



HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO JA KÄYTTÖ MUOVEISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Marianne Matero

Tarkastaja: Tutkijatohtori Hannu Karjunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Marianne Matero

Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö muoveissa

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

35 sivua, 5 kuvaa ja 1 liite

Tarkastaja: Tutkijatohtori Hannu Karjunen

Avainsanat: Hiilidioksidin talteenotto, CCU, muovit, polymeerit, vihreä vety

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus, jossa käsitellään hiilidioksidin talteenottoa ja käyttöä (CCU – Carbon Capture and Utilization) erityisesti muovien valmistamisessa. Työssä esitellään muovien kierrätyshiilidioksidista valmistamisen kannalta merkittävimpiä prosesseja sekä hiilidioksidin kierrättämisen suuren mittakaavan vaikutuksia.

Hiilidioksidin talteenoton osalta työssä esitellään teknisiä ratkaisuita, kierrätyshiilidioksidin käyttökohteita sekä talteenoton nykytilaa ja tulevaisuudennäkymiä. Vihreän vedyn tuotantoa käsittelevä osuus kattaa yleisesittelyn, esittelyn elektrolyysin peruserämuotoista sekä tekniikan nykytilasta ja näkymistä. Muoveja käsittelevässä luvussa esitellään polymeerimateriaaleja, niiden syntetisointia, muovien kierrätystä sekä polkuja muovin valmistamiseksi kierrätyshiilidioksidista. Lopuksi pohditaan hiilidioksidin kierrättämisen makrotason vaikutuksia.

Työssä havaittiin, että CCU voi vihreän vedyn tuotantoon yhdistettynä parhaimmillaan mahdollistaa irtautumisen fossiilisista polttoaineista. CCU:lla voidaan myös pienentää hiilidioksidipäästöjä, ja bioenergian käyttöön yhdistettynä sillä voi olla mahdollista saavuttaa jopa negatiiviset hiilidioksidipäästöt.

CCU:lla ei kuitenkaan vielä tänä päivänä valmisteta muoveja laajassa mittakaavassa: vuonna 2022 alle 0,1 % kaikesta valmistettavasta muovista tuotettiin kierrätyshiilidioksidista. Erittäin haasteita aiheuttavat hiilidioksidin kaappaustekniikan energiantensiivisyys sekä materiaalien suoran syntetisoinnin tekniikoiden kypsyttömyys. Toisaalta tekniikan kehittämistä hidastaa muun muassa se, ettei lainsäädäntö tunnista CCU:lla valmistettuja tuotteita, jolloin ne kilpailevat suoraan fossiilisperäisten verrokkiensa kanssa.

CCU:lla voidaankin todeta olevan potentiaalia mullistaa niin valtioiden välisiä voimasuhteita kuin ilmaston tulevaisuuttakin, mutta sen yleistymiseksi vaaditaan vielä niin teknistä kuin lainsäädännöllistäkin kehitystä.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

<i>m</i>	massa	Mt, Gt
<i>M</i>	moolimassa	g/mol
<i>m-%</i>	massaosuus (vuosituotannosta)	%
<i>w</i>	massaosuus (yhdisteestä)	%

Alaindeksit

C	hiili
C/C ₂ H ₄	hiiltä eteenissä
C/C ₃ H ₆	hiiltä propeenissa
C/CO ₂	hiiltä hiilidioksidissa
C ₂ H ₄	eteeni
C ₃ H ₆	propeeni
CO ₂	hiilidioksidi
CO ₂ -päästöt	hiilidioksidipäästöt
muovit	muovit
PE	polyeteeni
PP	polypropeeni

Lyhenteet

CCU	hiilidioksidin talteenotto ja käyttö (Carbon Capture and Utilization)
-----	---

CCUS	hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (Carbon Capture, Utilization and Sequestration)
CCS	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Sequestration)
CO ₂	hiilidioksidi/hiilidioksidimolekyyli
DAC	hiilidioksidin kaappaaminen suoraan ilmasta (Direct Air Capture)
DNA	eliön geneettisen materiaalin sisältävä nukleiinihappo (Deoxyribonucleic Acid)
EU	Euroopan unioni
H ₂	vetymolekyyli
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
O ₂	happimolekyyli
PE-LD	matalatiheyspolyeteeni (Polyethylen, Low Density)
PET	polyetyleenitereftalaatti

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	4
2	Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö (CCU)	6
2.1	Talteenottotekniikat	7
2.2	Kierrätyshiilidioksidin käyttökohteet	8
2.3	Nykytila ja tulevaisuudennäkymät.....	10
3	Vihreän vedyn tuotanto	12
3.1	Elektrolyysi.....	12
3.2	Nykytila ja tulevaisuudennäkymät.....	13
4	Muovit	16
4.1	Polymeerimateriaalit	17
4.2	Polymeerimateriaalien syntetisointi.....	19
4.3	Muovien kierrätys	21
4.4	Fossiilivapaata muovia kierrätyshiilidioksidista.....	22
5	Hiilidioksidin kierrättämisen makrotason vaikutukset.....	25
6	Johtopäätökset	29
	Lähteet	31

Liitteet

Liite 1. Laskelmat PE:n ja PP:n valmistamisen vuosittain sitomista hiilimääristä.

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on yksi merkittävimpiä ihmiskunnan kohtaamia haasteita, jonka voidaan nähdä aiheuttavan eksistentiaalisen uhkan koko nykysivilisaatiollemme (EUR-Lex 2024). Ihmiskunnan hiilidioksidipäästöt kiihdyttävät ilmastonmuutosta, ja tarve niiden nopealle vähentämiselle on kiistaton (Euroopan komissio 2024). Samaan aikaan ihmiskunnan päästöt ovat kuitenkin historiallisen korkealla (Global Carbon Budget 2023). Ratkaisuja tarvitaan.

Päästömääriä on mahdollista laskea paitsi muuttamalla päästöjä aiheuttavia prosesseja vähäpäästöisemmiksi, myös kaappaamalla hiilidioksidipäästöjä teollisuuslaitosten savukaasuista tai sitomalla hiilidioksidia ilmakehästä. Kaapattu hiilidioksidi voidaan joko säilöä pysyvästi esimerkiksi geologisiin muodostelmiin, tai sitä voidaan käyttää joko sellaisenaan vaikkapa hiilihapotetuissa juomissa tai raaka-aineena erilaisten hyödykkeiden, kuten polttoaineiden ja muiden kemikaalien, tuottamisessa. (Vairimaa 2023.)

Pitkälti hiilivedyistä koostuvat muovit ovat yksi mahdollinen käyttökohde kierrätyshiilidioksidille. Vuonna 2022 muoveja tuotettiin globaalisti noin 400 megatonnia (Plastics Europe 2023), ja yksittäisen muovituotteen käyttöikä on keskimäärin 10 vuotta (OECD 2022), joten niissä oleva hiili pysyy sidottuna pitkään moniin muihin kierrätyshiilen potentiaalsiin käyttökohteisiin verrattuna.

Lisäksi fossiilisperäisten muovien tuottamisesta aiheutui vuonna 2019 kasvihuonekaasupäästöjä noin 1,6 gigatonnin verran hiilidioksidiekvivalenteina (OECD 2022). Tämä vastasi noin 4 prosenttia globaaleista teollisuuden ja polttoaineiden kokonaishiilidioksidipäästöistä (Global Carbon Budget 2023). Muovien tuotantomäärät ovat olleet jatkuvassa kasvussa, ja kasvu on ollut suurempaa kuin muilla materiaaleilla, kuten teräksellä, alumiinilla tai sementillä (OECD 2022). Ei siis liene näköpiirissä, että niiden painoarvo päästöluvuissa tulisi ainakaan vähenemään. Muovien tuotannon päästöintensiivisyyden muutoksilla voidaan näin ollen saada aikaan konkreettisia muutoksia koko maapallon päästöihin.

Tässä työssä käsitellään hiilidioksidin talteenottoa ja sen käyttöä erityisesti muovien valmistamisen näkökulmasta. Työn tavoitteena on selvittää tärkeimmät muovien kierrätyshiilidioksidista valmistamiseen tarvittavat teknologiat, avata niiden toimintaperiaatteita, nykytilaa

ja kehitysnäkymiä sekä sitä, minkälaisia suuren mittakaavan vaikutuksia sillä ja muulla kierrätyshiilidioksidin hyötykäytöllä voisi olla.

Ensimmäisen luvun eli johdannon jälkeen työn toisessa luvussa esitellään hiilidioksidin talteenotossa käytettäviä tekniikoita, kierrätyshiilidioksidin käyttökohteita ja teknologian nykytilaa. Hiilivetyperusteisten muovien valmistamiseen tarvitaan hiilen lisäksi vetyä, minkä vuoksi uusiutuvalla sähköllä valmistetun vihreän vedyn tuotantoa käsitellään kolmannessa luvussa.

Muoveja, muovien valmistuksessa olennaisten polymeerien perusrakennetta ja synteesiä, muovien kierrättämistä sekä mahdollisia polkuja muovin fossiilivapaaseen tuottamiseen käsitellään omassa luvussaan. Viimeisenä pohditaan lyhyesti hiilidioksidin kierrättämisen makrotason vaikutuksia, minkä jälkeen johtopäätöksissä summataan työn tärkein anti.

2 Hiilidioksidin talteenotto ja käyttö (CCU)

Hiilidioksidin talteenotolla tarkoitetaan menetelmiä, joilla hiilidioksidia voidaan kaapata esimerkiksi teollisuuslaitoksen savukaasuista (Wilcox 2012). Talteenotolla voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä huomattavastikin, mutta täyttä päästöttömyyttä sillä ei saavutettane: tällä hetkellä näköpiirissä on, että talteenotolla voitaisiin mielekkäästi kaapata korkeintaan 85–95 % hiilidioksidipäästöistä, ja monilla koelaitteistoilla saavutetut hyötysuhteet ovat huomattavasti alhaisempia. (Gielen, Taibi & Raul 2019).

Talteenotosta puhuttaessa käytetään yleisesti lyhenteitä CCS ja CCU. CCS:llä tarkoitetaan hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (carbon capture and sequestration), ja CCU:lla hiilidioksidin talteenottoa ja käyttöä (carbon capture and utilization) suurista, kiinteistä piste-lähteistä, kuten fossiilista polttoainetta käyttävistä energiantuotantolaitoksista ja erilaisista teollisuuslaitoksista. (Markewitz ym. 2012.) Yhdessä CCS:ään ja CCU:hun viitataan termillä CCUS (IEA 2024a). Aiheeseen liittyy myös termi DAC (direct air capture), joka tarkoittaa hiilidioksidin keräämistä suoraan ilmakehästä, mihin tässä työssä ei kuitenkaan syvennyttä (Gielen ym. 2019).

CCS:ssä tavoitteena on poistaa hiilidioksidi pysyvästi kierrosta tallettamalla se esimerkiksi geologisiin muodostelmiin, kuten tyhjenneisiin maakaasutaskuihin (Surampalli ym. 2015). CCS:n etuna CCU:hun nähden on se, ettei talteen otettu hiilidioksidi lähtökohtaisesti vapaudu enää ilmakehään. Toisaalta hiilidioksidin säilöntä ei ainakaan suorasti ole taloudellisesti tuottavaa (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015), joten jotta sen harjoittaminen olisi yritykselle taloudellisesti mielekäästä, tulisi niitä esimerkiksi julkisen sektorin toimesta palkita poistetusta hiilidioksidista tai laskuttaa ilmakehään päästetystä hiilidioksidista. EU:n päästökauppa (Euroopan parlamentti 2022) on askel tähän suuntaan.

CCU:n etuna puolestaan on se, että talteen otettua hiilidioksidia voidaan käyttää resurssina korvaamaan muita raaka-aineita. Tällöin hiilidioksidin raaka-ainekäytön vaikuttavuus hiilidioksidipäästöihin riippuu pitkälti käyttökohteesta ja sen pitkäikäisyydestä (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015).

Mikäli hiilidioksidista tuotetaan esimerkiksi polttoainetta, vapautuu hiili polttoaineen käytön yhteydessä jälleen ilmakehään ja saavutettu päästöhyöty jää siis hyvin lyhytaikaiseksi.

