

OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

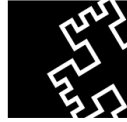
**HIILIDIOKSIDIN SUORA TEOLLINEN HYÖDYNTÄMINEN**

**Noora Miilumäki**

**PROSESSI- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO**

**KANDIDAATINTYÖ 218**

**2011**



**OULUN YLIOPISTO**  
UNIVERSITY of OULU

**HIILIDIOKSIDIN SUORA TEOLLINEN HYÖDYNTÄMINEN**

**Noora Miilumäki**

**Ohjaajat: Esa Turpeinen, Johanna Päckilä**

**PROSESSI- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO**

**KANDIDAATINTYÖ 218**

**2011**

## Teknillinen tiedekunta

Osasto		Laboratorio	
Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto		Lämpö- ja diffuusiotekniikan laboratorio	
Tekijä		Työn valvoja	
Miilumäki, Noora Maarit		Turpeinen, Esa Päkkilä, Johanna	
Työn nimi			
Hiilidioksidin suora teollinen hyödyntäminen			
Oppiaine	Työn laji	Aika	Sivumäärä
Ympäristötekniikka	Kandidaatintyö	Joulukuu 2011	39 sivua
Tiivistelmä			
<p>Kasvihuonepäästöt, erityisesti hiilidioksidipäästöt, ovat tänä päivänä tiiviin tarkastelun alaisena niin lainsäädännön kuin ihmisten kulutustottumuksienkin puolesta. Hiilidioksidipäästöt ovat muutamassa vuosikymmenessä kasvaneet huomattavasti energian tuotannon, raskaan teollisuuden, rakentamisen sekä liikenteen lisääntyessä. Samaan aikaan hiilidioksidista aiheutuvat ympäristöongelmat, kuten ilmaston lämpeneminen, ovat pahentuneet. Päästöjen määrää pyritään vähentämään lakien ja säädösten avulla, mutta päästöjen tuottamiin ongelmiin kehitetään ratkaisuja myös erilaisten tekniikoiden avulla. Näistä yksi on hiilidioksidin hyötykäyttö.</p> <p>Työn aiheena oli hiilidioksidin suoran teollisen hyödyntämisen tutkiminen. Työ liittyi CCS – ohjelmaan, joka tutkii hiilidioksidin talteenotto- ja varastointimahdollisuuksia. Työn tavoitteena oli selvittää kirjallisuuden avulla, millaisissa teollisissa sovelluksissa talteenotettua hiilidioksidia voidaan hyödyntää. Aluksi työssä tarkastellaan hiilidioksidin ominaisuuksia, lainsäädäntöä sekä hiilidioksidipäästöjä Suomessa. Työssä käydään läpi myös talteenotto- ja varastointimenetelmiä. Työn pääpainona ovat erilaiset hyödyntämismahdollisuudet.</p> <p>Hiilidioksidia on hyödynnetty jo pitkään, mutta on olemassa monia käyttökohteita, jotka ovat vasta tutkimus- tai kokeiluvaiheessa. Jotta hiilidioksidia voitaisiin hyödyntää tehokkaasti ja turvallisesti, on ymmärrettävä sen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Hiilidioksidin ominaisuudet luovat monia mahdollisuuksia hyödyntämiselle: sitä mm. käytetään korvaamaan useita ympäristölle tai ihmisille haitallisia aineita, sillä se on usein muita turvallisempi kemikaali.</p> <p>Hiilidioksidin hyödyntäminen on yhä vähäinen tekijä päästöjen hallinnassa, sillä vain pieni osa päästöistä saadaan hyötykäyttöön. Tämä antaa kuitenkin mahdollisuuden monille uusille innovaatioille.</p>			
Säilytyspaikka			
Muita tietoja			

