitosten biogeenisten hiilidioksidivarojen hyödyntäminen tarjoaa mahdollisuuden korvata perinteisesti fossiilisiin raaka-aineisiin pohjautuvia tuotantoketjuja kestävillä ratkaisuilla sekä joissain tapauksissa muodostaa jopa negatiivisia päästöjä. Hyödyntämällä talteen otettua hiilidioksidia sellaisenaan sellutehtaat voivat nostaa omavaraisuusastettaan muun muassa kemikaalien kulutuksen osalta. Kaasua jatkojalostamalla metsäteollisuuden yrityksille tarjoutuu puolestaan mahdollisuus kasvattaa tuoteportfoliotaan.

Tässä työssä CCU-hankkeiden potentiaalia tutkittiin Stora Enso Oyj:n Imatran tehtaiden näkökulmasta. Imatran tehdasintegraatin biogeeniset hiilidioksidipäästöt ovat pääasiassa peräisin soodakattiloiden, meesauunien ja kuorikattilan savukaasuista. Hiilidioksidin talteenotto olisi mahdollista toteuttaa kaikissa edellä mainituissa kohteissa kaupallisesti saatavilla teknologiaratkaisuilla. Talteenottokapasiteetiltaan suurin potentiaali on soodakattiloilla, joiden hiilidioksidipäästöt muodostavat yli puolet koko tehtaan päästöistä. Energiankulutuksen näkökulmasta potentiaalisimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui kuitenkin meesauunit, joiden savukaasujen korkea hiilidioksidipitoisuus mahdollistaa talteenoton vähemmän energiaa kuluttavilla, täysin sähköisillä erotusteknologioilla. Meesauunien hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin alle viidesosa soodakattiloiden päästöistä, joten nykyisten teknologiavaihtoehtojen valossa kompromissi olisi tehtävä talteenottokapasiteetin ja energiankulutuksen väliltä. Talteenottoteknologiat kuitenkin kehittyvät jatkuvasti uusien hankkeiden myötä, joten optimaalisimman prosessikokonaisuuden valinnassa tulee huomioida uusimmat teknologiat.

Hiilidioksidin hyödyntämismahdollisuudet määrittävät, kuinka paljon hiilidioksidia voidaan ottaa talteen vaikuttaen siten koko CCU-hankkeen kannattavuuteen. Imatran tehtailta löytyy useita kohteita, joissa hiilidioksidia on teknisesti mahdollista hyödyntää ja saavuttaa säästöjä esimerkiksi rikkihapon kulutuksessa. Metsäteollisuuden kohteet eivät kuitenkaan yksin pysty tarjoamaan riittävän suurta kulutuskohdetta hiilidioksidin talteenotolle suuressa mittakaavassa mutta kysyntää voi löytyä jo nykyisellään muilta aloilta. Kaasun jatkojalostus erityisesti metanoliksi avaa ovia myös suuremmille markkinoille sekä Suomessa että ulkomailla.

CCU-hankkeiden merkittävimpinä haasteina Imatran tehtaiden kohdalla näyttäytyvät uusien laitteistojen suuri energiankulutus sekä hiilidioksidin nykyinen kuljetus- ja varastointi-infrastruktuuri. Täyden mittakaavan hanke nostaisi integraatin sähkön- ja höyrynkulutusta huomattavasti ja vaatisi uusien prosessien ajo-optimointia vastaamaan sähkön hintaheilahteluihin. Suuri energiankulutus sekä uusiutuvan energian saatavuuteen liittyvät rajoitteet ovat merkittävimpiä haasteita myös hiilidioksidin jatkojalostuksen tapauksessa. Kattava hiilidioksidin logistiikkaverkko puolestaan olisi välttämätön tarjoamaan riittävästi joustoa sekä jatkojalostusta että kaasun myyntiä varten. Kuljetuskustannusten ja siirtokapasiteetin valossa hiilidioksidin alueellinen putkiverkosto palvelisi sekä Imatran tehtaita että alan muita toimijoita parhaiten pitkällä aikavälillä.