Toisaalta mikäli sama määrä polttoainetta olisi joka tapauksessa käytetty ja vaihtoehto kierrätyshiilidioksidista valmistetulle polttoaineelle olisi fossiilista alkuperää oleva vastaava polttoaine, ei kierrätyshiilidioksidi välttämättä ole hiilidioksidipäästöjen kannalta huonompi vaihtoehto.

Hiiltä voidaan kuitenkin sitoa myös pidempi-ikäisiin materiaaleihin, jolloin se pysyy sitoutuneena niin pitkään, kun materiaali säilyy kemiallisesti eheänä. Esimerkiksi muovit ovat materiaaleina yleisesti ottaen pitkäikäisiä (Surampalli ym. 2015), ja niiden valmistus pohjautuu tänä päivänä pitkälti fossiilisiin raaka-aineisiin (Plastics Europe 2023).

Talteenottoon on olemassa useita vaihtoehtoisia prosesseja, joita esitellään alaluvussa 2.1. Lisäksi alaluvussa 2.2 kuvataan kaapatun hiilidioksidin mahdollisia käyttökohteita ja alaluvussa 2.3 lyhyesti hiilidioksidin talteenoton nykytilaa.

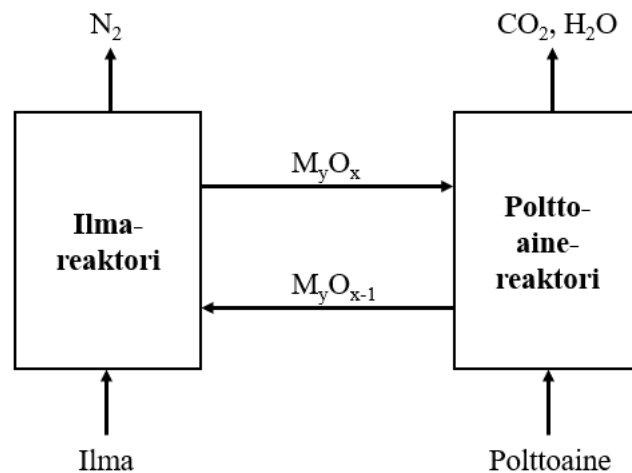
2.1 Talteenottotekniikat

Hiilidioksidin talteenoton tekniikat voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: konversion jälkeinen talteenotto, konversiota ennen tapahtuva talteenotto ja talteenotto käyttäen polttoaineen poltossa hapen kuljettajana muuta ainetta kuin ilmaa (oxy-fuel combustion capture). Konversiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä prosessia, jossa lähtöaineet muunnetaan lopputuotteiksi. Kukin kategoria käsittää lukuisia eri tekniikoita, joiden toimintaperiaatteisiin ei kuitenkaan paneuduta tässä työssä kuin joiltain osin. (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015.)

Konversion jälkeinen talteenotto voi olla hiilidioksidin kaappaamista esimerkiksi voimalaitoksessa tapahtuvan palamisprosessin savukaasuista. Konversiota ennen tapahtuvalla talteenotolla puolestaan tarkoitetaan hiilidioksidin kaappaamista konversioprosessista ennen sen päättymistä. Esimerkki konversiota ennen tapahtuvasta talteenotosta löytyy ammoniakkin valmistuksesta, jossa yksi välivaihe on vedyn valmistus metaanin höyryreformoinnilla. Höyryreformoinnin sivutuotteena muodostuu hiilidioksidia, joka voidaan näin ollen kaapata prosessista jo ennen varsinaisen lopputuotteen eli ammoniakkin valmistumista. (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015.)

Hapen kuljettajana muuta kuin ilmaa käyttävässä talteenottoprosessissa palamisilma korvataan vaihtoehtoisella tavalla tuoda happi mukaan palamisprosessiin. Tällöin savukaasuina syntyy hiilidioksidia ja vettä, jotka on helppoa erottaa toisistaan. Päävaihtoehtoja on kaksi:

poltossa voidaan käyttää puhdasta happea (happipoltto), tai hapen palamistilaan kuljettamisessa voidaan käyttää metallioksidia (kemikaalikierrallinen polttoprosessi). (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015; Markewitz ym. 2012.)



Kuva 1. Ylätasoinen kuvaus hiilidioksidin erottamisesta käyttäen metallioksidia hapen kuljettajana palamistilaan (Markewitz ym. 2012).

Kuvassa 1 on nähtävissä metallioksidia hapen kuljettajana käyttävän hiilidioksidin erottelun peruseriaate. Metallioksidi kulkee kahden tilan – ilma- ja polttoainereaktorien – välillä. Ilmareaktorissa siihen sitoutuu happea, minkä jälkeen metallioksidi kulkee polttoainereaktoriin. Polttoainereaktorissa metallioksidin happi reagoi polttoaineena olevan hiilivedyn kanssa synnyttäen hiilidioksidia ja vettä. Hiilidioksidi ja vesi poistuvat savukaasuina polttoainereaktorista, minkä jälkeen ne voidaan erottaa toisistaan esimerkiksi vesihöyryn kondensoinnin kautta. (Markewitz ym. 2012.)

2.2 Kierrätyshiilidioksidin käyttökohteet

Kierrätyshiilidioksidille on olemassa laaja skaala mahdollisia käyttökohteita. Osassa kohteista hiilidioksidi hyödynnetään sellaisenaan, kun taas osassa sen käyttö edellyttää konvertointia muiksi aineiksi. (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015.)

Hiilidioksidia käytetään sellaisenaan esimerkiksi ruoka- ja juomateollisuudessa mm. juomien hiilihapotuksessa sekä pakkauskaasuna. Lääketeollisuudessa hiilidioksidia voidaan käyttää hengityksen stimulanttina. (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015.)

Hiilidioksidia voidaan myös käyttää öljyesiintymillä tuotannon tehostamiseen. Tällöin maaperän öljy- tai metaanivarastoihin injektoidaan hiilidioksidia sekä muita aineita, jotka muuttavat öljyn ominaisuuksia saaden sen poistumaan helpommin esiintymästä. (Lee, Cho & Lee 2020.) Vastaavaa menetelmää on harkittu myös metaanille, mutta toistaiseksi menetelmää ei ole kaupallistettu (Cuéllar-Franca & Azapagic 2015).

Konvertoinnin kautta hiilidioksidista on mahdollista valmistaa yhdessä muiden raaka-ainesten, kuten vedyn, kanssa polttoaineita ja erilaisia kemikaaleja. Myös polymeerien, joihin muovitkin kuuluvat, syntetisointi lukeutuu tähän kategoriaan. (Styring, Jansen, de Coninck, Reith & Armstrong 2011.) Polttoaineiden ja kemikaalien elinkaari on monesti lyhyt, jolloin hiilidioksidin sidonnassa saavutetut hyödyt jäävät lyhytaikaisiksi (Metz, Davidson, de Coninck, Loos & Meyer 2005), mutta pitkäikäiset lopputuotteet, kuten muovit (Surampalli ym. 2015), tekevät tässä poikkeuksen.

Yksi vaihtoehto on mineraalien karbonointi. Siinä hiilidioksidi reagoi muodostaen karbonaatteja metallioksidin, kuten magnesium- tai kalsiumoksidin, kanssa. Lopputuotteita voidaan käyttää esimerkiksi sementin lisäaineina (Olajire 2013). Karbonaatit ovat vakaita yhdisteitä, joissa hiilidioksidi pysyy sitoutuneena erittäin pitkäaikaisesti. Suomessa on merkittäviä serpentiiniesiintymiä, joiden sisältämiin magnesiumoksidivarantoihin arvioidaan olevan mahdollista säilöä 2,5–3,5 gigatonnia hiilidioksidia. (Styring ym. 2011.)

Hiilidioksidilla voidaan myös ravita mikroleviä, joista saadaan raaka-ainetta esimerkiksi polttoaineiden ja proteiinin tuottamiseen. Levät kykenevät sitomaan hiilidioksidia suoraan pakokaasuista, ja ne voivat käyttää myös kaasumaisessa muodossa olevaa vetyä ravinnokseen. Levien kasvattamisen vaatima suuri maa-ala ja tuotannon kalleus ovat kuitenkin ongelmia. (Styring ym. 2011.)

2.3 Nykytila ja tulevaisuudennäkymät

Hiilidioksidin talteenottoon tarvittava tekniikka on jo olemassa, joten sen toteuttaminen on mahdollista ja sitä toteutetaan pienessä mittakaavassa. Käytännön ongelmia kuitenkin on. Talteenotto on toistaiseksi kallista ja energiaintensiivistä: arvion mukaan esimerkiksi hiilivoimalan hiilidioksidipäästöjen talteenotto kuluttaisi energiaa noin kolmanneksen koko laitoksen energiantuotannosta. (Vairimaa 2023.) Talteenoton energiaintensiivisyys tarkoittaa sitä, että siihen tarvittavan energian alkuperällä on merkittävä vaikutus prosessin nettopäästövaikutuksiin, ja näin ollen ylipäänsä prosessin mielekkyyteen päästöjen vähennyskeinona.

Lisäksi kaapatulle hiilidioksidille ei ole vielä kummoisia jälkimarkkinoita, ja loppusijoitus puolestaan ei tuota, jolloin se ei ole kaupallisesti kiinnostavaa. (Vairimaa 2023.) Vain noin 50 megatonnia (IEA 2024a), eli noin 1,4 promillea globaaleista 37 gigatonnin hiilidioksidipäästöistä (Global Carbon Budget 2023) otetaankin tällä hetkellä vuositasolla talteen.

Parhaillaan rakenteilla olevien hiilidioksidin talteenottolaitosten kaappauskapasiteetin, noin 38 megatonnia hiilidioksidia vuodessa, on kuitenkin määrä lähes kaksinkertaistaa vuosittain kaapattavan hiilidioksidin määrä vuoteen 2029 mennessä, ja suunnitteilla on tämän lisäksi talteenottolaitoksia 505 megatonnin vuosikapasiteetin edestä. Kaavailluista laitoksista suuren osan on tarkoitus valmistua ennen vuotta 2030, mutta huomattava määrä on myös vielä vailla tietoa kaavaillusta käyttöönottoajankohdasta. (IEA 2024a).

Metsäteollisuusmaana Suomella on runsaasti bioperäisen hiilidioksidin lähteitä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023), ja bio- ja jäte-energian yhteenlaskettu osuus Suomen energiantuotannosta oli noin 52 % vuonna 2021 (IEA 2024b). Suomen ilmastopaneelin puheenjohtajan, tutkimusjohtaja Markku Ollikaisen arvio onkin, että Suomessa voisi olla realistista vuosittain kaapata 5–8 megatonnia bioperäistä hiilidioksidia 2030-luvulla (Vairimaa 2023).

Tällä hetkellä kuitenkin esimerkiksi EU-lainsäädäntö ei tunnista CCU:ta pysyväksi hiilensidonnaksi, minkä vuoksi CCU:ta toteuttavan yrityksen on toistaiseksi maksettava päästöoikeuksista huolimatta siitä, että suuri osa poltossa syntyvästä hiilidioksidista otetaan ilmakehään päästämisen sijaan talteen. (Fortum 2023a.) Tämä heikentää CCU:n kannattavuutta, ja lainsäädännön päivittäminen olisi aiheellista, jotta hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä CCU:lla tulisi yrityksille houkuttavampaa.

CCU:ta ei vielä juurikaan toteuteta teollisessa mittakaavassa, vaan tekniikka on enemmän pilotointiasteella: IEA:n (2024a) CCUS-projektitietokantaan on merkitty kaikkiaan viisi toiminnassa olevaa CCU-laitosta, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on alle 1,5 megatonnia hiilidioksidia vuodessa. Kaikki laitokset sijaitsevat joko Euroopassa tai Pohjois-Amerikassa. Vertailun vuoksi toiminnassa olevia CCS-projekteja tietokantaan on merkitty kymmenen kappaletta, niiden yhteiskapasiteetti on 10 megatonnia ja niiden sijainneissa on CCU:hun nähden enemmän vaihtelua.