## Faculty of technology

Department		Laboratory	
Department of Process and Environmental Engineering		Mass and Heat Transfer Process Laboratory	
Author		Supervisor	
Miilumäki, Noora Maarit		Turpeinen, Esa Päkkilä, Johanna	
Name of the thesis			
Direct Utilization of Carbon Dioxide			
Subject	Level of studies	Date	Number of pages
Environmental Engineering	Bachelor's thesis	December 2011	39 pages
Abstract			
<p>Greenhouse gases, especially carbon dioxide, are under intense scrutiny. Energy production, heavy industry, building and traffic have caused the carbon dioxide emissions to grow significantly under the last few decades. Meanwhile, environmental problems such as global warming have become worse. Legislative measures are being taken into account to reduce the amount of emissions, but the problems caused by emissions can also be solved with technology. One of these technologies is utilization of carbon dioxide.</p> <p>The subject of this thesis was to study the direct industrial utilization of carbon dioxide. This thesis was done in context of a CCS –program which studies the capture and storage of carbon dioxide. The aim of this thesis was to study, with the help of literature, what kind of industrial applications can utilize captured carbon dioxide. In the beginning of this thesis the properties of carbon dioxide, the legislation concerning CO<sub>2</sub> and the CO<sub>2</sub> emissions in Finland are studied. The capture and storage methods are also examined. The main subject is the examination of the different utilization possibilities.</p> <p>Carbon dioxide has been utilized for a long time, but there are still many uses that have just only been tested. In order to use carbon dioxide in an efficient and safe way, the chemical and physical properties of CO<sub>2</sub> must be understood. The properties of CO<sub>2</sub> give it many advantages: for example it can replace many harmful compounds that are not safe for the environment or for people.</p> <p>When controlling emissions the utilization of carbon dioxide is still a minor factor, because only a small amount of emissions can be utilized. Nevertheless, the large amount of carbon dioxide gives an opportunity for many new innovations.</p>			
Library location			
Additional information			

# Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	8
2	Hiilidioksidi .....	9
2.1	Hiilidioksidin ominaisuudet .....	9
2.2	Lainsäädäntö.....	12
2.3	Hiilidioksidipäästöt Suomessa .....	13
3	CCS .....	15
3.1	Hiilidioksidin talteenotto .....	16
3.2	Hiilidioksidin varastointi .....	17
3.3	CCS Suomessa .....	18
4	Hiilidioksidin hyödyntäminen.....	20
4.1	Elintarviketeollisuus .....	20
4.1.1	Jäähdyttäminen ja jäädyttäminen .....	20
4.1.2	Elintarvikkeiden pakkaaminen.....	21
4.1.3	Steriloiminen.....	22
4.1.4	Ylikriittinen uutto elintarviketeollisuudessa (SFE).....	22
4.1.5	Hiilihappojuomat .....	22
4.2	Kemian- ja petrokemianteollisuus.....	23
4.2.1	Hiilidioksidi raaka-aineena .....	23
4.2.2	Öljynjalostus (EOR).....	23
4.2.3	Ylikriittinen uutto kemianteollisuudessa (SFE).....	24
4.3	Paperi- ja selluteollisuus.....	25
4.3.1	Massan pesun tehostus .....	25
4.4	Maatalous .....	25
4.4.1	Kasvihuonekäyttö.....	25

4.4.2	Levien kasvatus teollisuuskäyttöön .....	26
4.4.3	Torjunta-aine .....	27
4.5	Vesien käsittely .....	27
4.5.1	pH ja alkaliteetti .....	27
4.6	Kumin ja muovin käsittely .....	28
4.6.1	Ponneaine .....	28
4.6.2	Puhallusmuovaus .....	28
4.7	Kuivajää.....	28
4.7.1	Kuivajään jäähdyttävä ominaisuus.....	29
4.7.2	Kuivajääpesu .....	29
4.8	Muut käyttökohteet.....	29
4.8.1	Sammutinaine.....	29
4.8.2	Hitsauksen suojakaasu .....	29
4.8.3	Liutin.....	30
5	Tulevaisuus .....	31
6	Yhteenveto .....	33
7	Lähdeluettelo.....	34

## Lyhenteet

CAP	<i>Controlled Atmosphere Packaging</i> eli pakkaaminen kontrolloituun ilmakehään
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CFC	<i>Chlorine-fluorine-carbon</i> eli klooratut ja/tai fluoratut hiilivedyt
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i> eli tehostettu öljyn talteenotto
HCFC	<i>Hydro-chloro-fluoro-carbon</i> eli halogenoidut hiilivedyt
LULUCF	Maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätaloussektori
MAP	<i>Modified Atmosphere Packaging</i> eli pakkaaminen muunneltuun ilmakehään
NTP	<i>Normal temperature and pressure</i> eli normaalilämpötila ja -paine
PERC	<i>Perchloroethylene (tetrachloroethylene)</i> eli tetrakloorietyleeni
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> eli polyvinyylikloridi
SFE	<i>Supercritical Fluid Extraction</i> eli ylikriittinen uutto
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet

# 1 Johdanto

Kasvihuonepäästöt, ja niistä erityisesti hiilidioksidi, puhuttavat nykypäivän ihmisiä. Lisääntyvä väkiluku ja kasvava teollisuus koettelevat maapalloa ja yksi tapa havaita se on ilmaston lämpeneminen. Muuttamalla teolliset prosessit ympäristöystävällisemmiksi, mm. hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön avulla, voitaisiin tulevaisuuden näkymiin vaikuttaa ratkaisevasti.

Hiilidioksin hyödyntäminen on vasta alkutekijöissään eikä tuotettuja hiilidioksidimääriä kyetä vielä hyödyntämään tehokkaasti. Tietotaito, innokkuus sekä suuri hiilidioksidimäärä kuitenkin antavat mahdollisuuden parantaa jo olemassa olevia hyödyntämistekniikoita sekä kehittää täysin uusia käyttötapoja.

Tämän työn tarkoituksena oli kartoittaa erilaisia suoria hiilidioksidin teollisia hyödyntämiskohteita. Työ liittyy CCS-ohjelmaan, joka tutkii hiilidioksidin talteenottoa sekä varastoimista.



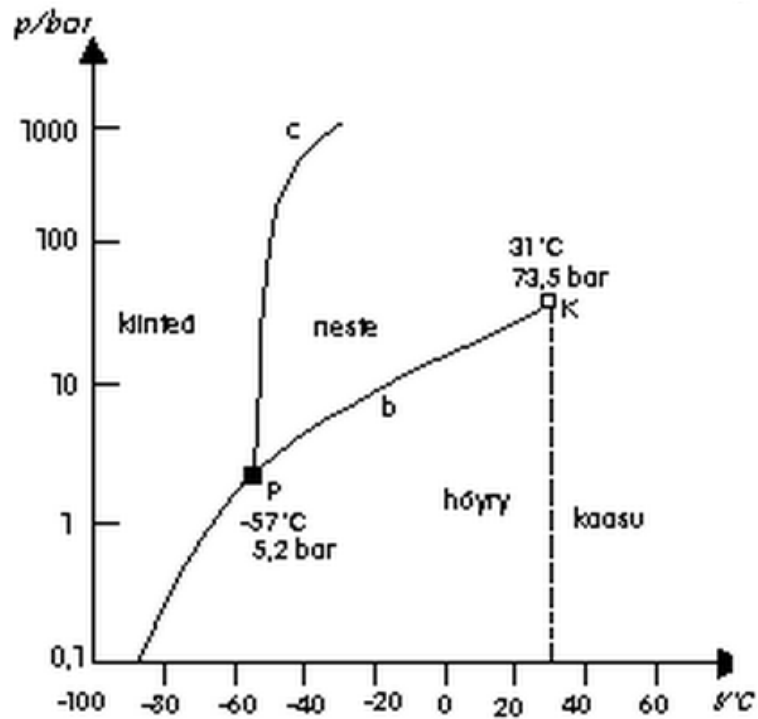
## 2 Hiilidioksidi

### 2.1 Hiilidioksidin ominaisuudet

Hiilidioksidi on heikosti myrkyllinen, hajuton ja väritön kaasu, joka ei pala tai ylläpidä palotapahtumaa (AGA 2010a). Sitä voidaan hyödyntää niin kaasumaisessa, nestemäisessä kuin kiinteässäkin muodossa (Koljonen et al. 2002). Hiilidioksidin muodonmuutoslämpötila kiinteästä kaasuksi (sublimoitumislämpötila) on  $-78\text{ °C}$ , mikä mahdollistaa sen hyödyntämisen esimerkiksi elintarvikkeiden jäähdyttämisessä. Matalassa paineessa se liukenee herkästi veteen, korkeassa paineessa myös öljyihin ja muoveihin. Korkeissa lämpötiloissa hiilidioksidi reagoi kemiallisesti eri aineiden kanssa. Nestemäinen hiilidioksidi on lisäksi selektiivinen liuotin useille aineille ja liuotusteho paranee ylikriittisessä paineessa. Usein hyödynnetään myös nestemäisen hiilidioksidin kykyä muodostaa ilmakehän paineessa hiilihappojäätä. (AGA 2010a) Taulukossa 1 on esitetty hiilidioksidin ominaisuudet normaalilämpötilan ja -paineen olosuhteissa ( $0\text{ °C}$  ja 1 bar). Kuvassa 1 on esitetty hiilidioksidin faasidiagrammi, johon on merkitty hiilidioksidin kolmoisipiste (P) sekä kriittinen piste (K).

**Taulukko 1.** Hiilidioksidin ominaisuudet NTP-olosuhteissa (Seppänen et al. 1991).

Molekyylikaava	CO <sub>2</sub>
Moolimassa	44,01 g/mol
Olomuoto	Väritön kaasu
Tiheys	1,977 g/l
Sulamispiste	$-78\text{ °C}$
Kiehumispiste	$-57\text{ °C}$
Viskositeetti	$13,6 \cdot 10^{-6}\text{ Ns/m}^2$
Lämmönjohtavuus	0,015 W/(mK)
Liukoisuus veteen	0,88 l/l



*Kuva 1. Hiilidioksidin faasidiagrammi (Opetushallitus 2011).*

Hiilidioksidin edellä mainitut fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet tekevät siitä tärkeän osan eri teollisuuden sovelluskohteissa (Koljonen et al. 2002). Taulukosta 2 voidaan nähdä, kuinka hiilidioksidin ominaisuuksia hyödynnetään eri käyttökohteissa.