Kaakkois-Suomen alueelle kehitteillä olevat hankkeet sekä vetytalouteen keskittyneet tutkimukset ovat osoittaneet alueen potentiaalin CCU-hankkeille, mikä voi tulevaisuudessa luoda taloudellisesti houkuttelevia mahdollisuuksia Imatran tehtaille. Mikäli poliittiselta taholta nousisi lähivuosina painostusta tai toisaalta taloudellista tukea hiilidioksidin talteenottoon, olisi tehtailla potentiaalia hankkeelle jo nykyisellään maltillisella kapasiteetilla. Suuressa mittakaavassa talteenottoa tulisi lähteä suunnittelemaan yhdessä jakojalostuksen kanssa. Tässä työssä tehtiin tiettävästi ensimmäistä kertaa tarkempi katsaus CCU:n mahdollisuuksiin Imatran tehtailla, joten jatkotutkimusta tarvitaan tietyiltä osa-alueilta, mikäli hanketta lähdetään viemään eteenpäin. Lisäselvitystä vaadittaisiin erityisesti uusiutuvan vedyn valmistuksen sekä hyödykkeiden ja lopputuotteiden logistiikan osalta.

Lähteet

Alaraudanjoki, J. 2024. CCU Imatran tehtailla. Haastattelu. Julkaisematon.

Aspelund, A., Jordal, K. 2007. Gas conditioning—The interface between CO2 capture and transport. International Journal of Greenhouse gas control. 1:3. 343-354. DOI: 10.1016/S1750-5836(07)00040-0.

Bazzanella, A. M., Ausfelder, F. 2017. Low Carbon Energy and Feedstock for the European Chemical Industry. Germany: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. ISBN: 978-3-89746-196-2.

Brizga, J., Hubacek, K., Feng, K. 2020. The Unintended Side Effects of Bioplastics: Carbon, Land, and Water Footprints. One Earth. 3:1: 45–53. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.06.016

CO2 Capsol. 2022. CO2 Capsol: A Proven, Cost Competitive Carbon Capture Technology. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu: 2.1.2024]

CORDIS. 2021. Providing access to cost-efficient, replicable, safe and flexible CCUS. ACCSESS Project. European Comission. [Verkkosivu]. [Viitattu: 25.1.2024]. Saatavissa: https://cordis.europa.eu/project/id/101022487

Dahiru, A.R., Vuokila, A., Huuhtanen, M. 2022. Recent development in Power-to-X: Part I - A review on techno-economic analysis. Journal of Energy Storage. 56:105861. DOI:10.1016/j.est.2022.105861

European Comission, 2024. Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 11.3.2024]. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2024:62:FIN

EEA. 2024. Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC). 166/2006. [Tilastotietokanta]. [Viitattu: 15.4.2024]. Saatavissa: https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/9405f714-8015-4b5b-a63c-280b82861b3d

Gustafson, K., Sadegf-Vaziri, R., Grönkvist, S., Levihn, F. 2021. BECCS with combined heat and power: assessing the energy penalty. International Journal of Greenhouse Gas Control. 110: 103434. DOI:10.1016/j.ijggc.2021.103434

Heracleous, E., Koidi, V., A. Lappas, A. Hauser. A., Haag, S. 2022. Valorization of steelwork off-gases: Influence of impurities on the performance of Cu-based methanol synthesis catalyst. Chemical Engineering Journal. 444:136571. DOI: 10.1016/j.cej.2022.136571.

IEA. 2022. Global Hydrogen Review 2022. IEA. Paris. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 19.3.2024]. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022

IEA. 2019. Putting CO_2 to Use. IEA. Paris. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 29.2.2024]. Saatavissa: https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use

IEAGHG. 2013. A Brief History of CCS and Current Status. Information Sheets for CCS 2013/16. 2:4. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 10.4.2024]. Saatavissa: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-16_Information_Sheets_for_CCS_All_sheets.pdf

IEAGHG. 2019. Further Assessment of Emerging CO2 Capture Technologies for the Power Sector and their Potential to Reduce Costs. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Saatavissa: https://www.ieaghg.org/publications/technical-reports/reports-list/9-technical-reports/944-2019-09-further-assessment-of-emerging-co2-capture-technologies-for-the-power-sector-and-their-potential-to-reduce-costs

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

Itul, A., Diaz Rincon, A., Eulaerts, O.D., Georgakaki, A., Grabowska, M., Kapetaki, Z., Ince, E., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Shtjefni, D. and Jaxa-Rozen, M. 2023. Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture utilisation and storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and

Markets. Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2023. DOI:10.2760/882666, JRC134999.