Paraikaa CCU:n saralla on rakenteilla yhteensä noin 2 megatonnia lisäkapasiteettia neljässä eri projektissa, joiden on määrä valmistua vuosina 2024-2025. Rakennettavista laitoksista suurin, 1,5 megatonnin laitos sijoittuu Kiinaan, ja loput kolme Australiaan, Ranskaan ja Alankomaihin.

Suunnitteilla olevia CCU-hankkeita on runsaasti enemmän, 46 kappaletta. Projektien yhteenlaskettu vuosikapasiteetti on noin 13 megatonnia hiilidioksidia, josta noin 7,5 megatonnia on määrä rakentaa Eurooppaan, runsaat 4 megatonnia Pohjois-Amerikkaan ja pieniä määriä Australiaan, Etelä-Amerikkaan ja Aasiaan.

Suomi on suunniteltujen CCU-hankkeiden listalla seitsemäs 0,53 megatonnin suunnitellulla lisäkapasiteetillaan. Projekteista neljä on Ren-Gas Oy:n Kotkaan, Lahteen, Poriin ja Tampereelle suuntautuvia laitoksia, joiden on määrä aloittaa toimintansa vuosina 2026–2027. Viidennen, 0,1 megatonnin hankkeen taustalla on Aker Carbon Capture, mutta hankkeen aika- ja sijaintitiedot ovat vielä tarkentamatta. (IEA 2024a.)

3 Vihreän vedyn tuotanto

Monien muovien valmistamiseen tarvitaan hiilen lisäksi vetyä. Vuonna 2022 globaali vedyn tuotanto oli noin 95 Mt, ja yli 99 % siitä valmistettiin fossiilisesti ilman hiilidioksidin talteenottoa (IEA 2023). Tällaista vetyä kutsutaan harmaaksi vedyksi. (Sivill ym. 2022.) Fossiilisen vedyntuotannon sivutuotteena syntyy hiilidioksidia; esimerkiksi metaanin höyryreformoinnissa, joka on vedyn yleisin tuotantotapa, syntyvät suorat hiilidioksidipäästöt ovat noin 9 kg hiilidioksidia yhtä tuotettua vetykiloa kohti (IEA 2023).

Vaikka nyanssieroja onkin, ei hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta ole yleisesti ottaen kovinkaan mielekästä hajottaa yhtä hiilivetyä toisen tuottamiseksi. Koska monet yleiset muovit koostuvat lähinnä hiilivedyistä (Young & Lovell 1981), ei niiden tuottamisessa tarvittavaa vetyä kannatakaan valmistaa fossiilisesta hiilivedystä erottamalla.

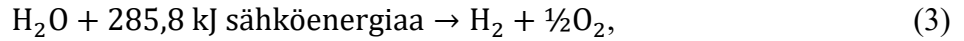
Vetyä on kuitenkin mahdollista tuottaa myös vedestä elektrolyysi-nimisellä prosessilla, jolla vesimolekyylejä hajotetaan vety- ja happikaasuiksi sähköenergian avulla (Pahwa & Pahwa 2014). Elektrolyysissä käytetyn sähköntuotantomuodolla on huomattava merkitys tuotetun vedyn hiilijalanjälkeen: elektrolyysillä valmistetun vedyn hiilijalanjälki voi olla jopa suurempi, kuin fossiilisista raaka-aineista valmistetun (Bhandari ym. 2014). Elektrolyysillä valmistettua vetyä kutsutaan vihreäksi vedyksi silloin, kun käytetty sähkö on peräisin uusiutuvista lähteistä (Sivill ym. 2022).

Vihreä vety on energiankantajana lähes hiilineutraali (Kakoulaki ym. 2021), ja sen tuotannon ainoana sivutuotteena muodostuvaa happea voidaan hyödyntää esimerkiksi teräs- ja kemianteollisuudessa, energiateollisuudessa ja terveydenhuollossa (Sivill ym. 2022). Tässä luvussa esitellään elektrolyysin pääperiaate ja käsitellään lyhyesti vihreän vedyn tuotannon nykytilaa ja tulevaisuudennäkymiä.

3.1 Elektrolyysi

Elektrolyysilaitteistoja eli elektrolyysereitä on olemassa monenlaisia, ja elektrolyysin aikana tapahtuvat välireaktiot vaihtelevat eri elektrolyyserityyppien välillä (Pahwa & Pahwa 2014).

Elektrolyysin ydinajatus kuvautuu kuitenkin Pahwa & Pahwa (2014) mukailleen elektrolyysin kokonaisreaktioyhtälössä (1):



jossa H₂O on vesimooli, H₂ vetymooli ja O₂ happimooli.

Elektrolyyseriin sähkövirtana tuotu energia sitoutuu siis prosessissa vety- ja happiatomien kemialliseksi energiaksi. On hyvä huomata, että yhtälössä kuvattu prosessi on ideaalinen eikä näin ollen ota huomioon todellisessa prosessissa tapahtuvia lämpö- ja muita häviöitä. Todellisessa prosessissa yhden vetymoolin tuottamiseen tarvittava sähköenergian määrä on siis korkeampi. (Pahwa & Pahwa 2014.)

Kuten kokonaisreaktioyhtälöstä ilmenee, ei elektrolyysissä vapaudu lainkaan hiilidioksidia tai muita kasvihuonekaasupäästöjä, kuten erotettaessa vetyä esimerkiksi hiilivedyistä, vaan elektrolyysin ainoana sivutuotteena muodostuu puhdasta happea.

3.2 Nykytila ja tulevaisuudennäkymät

Vielä toistaiseksi harmaa vety on selvästi vallitsevin vedyn muoto: niin Suomessa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023) kuin maailmanlaajuisestikin (IEA 2023) noin 99 prosenttia vedystä tuotetaan fossiilisista lähteistä. Tätä selittää vihreän vedyn hintavuus harmaaseen nähden: vuonna 2020 vihreän vetykilon tuottamisen kustannus oli 5,09 €, kun taas esimerkiksi metaanin höyryreformoinnilla metaanista tuotetun harmaan vedyn tuottaminen maksoi 1,35 € kilolta (Kakoulaki ym. 2021).

Tuulivoiman tuottavuuden nousun vuoksi vihreän vedyn hinnan ennustetaan kuitenkin putoavan nopeasti: vuoden 2030 tuotantokustannusten arvioidaan olevan enää 2,12 € vetykiloa kohti (Kakoulaki ym. 2021). Näillä näkymin vihreä vety tulee jo kuluvan vuosikymmenen aikana muuttumaan taloudellisesti huomattavastikin nykyistä houkuttelevammaksi.

Toisaalta samaan aikaan odotetaan esimerkiksi, että metaanin höyryreformoinnilla valmistettu harmaa vety, jonka tuotannon hiilidioksidipäästöjä on pienennetty hiilidioksidin talteenotolla, tulisi vuonna 2030 maksamaan 1,50 € kilogrammalta (Kakoulaki ym. 2021). Ottaen huomioon hiilidioksidin talteenoton hyötysuhdeodotuksen, 85–95 %, on tämäkin validi

vaihtoehto hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen, vaikkakaan sillä ei päästä aivan yhtä suuriin päästövähennyksiin, kuin vihreää vetyä käyttämällä.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että kun uusiutuvien energiantuotantomuotojen volyymit kasvavat, tulee myös energiaintensiivisten prosessien, kuten elektrolyysin, tuotantopotentiaali kasvamaan. Suomessa erityisesti tuulivoimakapasiteetti on kasvamassa varsinaiseen tarpeeseen nähden moninkertaisesti, mikä antaa hyvät lähtökohdat esimerkiksi vihreän vedyn tuotannon kasvattamiselle. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023.)

Suomen valtioneuvosto on vuonna 2023 laatinut vedystä periaatepäätöksen, jonka mukaan ”Suomi tavoittelee Euroopan johtava asemaa vetytaloudessa läpi koko arvoketjun”. Suomen vahvuuksiksi vedyn tuotantoa ajatellen listataan erityisesti riittävä uusiutuvan energian tuotanto, vakaa sähköverkko, vahva osaaminen, runsaat puhtaan veden varannot sekä kaukolämpöverkot, joissa hyödyntää elektrolyysin hukkalämpöä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023.)

Periaatepäätöksessä Suomella kerrotaan olevan edellytykset vastata vuonna 2030 vähintään kymmenen prosentin osuudesta EU:n vihreän vedyn tuotannosta. Pitkällä tähtäimellä Suomen kaavaillaan voivan vallata markkina-alaa puhtaan vedyn tuotannon lisäksi esimerkiksi vihreän teräksen ja sähköpolttoaineiden alueilla, missä vihreästä vedystä on myös hyötyä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023.)

Tammikuussa 2023 Yle uutisoi vihreän vedyn olevan ”tuomassa Suomeen 10 miljardin euron investoinnit”. Artikkelissa listattiin 23 Suomeen kaavailtua vetyhanketta, joista suurin osa oli joko suunnittelu-, luvanhaku- tai rahoituksenetsimisvaiheessa. Hankkeista yli puolessa oli tavoitteena polttoaineiden valmistaminen vedystä ja hiilidioksidista, minkä lisäksi hankkeiden piirissä oli vedyn valmistamista energian kuljettajaksi, harmaan vedyn korvauksiksi ja muihin tuotteisiin, kuten elintarvikeproteiineihin. (Mäntylä 2023.)

Kuitenkin jo saman vuoden joulukuussa Yleltä ilmestyi artikkeli, jossa kerrottiin hankkeista 13 viivästyneen ja yhden peruuntuneen täysin. Syiksi listattiin muun muassa kehittymättömät markkinat, viivästyneet tukipäätökset, kohonneet investointikustannukset sekä kierrätyshiilidioksidin käytön kannattavuutta heikentävä EU-sääntely. Osassa hankkeista viivästykset olivat pieniä ja kenties jopa asiaankuuluvia, osan tulevaisuus puolestaan näytti epävarmalta. (Mäntylä & Hukkanen 2023.)

Osan hankkeista kerrottiin kuitenkin olevan hyvässä vauhdissa. (Mäntylä & Hukkanen 2023.) Lisäksi Suomen kannalta positiivisena uutisena toukokuussa 2024 kerrottiin Euroopan vetypankin myöntäneen 45 miljoonan euron rahoituksen Lahteen suunnitellulle Nordic Ren-Gas Oy:n tuotantolaitokselle, jossa on tarkoitus valmistaa vihreää vetyä ja synteettistä metaania, ja jonka hukkalämpö aiotaan hyödyntää kaukolämpönä. (Kajova & Ojanperä 2024.)

4 Muovit

Muovit ovat polymeereihin pohjautuvia materiaaleja, joita määritelmän mukaisesti muovataan jossakin valmistusprosessin vaiheessa virtaavassa tilassa. Polymeerien lisäksi muoveissa on useimmiten mukana myös erilaisia lisäaineita. (Muoviteollisuus ry 2024a.)

Materiaaleina muovit ovat orgaanisia eli hiilipohjaisia (Muoviteollisuus ry 2024a), ja niiden valmistus pohjautuu pitkälti raakaöljyyn (Plastics Europe 2024). Vuonna 2022 muovia tuotettiin globaalisti 400,3 megatonnia. Tästä 90,6 % tuotettiin fossiilisista raaka-aineista, 8,9 % muovista tuotettiin kuluttajilta kerätystä muovijätteestä, 0,5 % biopohjaisista raaka-aineista ja alle 0,1 % kierrätyshiilidioksidista, samoin kuin kemiallisella kierrätyksellä. (Plastics Europe 2023.)

Muoveilla on hyvin pitkä hajoamisaika. Esimerkiksi polyetyleenitereftalaatti- eli PET- pullole, korkeatiheyspolyeteenistä valmistetulle muoviputkelle ja polystyreeniselle eristyspakkaukselle on määritetty puoliintumisajaksi vähintään 2500 vuotta. Puoliintumisajalla tarkoitetaan tässä yhteydessä aikaa, jossa puolet muovin polymeerimassasta hajoaa. (Chamas ym. 2020.)