**Taulukko 2. Hiilidioksidin ominaisuuksien hyödyntäminen eri käyttökohteissa (Turunen 2011).**

Hiilidioksidin tarkoitus	Kohde	Hiilidioksidin ominaisuus
Raaka-aine	Urean synteesi Salisyylihapon synteesi Metanolin synteesi Hapetusprosessit	Sisältää hiiltä  Sisältää hiiltä ja happea Kuljettaa happea ja laimeaa hapetinta
Raaka-aine ja liuotin	Polykarbonaatin synteesi polyetyleeni ja polypropyleeni karbonaateiksi	Sisältää hiiltä, alhaisen kriittisen pisteen ja ylikriittisen CO <sub>2</sub> fluidin tiheys riippuu T:stä ja p:stä
Liuotin ylikriittisessä tai nestemäisessä tilassa	Uuttoprosessit, kahvi, tee, humala, muut samantapaiset sovellukset elintarviketeollisuudessa  Spray päälylytyys ja partikkelien muodostuminen	Alhainen kriittinen piste, ylikriittisen CO <sub>2</sub> fluidin tiheys riippuu T:stä ja p:stä, hyvä aineensiirto ja läpäisy huokosiin (suuri tiheys, alhainen viskositeetti ja diffuusiokyky), alhainen haihtumislämpötila, alhainen myrkyllisyys ja inerti hapettumiselle Alhainen kriittinen T, ylikriittisen CO <sub>2</sub> fluidin tiheys riippuu T:stä ja p:stä, alhainen haihtumislämpötila, suuri laajeneminen, inerti, ei VOC-päästöjä
Puhdistuskeino	Kuivapesu, superkriittisen tilan alapuolella  Kuivajääpuhallus jäädytetyllä hiilidioksidilla	Alhainen kriittinen piste, hyvä aineensiirto ja läpäisy huokosiin (suuri tiheys, alhainen viskositeetti ja diffuusiokyky), alhainen haihtumislämpötila ja alhainen myrkyllisyys Jään alhainen lämpötila, suuri laajentuminen sublimoitumisen aikana ja sublimoituminen ilmakehän olosuhteissa
Suojakaasu	Ruoan pakkaus  Hitsaus Palosammuttimet (kiinteät ja kannettavat)	Inerti, erityisesti hapettumiselle (säilyttää maun), ei bakteerienkasvua, ei jätä kosteutta Inerti, erityisesti hapettumiselle, ei johda sähköä, ei jätä kosteutta, edullinen materiaali, ei vahingoita otsonikerrosta
Jäähdytysaine	Jäähdytysjärjestelmät  Suora jäähdytys kuivajäällä	Kaasu-neste –tasapaino-ominaisuudet, suuri tiheys ja alhainen viskositeetti ylikriittisessä tilassa, alhainen myrkyllisyys*, inerti (palamaton), alhaiset materiaalikustannukset, ei vahingoita otsonikerrosta ja alhainen kasvihuoneilmiö* Tehokas lämmönsiirto johtuen sublimoitumisesta ilmakehän olosuhteissa, ei jätä kosteutta
Lisäaine tuotteeseen	Panimo- ja virvoitusjuomateollisuus	Liukenee helposti, kaasun poisto
Vaikuttaa pH:n arvoon	Sellu- ja paperteollisuus ja vesienkäsittely (korvaa sulfurin) Neutralisointi (uima-altaat, vesienkäsittely)	Hapan vesiseoksessa, ei ympäristölle haitallinen Hapan vesiseoksessa, haitaton ympäristölle ja entsyymeille
Täytekaasu	Öljynjalostusteollisuus (EOR)	Hyvä saatavuus, alhaiset materiaalikustannukset, inerti