Karjunen, H., 2022. Analysis and design of carbon dioxide utilization systems and infrastructures. Väitöskirja. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT. Lappeenranta. ISBN 978-952-335-873-7. Saatavissa: https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-873-7

Karjunen, H., Tynjälä, T., Kuparinen, K., Vakkilainen, E., Joronen, T. 2023. Value creation by converting pulp mill flue gas streams to green fuels. Tappi Journal. 22:3. 193-205.

Katajisto, O. 2020. Calcination of calcium carbonate based materials in electric heated rotary kiln. Tampereen yliopisto. [Opinnäytetyö]. Saatavissa: https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202011047808

Kiviranta, K, Linjala, O. 2023. Hiilidioksidin ja biometaanin potentiaaliset markkinat ja käyttökohteet Keski-Suomessa ja lähialueilla. Hajautettu biometaanin resurssitehokas tuotanto Keski-Suomessa (HABA) -hanke. Loppuraportti. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 2.4.2024]. Saatavissa: https://www.habahanke.fi/wp-content/uploads/2023/10/Hiilidioksidin-ja-biometaanin-potentiaaliset-markkinat-ja-kayttokohteet-Keski-Suomessa-ja-lahialueilla.pdf

Kujanpää, L., Reznichenko, A., Saastamoinen, H., Mäkikouri, S., Soimakallio, S. 2023. Carbon dioxide use and removal - Prospects and policies (No. 19). Publications of the Government´s analysis, assessment and research activities. Prime Minister's Office, Helsinki. ISBN: 978-952-383-197-1. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164795

Kuparinen, K., Vakkilainen, E., Tynjälä, T. 2018. Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (2019) 24:1213–1230.

Kuparinen, K. 2019. Transforming the Chemical Pulp Industry – from an Emitter to a Source of Negative CO2 Emissions. Väitöskirja. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT. Lappeenranta. ISBN 978-952-335-423-4. Saatavissa: https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-423-4

Laaksonen, P. 2024. Vihreä siirtymä avaa ovia Kaakkois-Suomelle. Vetyä, virtaa Kaakkoon - loppuseminaari. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 17.3.2024]. Saatavissa:

https://greenreality.loopy.fi/sites/default/files/2024-03/02%20Vihre%C3%A4%20siirtym%C3%A4%20avaa%20ovia%20Kaakkois-Suomelle%20%E2%80%93%20Petteri%20Laaksonen%2C%20LUT-yliopisto.pdf

Laatikainen, T. 2023. Ministeri Mykkänen T&T:lle: Suomi valmistautuu kieltämään hiilidioksidipäästöt piipunpäästä. Tekniikka & Talous. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 6.2.2024]. Saatavissa: https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/ministeri-mykkanen-ttlle-suomi-valmistautuu-kieltamaan-hiilidioksidipaastot-piipunpaasta/952eec9c-1207-4b09-be3a-ce2630c28791

Linjala, O., Kajolinna, T. 2023. Industrial CO2 supply pathways for CCU-based electrofuel production in Finland. E-Fuel WP2 Task 2.1. Saatavissa: https://cris.vtt.fi/en/publications/industrial-co2-supply-pathways-for-ccu-based-electrofuel-producti

Linjala, O. 2021. Review on Post-Combustion Carbon Capture Technologies and Capture of Biogenic CO2 Using Pilot-Scale Equipment. LUT-yliopisto. [Opinnäytetyö]. Saatavissa: https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe202103046520

Lipiäinen, S. 2024. Paikallisen jalostuksen ja muualle viemisen erot. Vetyä, virtaa Kaakkoon - loppuseminaari. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 25.3.2024]. Saatavissa: https://greenreality.loopy.fi/sites/default/files/2024-03/11%20Paikallisen%20jalostuksen%20ja%20muualle%20viemisen%20erot%20%E2%80%93%20Satu%20Lipi%C3%A4inen%2C%20LUT.pdf

Löfstedt, D.. 2023. Stockholm Exergi advances forward and applies for environmental permit for BECCS facility. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.12.2023]. Saatavissa: https://beccs.se/news/stockholm-exergi-advances-forward-and-applies-for-environmental-permit-for-beccs-facility/

Mäkelä, J. 2019. Meesauunin fossiilivapaat polttoaineet. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. [Opinnäytetyö]. Saatavissa: https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019123049443

Mankonen, A., Kaikko, J., Melin, K., Laari, A., Vakkilainen, E. 2022. Vety-/metanolitalous – Ekosysteemimallinnus, case Puhos. Tutkimusraportti 141. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. ISBN 978-952-335-828-7.