Hajoamisaikojen ollessa pitkiä muodostuu hiilen sidonnan kannalta olennaiseksi muovituotteen käyttöikä, jonka jälkeen tuote lähtökohtaisesti hävitetään tavalla tai toisella. Keskimääräinen käyttöikä kaikille muovituotteille on noin 10 vuotta (OECD 2022), mutta lukema vaihtelee eri käyttökohteiden välillä huomattavastikin. Esimerkiksi pakkausmuoveille keskimääräinen käyttöikä on vain noin 0,5 vuotta, kun taas rakennusteollisuudessa käytetyt muovit ovat käytössä keskimäärin noin 35 vuotta. (Zaman & Newman 2021).

On olemassa paljon erilaisia muoveja, ja niiden käyttötarkoitukset vaihtelevat niiden ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi matalatiheyspolyeteeni sopii joustavana ja sitkeänä muovina esimerkiksi erilaisiin kalvoihin, lämpöä hyvin eristävä ja suurta puristusta kestävä paisutettu polystyreeni lämpöeristykseen ja yli 200 celsiusasteessa pehmenevä polyfenyyლისulfony erilaiisiin kuumavesi- ja höyryputkistoihin. (Muoviteollisuus ry 2024b.)

Muoveja voidaan jaotella monin eri perustein. Kesto- ja kertamuoveihin jako tehdään sen perusteella, onko materiaalin sulattaminen ja uudelleen muotoilu mahdollista (kestomuovit), vai onko materiaali muovattavissa vain kerran (kertamuovit). Näistä kestumuovit käsittävät

kaksi alakategoriaa, amorfiset ja osakiteiset muovit, joista osakiteiset ovat aina läpinäkymättömiä, osakiteiset eivät välttämättä. Lisäksi muovit voidaan vielä jakaa käyttötarkoituksen ja yleisyyden perusteella yleisimpiin ja vähiten teknisiin valtamuoveihin, vaativampiin käyttökohteisiin tarkoitettuihin teknisiin muoveihin ja materiaalilta erittäin paljon vaativiin kohteisiin soveltuviin erikoismuoveihin. (Muoviteollisuus ry 2024c.)

Tämän luvun alaluvuissa kuvataan ensin yltäasolla polymeerimateriaaleja ja niiden synteesiä, minkä jälkeen esitellään muovien kierrättämistä lähinnä suomalaisesta kontekstista. Esimerkinomaisesti huomioidaan erityisesti polyeteeni sekä niihin lukeutuva matalatiheyspolyeteeni eli PE-LD, joka on polypropeenin jälkeen maailman toiseksi tuotetuin muovilaji (Plastics Europe 2023) ja jonka elinkaareen sisältyvien prosessien muutoksilla on täten mahdollista saavuttaa erityisen suuri vaikutus. Polymeerejä käsittelevissä alaluvuissa keskitytään synteettisiin polymeereihin.

4.1 Polymeerimateriaalit

Polymeereiksi kutsutaan aineita, jotka koostuvat pitkäketjuisista makromolekyyleistä. DNA, proteiinit ja luonnonkumi ovat esimerkkejä luonnollisista polymeereistä, joiden lisäksi erilaisia synteettisiä polymeerejä on kehitetty laaja määrä. (Bower 2002; Young & Lovell 1981.)

Polymeerimolekyylit koostuvat monomeereistä, pienistä molekyyleistä, jotka voivat polymeroitua eli liittyä toisiinsa muodostaen pitkiä ketjuja. Polymeerin toistuva yksikkö ei kuitenkaan ole varsinaisesti sama, kuin sen muodostaneet monomeerit, mitä havainnollistetaan kuvan 2 yhteydessä. Polymeerimolekyylit voivat olla hyvin pitkiä: esimerkiksi tyypillisessä polyeteeniketjussa voi olla noin 50 000 eteenimolekyylistä muodostunutta toistuvaa yksikköä linkittyneinä yhteen. (Young & Lovell 1981.)

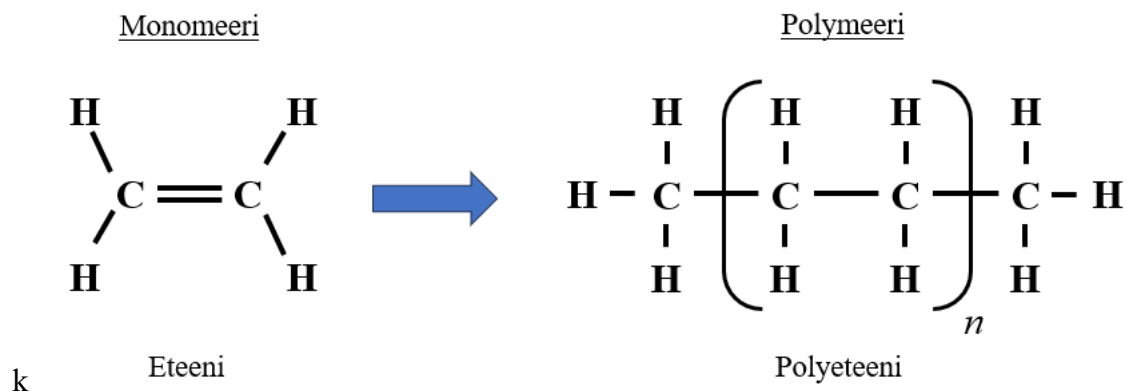
Erilaisten polymeerien määrä on mittava. Jo pelkästään samasta monomeeristä muodostuvien polymeerien välillä voi olla paljonkin vaihtelua, sillä erilaiset ketjurakenteen haarautumiset ja verkottumiset vaikuttavat aineen ominaisuuksiin, samoin kuin polymeeriketjun pituus ja sitä kautta aineen moolimassa. (Young & Lovell 1981.) Esimerkiksi polyeteenejä

löytyy aina matalan vetolujuuden vahoista lujiin muoveihin, joita voidaan käyttää esimerkiksi keinolonkkiin. (Braun, Cherdron & Ritter 2001.)

Lisähaasteen polymeerien määrittelyyn tuo se, että polymeeriaineksen koostumus on harvoin täydellisen homogeeninen, vaan aineessa on mukana eri mittaisia polymeeriketjuja. Tällöin aineominaisuuksien määrittämisessä on käytettävä tilastollisia menetelmiä. (Braun ym. 2001.)

Polymeerejä voidaan jaotella erilaisiin alaryhmiin useilla eri perusteilla. Polymeerit voidaan jakaa vain yhdenlaisista monomeereistä muodostuviin homopolymeereihin ja useammanlaisista monomeereistä muodostuviin kopolymeereihin. Niiden rakenne voi olla lineaarinen, haaroittunut tai verkottunut. Samoin ne ovat ominaisuuksiensa perusteella jaettavissa termoplastisiin polymeereihin, elastomeereihin ja termoset-tyypin polymeereihin. (Bower 2002.)

Polyeteeni on hyvä esimerkki niin muovista kuin yksinkertaisesta polymeeristäkin. Polyeteeni muodostuu vain yhdenlaisesta monomeeristä, eteenistä. Siinä eteenimolekyylit muodostavat kuvan 2 mukaisesti pitkän hiilivetyketjun. (Young & Lovell 1981.)



Kuva 2. Eteeni ja eteenimolekyyleistä muodostuva polyeteeni. (Young & Lovell 1981.)

Kuvan 2 polyeteeniketjun sulkeilla ja n -kirjaimella kuvataan sitä, että molekyylissä esiintyy sulkeiden välissä n kappaletta samanlaisena toistuvaa rakenneyksikköä, tässä tapauksessa $\{\text{CH}_2\text{-CH}_2\}$ -yksikköä. On hyvä huomata, että eteenin polymerointireaktiossa eteenimolekyyleissä olevat kaksoissidokset avautuvat mahdollistaen molekyyliden linkittymisen kummastakin päästä. Polyeteenin toistuva yksikkö ei siis ole eteeni, vaikka polyeteeni muodostuu eteenistä. (Young & Lovell 1981.)

Vaikka polyeteeni on yksinkertaisessa muodossaan lineaarinen eli yksiketjuinen, voi sen rakenteeseen muodostua valmistusvaiheessa haaroja. Esimerkiksi korkeassa lämpötilassa ja paineessa valmistettavalla PE-LD:llä on noin 20–30 haaraa tuhatta hiiliatomia kohti. Sen haaroissa ilmenee monia erilaisia hiilivetyrakenteita, kuten etyyliä, butyyliä, pentyyliä, heksyyliä ja pidempiä yksiköitä. (Bower 2002.)

4.2 Polymeerimateriaalien syntetisointi

Koska erilaisia polymeerejä on olemassa valtava määrä, ovat myös niiden valmistusprosessit moninaisia. Prosessit eroavat paitsi eri polymeerien, myös laboratorio-olojen ja teollisen tuotannon välillä. Erityisesti teollisissa prosesseissa on jokseenkin mahdotonta aikaansaada kemialliselta koostumukseltaan täydellisen yhtenäistä massaa. (Braun ym. 2001.)

Monomeerejä lähtöaineina käytettäessä polymerointireaktiot voidaan jakaa mekanismin perusteella kahteen kategoriaan: ketju- ja askelpolymerointiin. Ketjupolymeroinnissa polymeeriketju pitenee vain toisesta päästään monomeeri kerrallaan, kun taas askelpolymeroinnissa ketjun molemmat päät ovat aktiivisia, jolloin monomeerit ja polymeeriketjut yhtyvät toisiinsa yhä uudelleen ja uudelleen pideten hyvin nopeasti. Ketjupolymerointireaktio aloitetaan tyypillisesti initiaattorilla tai katalyytillä; askelpolymeroinnissa näitä ei yleensä tarvita. Suurin osa polymerointireaktioista kuuluu ketjupolymerointireaktioiden kategoriaan, ja myös polyeteenien valmistus perustuu ketjupolymerointiin. (Braun ym. 2001.)

Lisäksi monia polymeerimateriaaleja voidaan valmistaa toisesta polymeerimateriaalista modifioimalla sitä kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisella modifikaatiolla tarkoitetaan sitä, että olemassa oleva polymeeri laitetaan reagoimaan toisen aineen kanssa, ja fysikaalisella esimerkiksi täyteaineen tai lasikuidun lisäämistä polymeerimateriaaliin. (Braun ym. 2001.)

Polymerointi on eksoterminen prosessi, eli siinä vapautuu lämpöä. Polymeroinnissa prosessilämpötila vaikuttaa saatavaan lopputuotteeseen: korkeampi lämpötila saa usein aikaan lyhyempiä polymeeriketjuja sekä enemmän haaroittumisia. Toisaalta lämpötilan nostaminen vähentää viskositeettia, mistä on usein etua: polymeerimassat ovat tyypillisesti hyvin viskooseja, mikä aiheuttaa hankaluuksia esimerkiksi materiaalin siirtämisessä ja sekoittamisessa. Lämpötilan hallinta onkin tärkeä tekijä prosessissa. (Braun ym. 2001.)

Polymeerien tuotantomenetelmät puolestaan voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan: massapolymerointiin, liuospolymerointiin ja dispersiopolymerointiin. Niissä kussakin on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. (Braun ym. 2001.)

Massapolymeroinnissa ei käytetä liuottimia tai laimentimia, jolloin on mahdollista saavuttaa hyvin puhdas lopputuote, sillä reaktiossa on mukana vain monomeerejä sekä mahdollisia initiaattori- ja katalyyttiaineita. Tämä lisää prosessin taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä, sillä reaktiotuotteena syntyvää polymeeriä ei tarvitse erikseen puhdistaa esimerkiksi liuottimista eikä jätenestevirtoja synny tuotannon sivutuotteena. Korkean reaktioasteen massapolymeroinnissa voidaan myös saavuttaa korkeita moolimassoja. Kääntöpuolena on, että lämmönpoisto ja viskoosin seoksen käsittely aiheuttavat päänvaivaa, ja ei-toivottujen sivureaktioiden kontrollointi on hyvin viskoosissa seoksessa hankalaa. (Braun ym. 2001.)