Metsäteollisuus. 2020. Vihreä ja vihreä talous - Metsäteollisuuden ilmastotiekartta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 3.1.2024]. Saatavissa: https://assets-global.website-files.com/5f44f62ce4d302179b465b3a/5fae9c3de86a240e06b76565_Metsa_Esite_Email.pdf

Ollila, T. 2024. Hiilidioksidin käyttö kuitulinjoilla Imatran tehtailla. Haastattelu. Julkaisematon.

Onarheim, K., Santos, S., Kangas, P., Hankalin, V. 2017. Performance and costs of CCS in the pulp and paper industry part 1: Performance of amine-based post-combustion CO_2 capture. International Journal of Greenhouse Gas Control. 59: 58–73. DOI:10.1016/j.ijggc.2017.02.008

Plit, H. 2023. P2X Solutionsin Harjavallan vetylaitos saavutti harjakorkeutensa. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu: 30.3.2024]. Saatavissa: https://p2x.fi/p2x-solutionsin-harjavallan-vetylaitos-saavutti-harjakorkeutensa/

Prowledge. 2023a. KnowPap – Paperinvalmistuksen oppimisympäristö. AEL Oy.

Prowledge. 2023b. KnowPulp – Sellunvalmistuksen oppimisympäristö. AEL Oy.

Ruostemaa, S. 2018. Talteen otetun hiilidioksidin käyttö kemiallisen metsäteollisuuden tuotantolaitoksessa. Aalto-yliopisto. [Opinnäytetyö]. Saatavissa: https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201806012919

SaltX Technology, 2024. The EAC (Electric Arc Calciner) – Realizing the Fossil Free Industrial Transition. [Verkkosivu]. [Viitattu: 5.2.2024]. Saatavissa: https://www.saltxtechnology.com/technology/

Stubb, J, Laine, J. 2024. Linden CC-teknologiaratkaisut. Haastattelu. Julkaisematon.

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A.. 2011. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) – Teknologiakatsaus. 161. VTT Working Papers. VTT. ISBN: 978-951-38-7503-9. Saatavissa: https://publications.vtt.fi/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf

Teir, S., Suomalainen, M., Onarheim, K. 2014. Pre-evaluation of a new process for capture of CO_2 using water. Carbon Capture and Storage Program. Tutkimusraportti. VTT. Saatavissa: https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04035-14.pdf

Alén, R., Andersson, R., Annegren, G., Berg, C-G., Chirat, C., van Dam, J., Danielsson, M., Engelfeldt, A., Engström, J., Fardim, P., Germgård, U., Gustafsson, J., Hostachy, J., Kiero, S., Korpinen, R., Kuusisto, P., Leavitt, A., Liu, Z., Norden, S., Olsson, K., Ovaskainen, K., Paloniemi, J., Pelin, K., Piira, J., Pikka, O., Pohjanvesi, S., Samuelsson, A., Siik, S., Tervola,

P., Tähtinen, M., Vesala, R., Wennesström, M., Willför, S. 2011. Washing, screening and cleaning of pulp. Teoksessa: Fadrim, P. (d). Chemical Pulping. Part 1, Fibre Chemistry and Technology. Papermaking Science and Technology. (Second edition). Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN:978-952-5216-41-7.

Tikka, P., Engdhal, H., Halinen, E., Jaakkola, H., Jäntti, J., Kapanen, J., Kottila, M., Lankinen, M., Laxen, T., Lintunen, T., Nurminen, K., Näsänen, H., Parviainen, K., Toropainen, T., Vakkilainen, E., Arpalahti, O. 2008a. Byproducts of chemical pulping. Teoksessa: Panu, T. (d). Chemical Pulping. Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Papermaking Science and Technology. (Second edition). Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN: 978-952-5216-26-4.

Tikka, P., Engdhal, H., Halinen, E., Jaakkola, H., Jäntti, J., Kapanen, J., Kottila, M., Lankinen, M., Laxen, T., Lintunen, T., Nurminen, K., Näsänen, H., Parviainen, K., Toropainen, T., Vakkilainen, E., Arpalahti, O. 2008b. Recovery Boiler. Teoksessa: Panu, T. (d). Chemical Pulping. Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Papermaking Science and Technology. (Second edition). Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN: 978-952-5216-26-4.