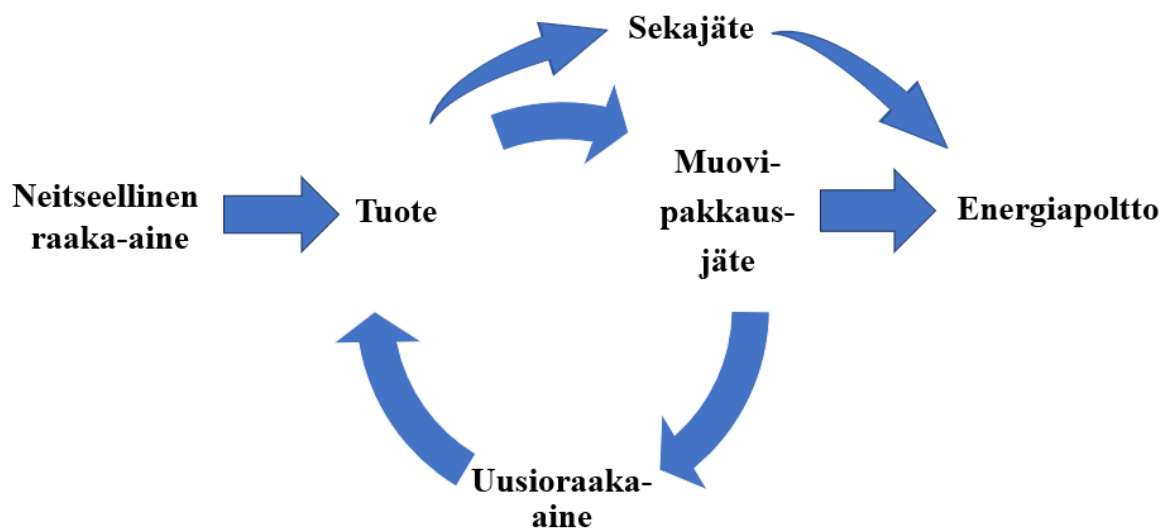
Liuospolymeroinnissa monomeerit yhtyvät polymeereiksi liuoksessa. Sekä monomeeri että lopputuotteena syntyvä polymeeri voivat olla liuottimeen liukenevia, tai käytettävät monomeerit voivat olla liukoisia, mutta niistä muodostuva polymeeri saostua reaktion edetessä omaksi faasikseen. Liuospolymeroinnin etuja ovat massapolymerointiin nähden helpommin hallittava lämmön- ja massansiirto ja parempi käsiteltävyys. (Braun ym. 2001.)

Dispersiopolymeroinnissa nestemäinen monomeeri ja ns. dispersioväliaine muodostavat yhdessä dispersion: seoksen, jossa yksi aine on hienojakoisessa muodossa sekoittunut toiseen aineeseen, johon se ei liukene. Dispersiopolymeroinnin lähtötilanne on emulsio, eli kahden nesteen muodostama dispersio. Polymerointi tapahtuu dispersion monomeeripisaroissa. Polymeroinnin edetessä dispersio voi joko pysyä emulsiona (emulsiopolymerointi) tai muuttua suspensioksi (suspensiopolymerointi), eli nesteen ja kiinteän muodostamaksi dispersioksi. Liuospolymeroinnin tavoin dispersiopolymeroinnin etuja ovat tehokas lämmönsiirto ja hyvä käsiteltävyys verrattain korkeillakin konversioasteilla, sillä viskositeetti kasvaa dispersiossa ainoastaan polymeerien ja monomeerien, muttei dispersioväliaineen osalta. (Braun ym. 2001.)

4.3 Muovien kierrätys

Muovit eivät ole kierrätystavoiltaan yhtenäinen ryhmä. Suomessa puhtaat, ei-biohajoavat muovipakkaukset tulee lajitella muovipakkausten erillisjakeeseen, muut muovituotteet lähokohtaisesti sekajätteeseen. (Lassila & Tikanoja 2024.) Biohajoavien muovien kohdalla on joitakin poikkeuksia. Biohajoavasta muovista valmistetut pakkaukset voi lajitella muovipakkauksina tai sekajätteenä, sillä niitä ei tällä hetkellä voida hyödyntää uusiomateriaaleissa. Biohajoavia muovipusseja voi laittaa biojätteeseen biojätepusseina, mutta muuten ne kuuluvat sekajätteeseen. (HSY 2024a).

PE-LD:stä valmistetuista tuotteista pakkaukset kierrätetään Suomessa muovipakkauksina, ja muut kuin pakkaukset sekajätteenä. (HSY 2024b.) Muovinkeräyksen kautta kerätystä muovista osa päätyy uusiokäyttöön, osa energiapoltoon (Muoviteollisuus ry 2024d). Sekajätteenä lajiteltu muovi puolestaan päätyy muun sekajätteen mukana energiakäyttöön eli poltettavaksi. (Fortum 2018.)



Kuva 3. Muovin kierrätyspolut.

Kuva 3 havainnollistaa ylätasoisesti muovin kierrätyspolkuja. On hyvä huomata, että vuonna 2022 vain noin 33–35 % markkinoille saatetuista muovipakkauksista lajiteltiin muovinkeräykseen (Surakka 2023). Tästä voitaneen päätellä suurimman osan muovipakkauksista

päätyneen sekajätteenä poltettavaksi. Samaan aikaan suuri osa erilliskerätystäkin muovista päätyy lopulta energiapolttoon: vuonna 2019 vain noin 37 % erilliskerätystä muovipakkausjätteestä jalostettiin uusiomuoviksi. Tärkein tekijä alhaisen uusiokäyttöasteen takana oli uusiomateriaalin matala kysyntä. (Miettinen 2021.) Mikäli tilanteen oletetaan uudempien tilastotietojen puutteessa säilyneen jokseenkin muuttumattomana, tarkoittaa tämä sitä, että kaikesta muovipakkausmateriaalista vain noin 12–13 % uusiokäytetään.

4.4 Fossiilivapaata muovia kierrätyshiilidioksidista

Fossiilivapaiden hiilivetyypohjaisten muovien valmistaminen on mahdollista kierrätyshiilidioksidia ja vihreä vetyä raaka-aineina käyttäen. Tunnetut tekniikat käsittävät useita välivaiheita, joiden kautta lähtöaineet jalostetaan lopputuotteeksi. Esimerkiksi polyeteenin tapauksessa edellä mainituista raaka-aineista tuotetaan ensin metaania, joka jalostetaan eteeniksi, josta voidaan syntetisoida polyeteeniä. (Palm, Nilsson & Åhman 2016.) Perinteisesti polyeteenin tuottamiseen tarvittava eteeni on tuotettu hajottamalla suurempia hiilivetyjä, enimmäkseen öljynjalostuksen sivutuotteita (IARC 1994).

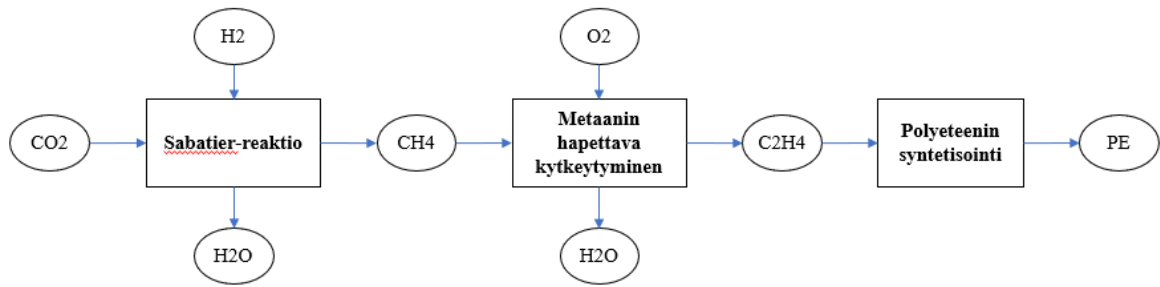
Metaani valmistetaan yhtälön (1) mukaisesti Sabatier-reaktiolla, jossa vety (H_2) ja hiilidioksidi (CO_2) reagoivat muodostaen metaania (CH_4) ja vettä (H_2O). (Palm ym. 2016.)



Metaanin hapettavalla kytkeytymisellä saadaan metaanista ja hapestaa valmistettua eteeniä (C_2H_4) ja vettä yhtälön (2) mukaisesti. (Palm ym. 2016.)



Kuva 4 havainnollistaa hiilidioksidin ja vedyn matkaa polyeteeniksi yllä kuvattujen reaktioiden kautta.



Kuva 4. Polyeteenin valmistaminen hiilidioksidista ja vedystä. (Palm ym. 2016)

Myös esimerkiksi polypropeenin valmistaminen hiilidioksidista ja vedystä on mahdollista. Tällöin metaanista ja hapesta muodostetaan ensin metanolia, metanoli jalostetaan dimetyylieetteriksi ja dimetyylieetteri propeeniksi, josta voidaan tämän jälkeen käyttää monomeerina polypropeenin valmistuksessa. (Palm ym. 2016.)

Vuonna 2022 muoveja tuotettiin globaalisti 400,3 megatonnia, mistä yli 90 %:ssa raaka-ainelähde oli fossiilinen. Polyeteenit kattoivat tuotannosta yhteensä 26,3 % ja polypropeeni 18,9 %. Mikäli siis pelkästään näiden kahden polymeerin tuotanto onnistuttaisiin muuttamaan laajamittaisesti kierrätyshiilidioksidin ja vihreään vetyyn perustuvaksi, olisi sillä mittava vaikutus fossiilisten raaka-aineiden tarpeeseen muovien valmistuksessa. (Plastics Europe 2023.)

Lisäksi liitteessä 1 esitettyjen laskelmien mukaisesti näin saataisiin vuositason sidottua noin 568 megatonnia hiilidioksidia, joka vastaa 1,5 prosenttia kaikista teollisuuden ja fossiilisten polttoaineiden vuosittain aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. Lukema on myös samaa suuruusluokkaa kappaleessa 2.3 esitettyjen jo käytössä olevien, paraikaa rakennettavien ja suunniteltujen hiilidioksidin talteenottolaitosten tuotantokapasiteettien kokonaissumman (593 megatonnia hiilidioksidia vuodessa) kanssa.

Rakennusmateriaaleissa käytettäviä polykarbonaatteja ja iskunvaimennukseen sopivaa polyuretaania pyritään myös valmistamaan kaapatusta hiilidioksidista (Styring ym. 2011).

Suomessa Fortumilla on käynnissä hanke, jossa pilotoidaan muovien tuottamista talteen otetusta hiilidioksidista (Fortum 2023b). Fortumin Riihimäen jätteenpolttolaitoksella toteutettavan pilotin ensimmäisessä vaiheessa laitoksen savukaasuista kaapattiin hiilidioksidia ja tuotettiin siitä onnistuneesti metaania. Hankkeen seuraavassa vaiheessa on määrä löytää sopivimmat ratkaisut muovin valmistamiseen kaapatusta hiilidioksidista. (Fortum 2023c.)

Myös itävaltalainen Borealis AG on vuonna 2022 tiedottanut rakentavansa vuoden 2024 aikana testilaitoksen, jossa on määrä selvittää mahdollisuuksia hiilidioksidin kaappaamiseen ja käyttämiseen muovien valmistuksessa. Borealisen testilaitos on osa VTT:n koordinoimaa Forest CUMP -tutkimusprojektia, jossa on mukana runsaasti muitakin yrityksiä sekä LUT-yliopisto. (Borealis AG 2022.)

5 Hiilidioksidin kierrättämisen makrotason vaikutukset

Ilmastonmuutosta, jota ilmakehän kasvava hiilidioksidipitoisuus edistää, pidetään ihmiskunnan ja nykykulttuurimme kannalta eksistentiaalisena uhkana (EUR-Lex 2024). Jo tästä syystä hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä talteenoton kautta voidaan nähdä suuri vaikutusmahdollisuus koko ihmiskunnan hyvinvointiin.

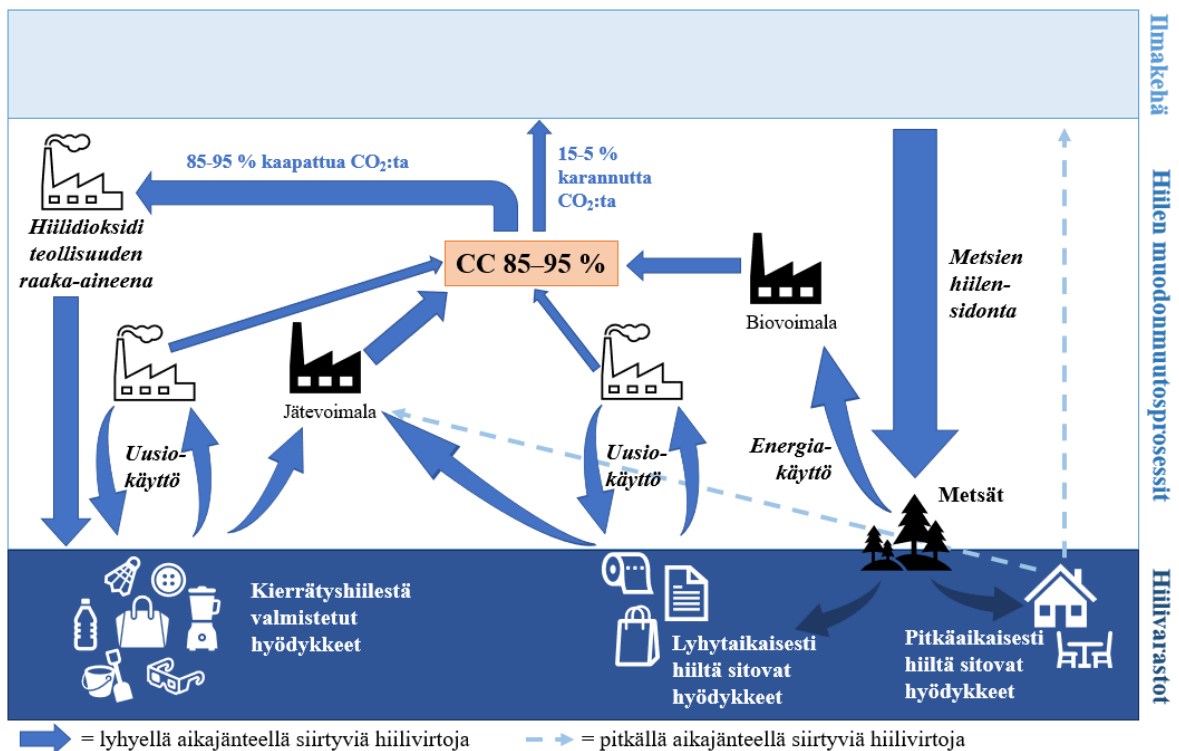
Talteen otettua hiilidioksidia itsessään ei vielä tänä päivänä pidetä kovinkaan arvokkaana resurssina. Hiilidioksidin kysyntä on hyvin pientä suhteessa antropogeenisiin hiilidioksidipäästöihin: IEA:n vuonna 2019 julkaistun arvion mukaan hiilidioksidin vuotuinen kysyntä oli tuolloin noin 230 megatonnia (IEA 2019), kun taas teollisuudesta ja fossiilisista polttoaineista lähtöisin olevat hiilidioksidipäästöt olivat vastaavasti noin 37 gigatonnia (Global Carbon Budget 2023), eli yli 160-kertaiset kysyntään nähden. Nykytilanteessa läheskään kaikelle päästettävälle hiilidioksidille ei siis löytyisi loppukäyttöä, vaikka se onnistuttaisiinkin kaappaamaan savukaasuista talteen. Taloudelliset kannustimet pelkälle hiilidioksidin talteenotolle ovat tällöin heikot.

Hiilidioksidin uudelleenkäyttöön liittyvien teknisten ratkaisujen kehittyessä ja yleistyessä asetelma kuitenkin muuttuu. Mikäli talteen otettua hiilidioksidia voidaan kannattavasti käyttää raaka-aineena uusille tuotteille, on talteenottajan mahdollista muuttaa päästönsä arvokkaiksi resursseiksi. Talteenoton kannattavuuteen vaikuttaa paitsi talteen otetusta hiilidioksidista saatava hinta, myös esimerkiksi energian ja muiden tuotantopanosten hinnat sekä hiilidioksidipäästöjen kustannukset esimerkiksi EU-päästökaupan kaltaisten mekanismien kautta.

Samalla hiiltä voitaisiin toisaalta sitoa käytännössä ikuisiin tuotteisiin, toisaalta muodostaa suljettuja kiertoja (Styring ym. 2011): hiili matkaa tehtaasta tuotteessa kuluttajalle ja tuotteen käytön jälkeen kiertää mahdollisesti materiaalin uusiokäytön kautta ensin yhden tai useamman kerran uusiotuotteeksi. Materiaalin elinkaaren lopussa se siirtyy jätepoltoon, poltossa hiilidioksidin talteenoton kautta takaisin raaka-aineeksi, ja jälleen tehtaalle uuden tuotteen valmistusmateriaaliksi.

Hiilen kiertoa CCU-tekniikkaa ja bioenergiaa laajamittaisesti hyödyntävää järjestelmää mallintavassa kuvassa 3 on nähtävissä edellä esitetyn kaltaisia suljettuja kiertoja sekä niiden

rinnalla tapahtuva hiilen sitoutuminen ja käyttöönnotto biomassan kautta. Kuvassa oranssi suorakulmio ”CC 85–95 %” edustaa hiilidioksidin talteenottoa, joka voi saavuttaa korkeimmillaan hyötysuhteen 85–95 %, kuten CCU:ta esittelevästä kappaleesta jo tiedetään. Metsät on sijoitettu kuvassa hiilivarastojen ja hiilen muodonmuutosprosessien rajapintaan siksi, että ne toisaalta prosessoivat hiiltä ilmakehästä kiinteään muotoon, toisaalta toimivat myös itse varastoina.



Kuva 5. Hahmotelma hiilen kierrosta CCU-tekniikkaa ja bioenergiaa laajamittaisesti hyödyntävässä järjestelmässä.

Yhtenä CCU:n vahvuutena on, että se vähentää aineiden uusiokäytön riippuvuutta kuluttajan toiminnasta. Tällä hetkellä yhteiskuntatason kyvykkyys kierrättää esimerkiksi muovia tai biopohjaisia raaka-aineita riippuu pitkälti siitä, lajittelevatko kuluttajat jätteensä oikeisiin jakeisiin – ja kuten muovien kierrätystä käsittelevässä kappaleessa todettiin, on tässä nykypäivänä vielä runsaasti parannettavaa. Hiilidioksidi puolestaan on otettavissa talteen mistä tahansa poltettavaksi päätyvästä jätteestä, jolloin aiheutuu vähemmän haittaa siitä, vaikkei kuluttaja lajittelisi jätteitään lainkaan, vaan heittäisi kaiken jätteensä sekajätteeseen. Samoin

uusiokäyttöön jo syystä tai toisesta kelpaamattomia hiilipohjaisia materiaaleja poltettaessa voitaisiin niihin sitoutunut hiili saada taltioitua uusiokäyttöön.

CCU:ta laajasti käytävää järjestelmään liittyvä pitkän tähtäimen epävarmuustekijä on yhteiskunnan kehittyminen vähähiilisemmäksi: ilman hiilidioksidipitoisia savukaasuja ei hiilidioksidin talteenottoon onnistu. Siispä mikäli hiilidioksidin pistelähteet ehtyisivät, jäisi valmistettu CCU-tekniikka tarpeettomaksi, ja jos yhteiskunta olisi kehittynyt laajalti riippuvaiseksi CCU:lla tuotetuista hyödykkeistä, aiheutuisi tästä ongelmia. Tämä voisi osaltaan lisätä DAC:n, eli hiilidioksidin suoraan ilmakehästä sitomisen, houkuttavuutta, kun hiilidioksidin kasvanut kysyntä yhdessä pienenevän tarjonnan kanssa oletettavasti nostaisi hiilidioksidin markkinahintaa ja parantaisi vähemminkin tehokkaan hiilidioksidin kaappausprosessin kannattavuutta.

Huvenneiden hiilidioksidipäästöjen maailmassa voitaisiin myös CCU:n ja bioenergian käytön yhdistelmällä saavuttaa jopa negatiiviset hiilidioksidipäästöt ja saada samalla taltioitua hiiltä raaka-ainekäyttöön. Suomen kaltaiselle paljon bioenergiaa tuottavalle maalle tämä on hyvä uutinen. Periaate on yksinkertainen: metsät sitovat kasvaessaan hiilidioksidia, ja toimivat samalla myös hiilivarastoina (Watson ym. 2000). Tarpeeksi vanhoiksi tultuaan puut muuttuvat kuitenkin hiilinieluista päästölähteiksi, kun ne alkavat hajotessaan vapauttaa sitomaansa hiilidioksidia (Harris & Gibbs 2021). Hiilen sidonnan kannalta tulisi tällöin tehokkaammaksi polttaa lahoava puu ja ottaa talteen siihen sitoutunut hiili, kuin antaa hiilen karata vähitellen hiilidioksidina ilmakehään.

Tällä hetkellä maapallon metsien arvioidaan sitovan noin 7,6 gigatonnia hiilidioksidia vuosittain (Streiff 2021), mikä on noin 21 prosenttia ihmiskunnan vuositasolla päästämästä hiilidioksidista, kun maankäytön muutoksia ei huomioida. Mikäli metsät kuitenkin sitoisivat enemmän hiilidioksidia, kuin ilmakehään päästettäisiin, ja niitä käytettäisiin bioenergiaksi ottaen samalla tästä syntyvät hiilidioksidipäästöt talteen, minkä jälkeen talteen otettu hiilidioksidi sidottaisiin pitkäikäisiin tai suljetun hiilikierron tuotteisiin, voitaisiin hiilidioksidin määrää ilmakehässä aktiivisesti laskea.

Se, että metsät sitoisivat vuosittain enemmän hiilidioksidia, kuin mitä vuosipäästöt olisivat, edellyttäisi, että hiilidioksidipäästöt vähenisivät ja/tai metsäpinta-alaa kasvatettaisiin riittävästi. Tämän lisäksi pitkän tähtäimen onnistuminen negatiivisissa hiilidioksidipäästöissä

toki edellyttäisi, että bioenergiakäyttöön kaadettavaa metsää korvattaisiin vastaavasti uudella.

CCU:n käyttö vähentäisi luonnollisesti myös fossiilisten raaka-aineiden tarvetta. Näin voitaisiin lisätä omavaraisuutta Suomen kaltaisissa valtioissa, joilla ei ole omia merkittäviä fossiilisten raaka-aineiden lähteitä, ja vähentää riippuvuutta fossiilisista raaka-aineista sekä niitä myyvistä valtioista. (Styring ym. 2011.)

Omavaraisuuden hyödyllisyydestä on saatu konkreettisia näytteitä viimeksi varsin hiljattain. Ukrainan sodan alettua Venäjä, joka oli sodan alkaessa Euroopan tärkein maakaasun toimittaja (European Council 2024), on eri yhteyksissä kiristänyt EU-maita kaasutoimitusten supistamisella ja katkaisemisella, kun ne ovat toteuttaneet sen kannalta epämieluisia toimia (Pennanen 2022). Kahden ensimmäisen sotavuoden aikana nähtiinkin mm. kaasutoimitusten supistuminen sekä piikkejä niin sähkön kuin polttoaineidenkin hinnoissa (IS 2023), eikä riippuvuudesta silti päästy täysin eroon, sillä vuonna 2023 Venäjä vastasi edelleen 15 prosentista EU:n yhteenlasketusta maakaasu- ja LNG-tuonnista (European Council 2024) ja Venäjän energian myynnistä saadut tulot jopa kasvoivat sodan alkuaikoina merkittävästi (Taussi & Saarikoski 2022). Fossiiliriippuvuuden pienentämisen voidaankin katsoa palvelevan myös tästä näkökulmasta esimerkiksi Suomen kaltaisen maan intressejä.

6 Johtopäätökset

Hiilidioksidin talteenotolla (CCU) ja uusiokäytöllä on parhaimmillaan potentiaali mullistaa maailmaa. Yhdistettynä vihreän vedyn tuotantoon se tarjoaa erityisesti Suomen kaltaisille kasvavan uusiutuvan energiasektorin, runsaiden biopohjaisten hiilidioksidinlähteiden ja korkeiden vesivarantojen maille mahdollisuuden irtautua fossiilisista polttoaineista muuntamalla jätteitä resursseiksi. Äärimmillään voidaan ajatella, että ne maat, joilla on kyky sitoa eniten hiiltä ja jalostaa sitä esimerkiksi polttoaineiksi tai erilaisiksi raaka-aineiksi, voivat nousta asemaan, jossa suuret fossiilisten raaka-aineiden tuottajamaat ovat perinteisesti olleet.