Tikka, P., Engdhal, H., Halinen, E., Jaakkola, H., Jäntti, J., Kapanen, J., Kottila, M., Lankinen, M., Laxen, T., Lintunen, T., Nurminen, K., Näsänen, H., Parviainen, K., Toropainen, T., Vakkilainen, E., Arpalahti, O. 2008c. White liquor preparation. Teoksessa: Panu, T. (d). Chemical Pulping. Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Papermaking Science and Technology. (Second edition). Helsinki: Paperi ja Puu Oy. ISBN: 978-952-5216-26-4.

Tran, H. 2007. Lime kiln chemistry and effects on kiln operations. Teoksessa: TAPPI Kraft Recovery Course. pp. 114–150. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu: 19.12.2023]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/290320968_Lime_kiln_chemistry_and_effects_on_kiln_operations

Tsang, Y.F., Kumar, V., Sanadar, P., Yang, Y., Lee, J., Ok, Y.S., Song, H., Kim, K.-H. 2019. Production of bioplastic through food waste valorization. Environment International. 127:625–644. DOI: 10.1016/j.envint.2019.03.076.

Tsupari, E., Korpijärvi, K., Kauppinen, J., Pikkarainen, T., Leino, T., Simell, P., Lap-palainen, M., Winberg, I., Katajisto, O., Mäkikouri, S. 2022. Teollisuuden ilmastovaikutusten pienentäminen hiilineutraalin energian ja kiertotalouden keinoin – Decarbonate. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.1.2024]. Saatavissa: https://www.decarbonate.fi/wp-content/uploads/2022/06/Decarbonate_Final_report.pdf

Vakkilainen, E., 2024. Sähkölämmitteisen meesauunin energiatase. Henkilökohtainen tiedonanto. Julkaisematon.

Vakkilainen, E. 2018. Towards large, fossil free mills with integrated biorefineries – trends in modern pulp mills. Presented at the 51o ABTCP Congresso Internacional de Celulose e Papel e X Congresso Ibero-Americano de Pesquisa em Celulose e Papel Outubro, ABTCP, São Paulo, Brazil.

Vakkilainen, E., Kivistö, A. 2008. Fossil fuel replacement in the pulp mills. Tutkimusraportti EN A-58. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. ISBN 978-952-214-623-6.

Valmet. 2017. The next generation LignoBoost – tailor-maid lignin production for different lignin bioproduct markets [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.1.2024]. Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/next_generation_lignoboost_whitepaper.pdf

Vehmas, T. 2022. Carbonaide tähtää hiilinegatiiviseen betoniteknologiaan. Betoni. 2:106–109. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 8.1.2024]. Saatavissa: https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/05/BET2202_106-113.pdf

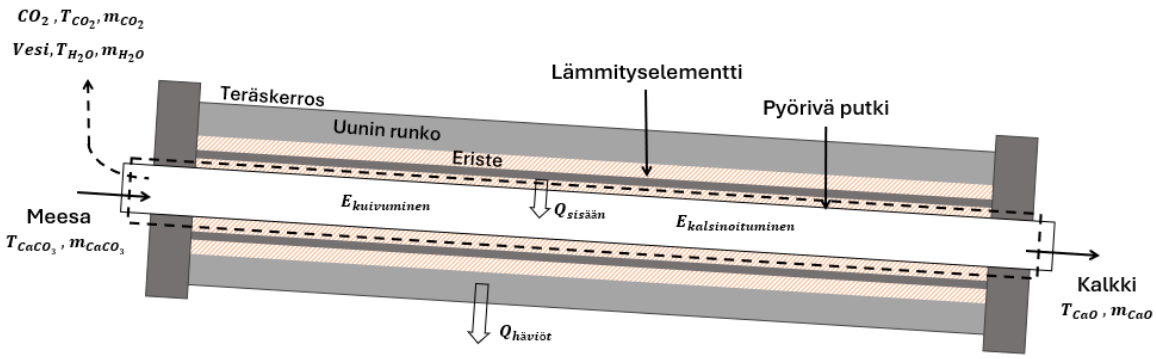
VTT. 2016. CCSP Carbon Capture and Storage Program: Final report. Tutkimusraportti. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 20.3.2024]. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/2023-04/CCSP%20Final%20report.pdf