Samalla laajamittainen CCU:n käyttö tarjoaa mahdollisuuden laittaa ilmastonmuutosta aiheuttavat hiilidioksidipäästöt kuriin: hiilelle voidaan luoda suljettuja kiertoja, fossiilisten raaka-aineiden käyttöä voidaan vähentää ja kuluttajien vastuu raaka-aineiden kierrosta vähenee.

Siinä, missä hiilidioksidin talteenotto ja säilöntä (CCS) tähtää hiilidioksidin pysyvään kierrosta poistamiseen, menetetään samalla mahdollisuus käyttää siinä olevaa hiiltä resurssina. Vaikka monet hiilipäästöjä perinteisesti tuottaneet prosessit voidaankin dekarbonisoida, pohjautuvat monet materiaalit, kuten muovit, hiileen. Niin pitkään, kun hiilipohjaisia materiaaleja valmistetaan, tarjoaakin CCU ilmastonmuutosta ajatellen paremman vaihtoehdon fossiilisille hiilivedyille.

CCU on toki vaihtoehto vain niin pitkään, kuin hiilidioksidipäästöjä syntyy. Yhdistetyllä CCU:n ja bioenergian käytöllä kuitenkin voitaisiin parhaimmillaan saavuttaa jopa negatiiviset hiilidioksidipäästöt, mikäli uutta hiiltä ei tuotaisi ilmakehään, yhteyttävät kasvit sitoisivat jo ilmakehässä olevaa hiiltä ja hiili sidottaisiin sitten kasvien polton ja hiilidioksidin talteenoton kautta pitkäikäisiin tuotteisiin.

CCU-prosessit ovat kuitenkin vielä hyvin energiantensiivisiä, mikä heikentää kannattavuutta ja tekee energiantuotannon hiilidioksidipäästöistä merkittävän tekijän prosessin kokonaispäästövaikutuksia pohdittaessa. Tekniikan kehittämistä myös hidastaa esimerkiksi se, ettei esimerkiksi EU-lainsäädäntö tunnista CCU:lla valmistettuja tuotteita omaksi ryhmäkseen, vaan kohtelee niitä samoin kuin fossiilisperäisiä vastineitaan.

Voidaankin todeta CCU:lla olevan potentiaalia muuttaa niin valtioiden välisiä voimasuhteita kuin ilmaston tulevaisuuttakin, mutta samalla tekniikan käyttöönoton vauhdittamiseksi tarvitaan paitsi teknisiä edistysaskeleita ja infrastruktuurin kehitystä muun muassa riittäviä uusiutuvan energian lähteitä ajatellen, myös asian aktiivista edistämistä lainsäädännön tasolla.

Aiheeseen liittyen löytyy myös paljon potentiaalisia jatkotutkimuksen kohteita. Kiinnostavaa olisi esimerkiksi laskea polyeteenin ja polypropeenin lisäksi muiden hiilipitoisen, pitkäikäisten materiaalien tämänhetkistä vuosituotantoa vastaavien määrien fossiilivapaan valmistamisen vaatimia hiilidioksidimääriä. Samoin voitaisiin laatia pitkän tähtäimen ennusteita, joissa materiaalien kierrätyshiilipohjaisen valmistamisen vaatimia hiilidioksidimääriä verrattaisiin ihmiskunnan vuosittaisiin hiilidioksidipäästöihin nyt ja lähivuosikymmeninä, kun otetaan huomioon toisaalta antropogeenisten hiilidioksidipäästöjen odotetut muutokset, toisaalta mahdollisesti ennustetut muutokset eri materiaalien tuotantomäärissä. Näin voitaisiin esimerkiksi selvittää, mitä materiaaleja kierrätyshiilidioksidilla valmistamalla voitaisiin saavuttaa suurimpia päästöhyötyjä, ja toisaalta, onko näköpiirissä, että dekarbonisaatiokehityksen myötä kaapattavan hiilidioksidin määrät tulisivat jossakin vaiheessa laskemaan alle CCU-tuotannon edellyttävän määrän.

Mikäli tutkimuksessa havaittaisiin hiilidioksidipäästöjen laskevan todennäköisesti jossain vaiheessa niin alas, ettei niistä saatavilla hiilimäärillä enää saataisi tyydytettyä ihmiskunnan materiaalitarpeita, voitaisiin seuraavaksi tutkia, kuinka suuri määrä biomassaa tulisi polttaa hiilivajeen paikkaamiseksi, kuinka paljon energiaa siitä saataisiin, kuinka paljon metsä- tai muuta biomassan kasvatuspinta-alaa se vaatisi ja kuinka paljon hiiltä saataisiin näin poistettua pitkäaikaisesti kierrosta. Tämän jälkeen seuraava kysymys luonnollisesti olisi, voidaanko tällainen määrä biomassaa kasvattaa ja kuluttaa kestävästi.

Näiden kysymysten kautta saataisiin tietoa siitä, minkälainen toimintaympäristö CCU-tekniikoilla voisi pitkällä tähtäimellä olla ja minkä suuruisiin negatiivisiin hiilidioksidipäästöihin CCU:n avulla voitaisiin kenties odottaa ennen pitkää päästävän.

Mikäli taas ensiksi mainitussa tutkimuksessa todettaisiin hiilidioksidipäästöjen ylittävän pitkäikäisiin tuotteisiin sidottavissa olevan määrän nyt ja tulevaisuudessa, tarkoittaa se sitä, että uusien hiilidioksidin käyttökohteiden etsimiselle on entistäkin vahvemmat perusteet. Tällöin olisi luontevaa, että jatkotutkimuskin painottuisi enemmän sille saralle.

Lähteet

Bhandari, R., Trudewind, C.A. & Zapp, P. 2014. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 85, 151–163. Viitattu 1.6.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>

Borealis AG 2022. SPIRIT-ohjelman Forest CUMP-projektissa selvitetään talteenotetun hiilidioksidin hyödyntämistä muovien valmistuksessa. Viitattu 5.5.2024. Saatavissa <https://www.borealisgroup.com/news/spirit-ohjelman-forest-cump-projektissa-selvitet%C3%A4%C3%A4n-talteenotetun-hiilidioksidin-hy%C3%B6dynt%C3%A4mist%C3%A4-muovien-valmistuksessa>

Bower, D.I. 2002. *An Introduction to Polymer Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Braun, D., Cherdrón, H. & Ritter, H. 2001. *Polymer Synthesis: Theory and Practice. Fundamentals, Methods, Experiments*. 3.painos. Springer.

Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J.H., Abu-Omar, M., Scott, S.L. & Suh, S. 2020. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. Vol. 8 (9), 3494–3511. Viitattu 18.4.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>

Cuéllar-Franca, R.M. & Azapagic, A. 2015. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO2 Utilization*. Vol. 9, 82–102. Viitattu 4.1.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>

EUR-Lex 2024. Ympäristö ja ilmastonmuutos. Viitattu 29.2.2024. Saatavissa https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/environment.html?locale=fi&root_default=SUM_1_CO-DED%3D20

Euroopan komissio 2024. Ilmastonmuutoksen syyt. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fi

Euroopan parlamentti 2022. EU:n päästökauppajärjestelmä ja sen uudistaminen. Viitattu 23.3.2024. Saatavissa <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20170213STO62208/eu-n-paastokauppajarjestelma>

European Council 2024. Infographic - Where does the EU's gas come from? Viitattu 29.2.2024. Saatavissa <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/>

Fortum 2018. Sekajäte palaa kotiin energiana. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa <https://yh-dessa.fortum.fi/energiansaasto/sekajate-palaa-kotiin-energiana>

Fortum a 2023. Voisiko hiilen talteenotto olla ratkaisu kierrä-ty-sasteen nosta-miseen? Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoiille/carbon2x/voisiko-hiilen-talteenotto-olla-ratkaisu-kierr%C3%A4tysasteen-nostamiseen>

Fortum b 2023. Fortum Recycling & Waste investoi hiili-dioksiidi-pohjaisten muovien tuotantoon. Viitattu 2.3.2024. Saatavissa <https://www.fortum.fi/media/2023/10/fortum-recycling-waste-investoi-hiilidioksidipohjaisten-muovien-tuotantoon>

Fortum c 2023. Fortumin pilotointi jätteen-polton hiili-dioksiidi-päästöjen talteen-otosta ja hyödyn-tä-misestä onnistui – suunnitelma fossiilivapaan muovin valmistuksesta etenee. Fortum. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://www.fortum.fi/media/2023/02/fortum-pilotointi-jatteenpolton-hiilidioksidipaastojen-talteenotosta-ja-hyodyntamisesta-onnistui-suunnitelma-fossiilivapaan-muovin-valmistuksesta-etenee>

Gielen, D., Taibi, E. & Raul, M. 2019. Hydrogen - A Renewable Energy Perspective. International Renewable Energy Agency, IRENA. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://appknovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/kn/resources/kpHAREP003/toc?cid=kpHAREP003>

Global Carbon Budget 2023. Annual CO₂ emissions (with major processing by Our World in Data). Viitattu 29.2.2024. Saatavissa https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country?country=~OWID_WRL

Harris, N. & Gibbs, D. 2021. Forests Absorb Twice As Much Carbon As They Emit Each Year. World Resources Institute. Viitattu 2.3.2024. Saatavissa <https://www.wri.org/insights/forests-absorb-twice-much-carbon-they-emit-each-year>

HSY 2024a. Biohajoava muovi. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa <https://www.hsy.fi/jatteet-ja-kierratys/jateopas/jatteet/biohajoava-muovi/>

HSY 2024b. Muovit. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa <https://www.hsy.fi/jatteet-ja-kierratys/jateopas/jatteet/muovi/>

IARC 1994. Some Industrial Chemicals. Viitattu 3.5.2024. Saatavissa <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Industrial-Chemicals-1994>

IEA 2023. Global Hydrogen Review 2023. International Energy Agency (IEA). Saatavissa <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/Global-HydrogenReview2023.pdf>

IEA 2019. Putting CO₂ to Use. Viitattu 29.2.2024. Saatavissa <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>

IEA a 2024. CCUS Projects Database - Data product. Viitattu 5.5.2024. Saatavissa <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database>

IEA b 2024. Finland. Viitattu 2.3.2024. Saatavissa <https://www.iea.org/countries/finland/energy-mix>

IS 2023. Pääkirjoitus: Putinin energia-aseessa on yhä panoksia jäljellä – halpa sähkö voi olla harhaa. Ilta-Sanomat. Viitattu 2.3.2024. Saatavissa <https://www.is.fi/paakirjoitus/art-2000009866270.html>

Kajova, J. & Ojanperä, S. 2024. EU vauhdittaa vetytalouden kasvua tuotantotuella – Lahden vetyhanke pääsi yhtenä harvoista pottiin kiinni. Yle Uutiset. Viitattu 5.5.2024. Saatavissa <https://yle.fi/a/74-20086717>

Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J. & Jäger-Waldau, A. 2021. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*. Vol. 228, 113649. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>

Lassila & Tikanoja 2024. Muovinkeräys. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa <https://www.lt.fi/fi/henkiloasiakkaat/kierratys/kierratysbotti/muovinkerays>

Lee, K.S., Cho, J. & Lee, J.H. 2020. Introduction. Teoksessa Lee, K.S., Cho, J., & Lee, J.H.(toim.) *CO2 Storage Coupled with Enhanced Oil Recovery*. Cham: Springer International Publishing. 1–11. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa https://doi.org/10.1007/978-3-030-41901-1_1

Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Linssen, J., Zapp, P., Bongartz, R., Schreiber, A. & Müller, T.E. 2012. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. *Energy & Environmental Science*. Vol. 5 (6), 7281–7305. Viitattu 5.1.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1039/C2EE03403D>

Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M. & Meyer, L. 2005. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Miettinen, L. 2021. Suurin osa kodeissa lajitellusta muovijätteestä päätyi poltettavaksi – MOT selvitti, kuinka hyvin muovin kierrätys onnistuu. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa <https://yle.fi/a/3-11865230>