VTT. 2024. Hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (CCU ja CCS). [Verkkosivu]. [Viitattu: 12.2.2024]. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/hiilidioksidin-talteenotto-kaytto-ja-varastointi-ccu-ja-ccs

Liitteet

Liite 1. Meesauunin energiatase

Epäsuorasti lämmitetyn uunin energiankulutusta voidaan arvioida energiataseen kautta. Sähköisen meesauunin tapauksessa lämpö voidaan tuoda sähkövastuksilla tai esimerkiksi vesielektrolyysillä tuotettua vetyä polttamalla. Seuraavassa kuvassa on havainnollistettu yksinkertaistettu uunin energiatase



Sisään tulevia virtoja ovat meesa ja sähkövastuksilla tuotu lämpö. Meesan oletetaan koostuvan pelkästään kalsiumkarbonaatista ja vedestä. Uunissa energiaa kuluu meesan kuivumiseen, lämpenemiseen sekä kalsinoitumisreaktioon. Uunista poistuvina virtoina huomioidaan vesihöyryn, hiilidioksidin ja poltetun kalkin mukana poistuva lämpö sekä uunin rungon lämpöhäviö. Uunin energiataseeksi saadaan

$$E_{meesa} + Q_{sisään} = E_{kuivuminen} + E_{kalsinoituminen} + Q_{häviöt} + E_{H_2O\ (g*)} + E_{CO_2} + E_{CaO} \quad (1)$$

*g = kaasufaasi

Kalsinoitumisreaktion ja meesan kuivumisen vaatima energia saadaan massavirran ja reaktioentalpian avulla

$$E = q_m * H \quad (2)$$

jossa kalsinoitumisreaktiolle H_{calc} = 1786 kJ/kg $CaCO_3$ ja vedelle H_{evap} = 2260 kJ/kg (Lundqvist, 2009). Kalsinoitumisreaktion osalta asetetaan reaktiivisen kalkin osuudeksi lopputuotteesta 83 %. Meesan kuiva-ainepitoisuudeksi valitaan 75 %.

Tulevien ja poistuvien virtojen osalta energia voidaan arvioida lämpökapasiteetin ja massavirran avulla seuraavasti

$$E = q_m \int_{T_{ref}}^{T} C_p dT \tag{3}$$

Reaktiotuotteiden lämpökapasiteetit lämpötilan funktiona yksikössä J/kgK voidaan arvioida seuraavalla sovitteella

$$C_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^{-1} + a_4 T^{-2} \tag{4}$$

Käytetään laskennassa kunkin komponentin lämpötilojen keskiarvoa alku- ja loppulämpötilasta. Vakioiden a kertoimet eri reaktiotuotteille on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vakiot eri aineiden ominaislämpökapasiteetin arviointiin sovitteella 4. (Lundqvist, 2009)

	a_0	$a_1 \cdot 10^5$	$a_2 \cdot 10^8$	a_3	a_4
H_2O (l)	4,03	487	0	0	0
H_2O (g)	1,084	125,9	-21	175,1	-14500
$CaCO_3$	1,009	25,36	0,64	-4,7	-20965
CaO	0,949	3,71	1,01	-27	-10574
CO_2	1,466	5,56	1,47	-309,1	35560

Uunin energiankulutus laskettiin kahdessa tapauksessa, joissa ensimmäisestä hiilidioksidi ja vesi poistuvat meesan syöttöpäädystä ja toisessa poistuvan kalkin mukana. Tapauksessa yksi reaktiotuotteiden sisääntulolämpötilaksi oletetaan T = 20 °C ja poistumislämpötilaksi T = 1000 °C. Tapauksessa kaksi on huomioitu hiilidioksidin ja haihtuvan veden tuoma lämpö meesan syöttöpäätyyn ja sisääntulolämpötilaksi on asetettu T = 400 °C. Laskennan perusteella uunin energiankulutukseksi saatiin noin 5 MJ/kg CaO. Laskennan tulokset yksikössä MJ/kg on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Energiataselaskennan tulokset.

	Tapaus 1 [MJ/kg CaO]	Tapaus 2 [MJ/kg CaO]
Sisään tuleva meesa	-0,06	-0,06
Meesan kuivuminen	0,2	0,2
Poistuvat CO_2 ja vesi	1,8	0,5
Kalsinoitumisreaktio	1,2	1,2
Poistuva kalkki	0,9	0,6
Häviöt	0,4	0,4
Yhteensä	5,8	4,2