Muoviteollisuus ry 2024a. Muovien määrittely. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_maarittely/

Muoviteollisuus ry 2024b. Sanasto. Viitattu 8.2.2024. Saatavissa <https://www.plastics.fi/sanasto>

Muoviteollisuus ry c 2024. Muovien luokitus. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/

Muoviteollisuus ry d 2024. Muovien kierrätys. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/muovien_kierratys/

Mäntylä, J.-M. 2023. Suomessa on tapahtumassa kaikessa hiljaisuudessa vetyvallankumous – katso kartalta, yltääkö vihreä siirtymä kotikuntaasi. Yle Uutiset. Viitattu 5.5.2024. Saatavissa <https://yle.fi/a/74-20014811>

Mäntylä, J.-M. & Hukkanen, V. 2023. Yle selvitti: Vetyhankkeiden piti tuoda Suomeen paljon töitä ja rahaa, mutta nyt moni projekti yhtäkkiä sakkaa. Yle Uutiset. Viitattu 5.5.2024. Saatavissa <https://yle.fi/a/74-20065871>

National Institute of Standards and Technology 2023. *NIST Chemistry WebBook*. Viitattu 3.5.2024. Saatavissa <https://webbook.nist.gov/chemistry/>

OECD 2022. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Viitattu 18.4.2024. Saatavissa https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en

Olajire, A.A. 2013. A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 109, 364–392. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>

Pahwa, P.K. & Pahwa, G.K. 2014. Hydrogen Economy. New Delhi: The Energy and Resources Institute. Viitattu 2.1.2024. Saatavissa <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=1219186&site=ehost-live>

Palm, E., Nilsson, L.J. & Åhman, M. 2016. Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide. Journal of Cleaner Production. Vol. 129, 548–555. Viitattu 21.3.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.158>

Pennanen, V. 2022. Kreml hämmentää energiakriisin todellisia syitä – EU: Venäjä käyttää energiaa aseena. Viitattu 2.3.2024. Saatavissa <https://yle.fi/a/3-12609959>

Plastics Europe 2024. How plastics are made. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa plasticseurope.org/plastics-explained/how-plastics-are-made/

Plastics Europe 2023. Plastics - the fast Facts 2023. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>

Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P. & Patronen, J. 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Valtioneuvoston kanslia. Viitattu 2.1.2024. Saatavissa <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163901>

Streiff, L. 2021. NASA Satellites Help Quantify Forests' Impacts on Global Carbon Budget. NASA. Viitattu 29.2.2024. Saatavissa <https://www.nasa.gov/science-research/earth-science/nasa-satellites-help-quantify-forests-impacts-on-global-carbon-budget/>

Styring, P., Jansen, D., de Coninck, H., Reith, H. & Armstrong, K. 2011. Carbon Capture and Utilisation in the green economy - Using CO₂ to manufacture fuel, chemicals and materials. The Centre for Low Carbon Futures 2011 and CO₂Chem Publishing 2012.

Surakka, M. 2023. Vuonna 2022 pantittomien muovipakkausten keräys- ja kierrätysaste kasvoivat maltillisesti. Viitattu 9.2.2024. Saatavissa <https://sumi.fi/2023/06/20/vuonna-2022-pantittomien-muovipakkausten-kerays-ja-kierratysaste-kasvoivat-maltillisesti/>

Surampalli, R.Y., Zhang, T.C., Tyagi, R.D., Naidu, R., Gurjar, B.R., Ojha, C.S.P., Yan, S., Brar, S.K., Ramakrishnan, A. & Kao, C.M. 2015. Carbon Capture and Storage - Physical, Chemical, and Biological Methods. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE). Viitattu 11.1.2024. Saatavissa https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/view/khtml/show.v/rcid:kpCCSPCBM8/cid:kt00UC5E63/viewerType:khtml/root_slug:carbon-capture-storage/url_slug:front-matter?&b-toc-cid=kpCCSPCBM8&b-toc-root-slug=carbon-capture-storage&b-toc-

title=Carbon%20Capture%20and%20Storage%20-%20Physical%2C%20Chemical%2C%20and%20Biological%20Methods&b-toc-url-slug=introduction&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=1

Taussi, S. & Saarikoski, J. 2022. Näin Venäjä teki energia-aseen, josta koko Eurooppa nyt kärsii – pakotteet eivät estäneet Kremlin sotakassaa karttumasta. Saatavissa <https://yle.fi/a/3-12611565>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2023. Valtioneuvoston periaatepäätös vedystä. Helsinki: Valtioneuvosto. Saatavissa <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-990-8>

Vairimaa, R. 2023. Sieppari tehtaaniipussa — hiilidioksidin talteenotto auttaisi ilmastoa, mutta toistaiseksi se kuluttaa paljon energiaa. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/ilmastonmuutos/sieppari-tehtaaniipussa-hiilidioksidin-talteenotto-auttaisi-ilmastoa-mutta-toistaiseksi-se-kuluttaa-paljon-energiaa>

Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J. & Dokken, D.J. 2000. Carbon Pools that Could be Considered and How They are Impacted by ARD Activities. Cambridge: IPCC. Saatavissa archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=131

Wilcox, J. 2012. Carbon Capture. New York, NY: Springer. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2215-0>

Young, R.J. & Lovell, P.A. 1981. Introduction to Polymers. 2. London: Chapman & Hall.

Zaman, A. & Newman, P. 2021. Plastics: are they part of the zero-waste agenda or the toxic-waste agenda? Sustainable Earth. Vol. 4 (1), 4. Viitattu 18.4.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1186/s42055-021-00043-8>

Liite 1. Laskelmat PE:n ja PP:n valmistamisen vuosittain sitomista hiilimääristä.

Laskelmien pohjana käytetyille lähtötiedoille merkityt lähteet löytyvät kandidaatintyön lähdeluettelosta. Osa laskelmissa esitetyistä arvoista on esitystavan selkeyden vuoksi pyöristetty, kun taas varsinaisessa laskennassa on käytetty tarkkoja arvoja. Tästä syystä on mahdollista, että joissakin ilmoitetuissa tuloksissa ilmenee desimaalitason eroja raportilla esitettyjen arvojen pohjalta tehtäviin laskelmiin nähden.

Laskelmissa on yksinkertaistamisen vuoksi oletettu polyeteenin (PE) ja polypropeenin (PP) olevan rakenteeltaan lineaarisia ja vailla poikkeamia – toisin sanoen niiden oletetaan vastaavan kemialliselta koostumukseltaan pitkää ketjua yhteen linkittyneitä eteeni- tai propeenimolekyylejä. Laskelmissa on jätetty huomioimatta polymeeriketjujen kärjissä olevat yksittäiset vetyatomit, sillä tuhansista tai kymmenistä tuhansista eteeni- tai propeenimolekyyleistä koostuvassa polymeerissä yksittäisten vetyatomien vaikutus koko polymeerin molekyyliin on häviävän pieni.

Lähtötiedot:

	Symboli	Määrä	Yksikkö	Lähde
Moolimassat:				
Hiili (C)	M_C	12,0107	g/mol	(National Institute of Standards and Technology 2023)
Vety (H ₂)	M_{H_2}	2,01588	g/mol	National Institute of Standards and Technology 2023)
Happi (O ₂)	M_{O_2}	31,9988	g/mol	National Institute of Standards and Technology 2023)
Globaalit vuosittaiset hiilidioksidipäästöt (pl. maankäytön muutokset) 2019:				
	m_{CO_2} -päästöt	37	Gt	(Global Carbon Budget 2023)
Vuonna 2022:				
Muovien vuosittainen tuotantomäärä	m_{muovit}	400,3	Mt	(Plastics Europe 2023)
PE:n osuus vuosituoannosta	$m\text{-}\%_{PE}$	26,3	%	(Plastics Europe 2023)
PP:n osuus vuosituoannosta	$m\text{-}\%_{PP}$	18,9	%	(Plastics Europe 2023)

Laskelmat:

Koska polyeteenin oletetaan koostuvan pitkästä ketjusta eteenimolekyylejä, ja polypropeeniketjun vastaavasti pitkästä ketjusta propeenimolekyylejä, voidaan näihin muoveihin vuosittain sitoutuvan hiilen määrää arvioida käyttämällä hiilen massaosuutta, joka voidaan laskea eteenin ja propeenin moolimassoista sekä niihin sisältyvistä hiilimääristä.

Eteenimolekyyli koostuu kahdesta hiili- ja neljästä vetyatomista. Näin ollen sen moolimassa $M_{C_2H_4}$ voidaan laskea seuraavasti:

$$M_{C_2H_4} = 2M_C + 2M_{H_2} \quad (1)$$

$$M_{C_2H_4} = 2 \cdot 12,0107 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 2 \cdot 2,01588 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (2)$$

$$M_{C_2H_4} = 28,0532 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (3)$$

Tästä hiiltä on kahden hiiliatomin moolimassan verran, eli $m_{C/C_2H_4} = 2 \cdot 12,0107 \text{ g/mol} = 24,0214 \text{ g/mol}$. Hiilen massaosuus $w_{C,E}$ voidaan tällöin laskea jakamalla eteenimoolin sisältämän hiilen paino eteenin moolimassalla:

$$w_{C/C_2H_4} = \frac{m_{C/C_2H_4}}{M_{C_2H_4}} \quad (4)$$

$$w_{C/C_2H_4} = \frac{24,0214 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{28,0532 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \quad (5)$$

$$w_{C/C_2H_4} = 85,6 \% \quad (6)$$

Propeenimolekyyli koostuu kolmesta hiili- ja kuudesta vetyatomista. Hiilen ja vedyn välinen suhde on siis identtinen eteenin kanssa: yksi hiiliatomi kahta vetyatomia kohden. Näin ollen hiilen massaosuus propeenissa on sama, kuin eteenissä:

$$w_{C/C_3H_6} = w_{C/C_2H_4} = 85,6 \% \quad (7)$$

Muovien vuosittainen tuotantomäärä on 400,3 Mt, ja tästä polyeteeniä on 26,3 %, polypropeenaa puolestaan 18,9 %. PE:n vuosituotanto on näin ollen 105,3 Mt ja PP:n 75,7 Mt. Hiilen

massaosuuden avulla voidaan näin ollen laskea, että vuoden polyeteenin tuotanto sitoo hiiltä noin 90,15 Mt ja polypropeenin noin 64,78 Mt – yhteensä siis 154,93 Mt.

Hiilidioksidimolekyylä koostuu yhdestä hiili- ja kahdesta happiatomista, jolloin sen moolimassa, M_{CO_2} , on $12,0107 \text{ g/mol} + 31,9988 \text{ g/mol} = 44,0095 \text{ g/mol}$. Tästä hiiltä on $12,0107 \text{ g/mol}$, jolloin hiilen massaosuudeksi hiilidioksidissa, w_{C/CO_2} , saadaan

$$w_{C/CO_2} = \frac{m_{C/CO_2}}{M_{CO_2}} \quad (8)$$

$$w_{C/CO_2} = \frac{12,0107 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{44,0095 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \quad (9)$$

$$w_{C/CO_2} = 27,3\% \quad (10)$$

Kun edellä esitettyjen laskelmien perusteella tiedetään polyeteenin ja -propeenin vuosituotannon sitovan yhteensä 154,93 Mt hiiltä, voidaan hiilidioksidin sisältämän hiilen massaosuuden avulla laskea, kuinka paljon hiilidioksidia näihin kahteen muovilaatuun voitaisiin vuositasolla sitoa:

$$m_{CO_2} = \frac{m_{C,PE+PP}}{w_{C/CO_2}} \quad (11)$$

$$m_{CO_2} = \frac{154,93 \text{ Mt}}{27,3\%} \quad (12)$$

$$m_{CO_2} = 567,7 \text{ Mt} \quad (13)$$

Suhteutettuna vuoden 2019 globaaleihin hiilidioksidipäästöihin (pl. maankäytön muutokset), jotka olivat suuruudeltaan 37 Gt, vastaa polyeteeniin ja polypropeeniin sidottavissa oleva hiilidioksidimäärä noin 1,5 prosenttia kokonaispäästöistä.