\* Verrattaessa olemassa oleviin vaihtoehtoihin.

Huolimatta lukuisista hiilidioksidin hyödyntämisen eduista ja edistyksistä, hiilidioksidin ominaisuudet tuovat myös joitain rajoituksia. Esimerkiksi korkeapaineisen hiilidioksidin vapautuminen tai vuoto aiheuttaa ympäröivän alueen lämpötilan laskun. Ilmiö vaatii materiaalivalinnan huomioimisen. Materiaalivalinnat tulee huomioida myös silloin kun läsnä on vettä, sillä tällöin hiilidioksidista tulee korrodoiva. Koska hiilidioksidi on inertti molekyyli, vaaditaan innovatiivista ajattelua, jotta aktivoitumisongelmat saadaan ratkaistua.

Rajoituksia on siis niin teknisiä kuin termodynamiikan sekä kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien ymmärrykseen liittyviä. Rajoituksiin liittyvien ongelmien ratkaisemiseen voidaan kuitenkin myötävaikuttaa tiedolla ja luovalla ajattelulla. (Turunen 2011)

## **2.2 Lainsäädäntö**

Ilmastosopimusta täydentävä Kioton pöytäkirja hyväksyttiin vuonna 1997 ja se tuli voimaan vuonna 2005. Kioton pöytäkirja velvoittaa kehittyneitä maita vähentämään kuuden kasvihuonekaasun, mukaanluettuna hiilidioksidin, päästöjä yhteensä 5,2 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuosina 2008-2012. Tämä sitova yleisvelvoite on jaettu maakohtaisiksi velvoitteiksi, jotka ovat erisuuruisia eri maissa. Pöytäkirja ei aseta kehitysmailla sitovia päästövähennysvelvoitteita. (Ympäristöministeriö 2011)

Kioton pöytäkirjassa Euroopan unionin yhteinen päästövähennysvelvoite vuoden 1990 päästötasosta on 8 prosenttia. Myös tämä velvoite on jaettu EU:n sisäisen taakanjakosopimuksen mukaisesti maakohtaisiksi velvoitteiksi. (Ympäristöministeriö 2011)

Vuoden 2008 joulukuussa Euroopan parlamentti hyväksyi laajan energia- ja ilmastopaketin, jonka tavoitteena on olla rajoittamassa globaalia keskilämpötilan nousua. Strategian tavoitteena on mm. kasvihuonekaasujen vähentäminen 20%:lla (tai 30%:lla, mikäli kansainvälinen, sitova ilmastosopimus syntyy) vuoteen 2020 mennessä. Suomen energia- ja ilmastostrategia perustuu edellä mainitun strategian sitovien tavoitteiden toteuttamiseen. Taakka on jaettu Suomelle siten, että päästökaupan ulkopuolisen sektorin kasvihuonepäästöjä tulisi vähentää 16 % vuoden 2005 tasosta ja

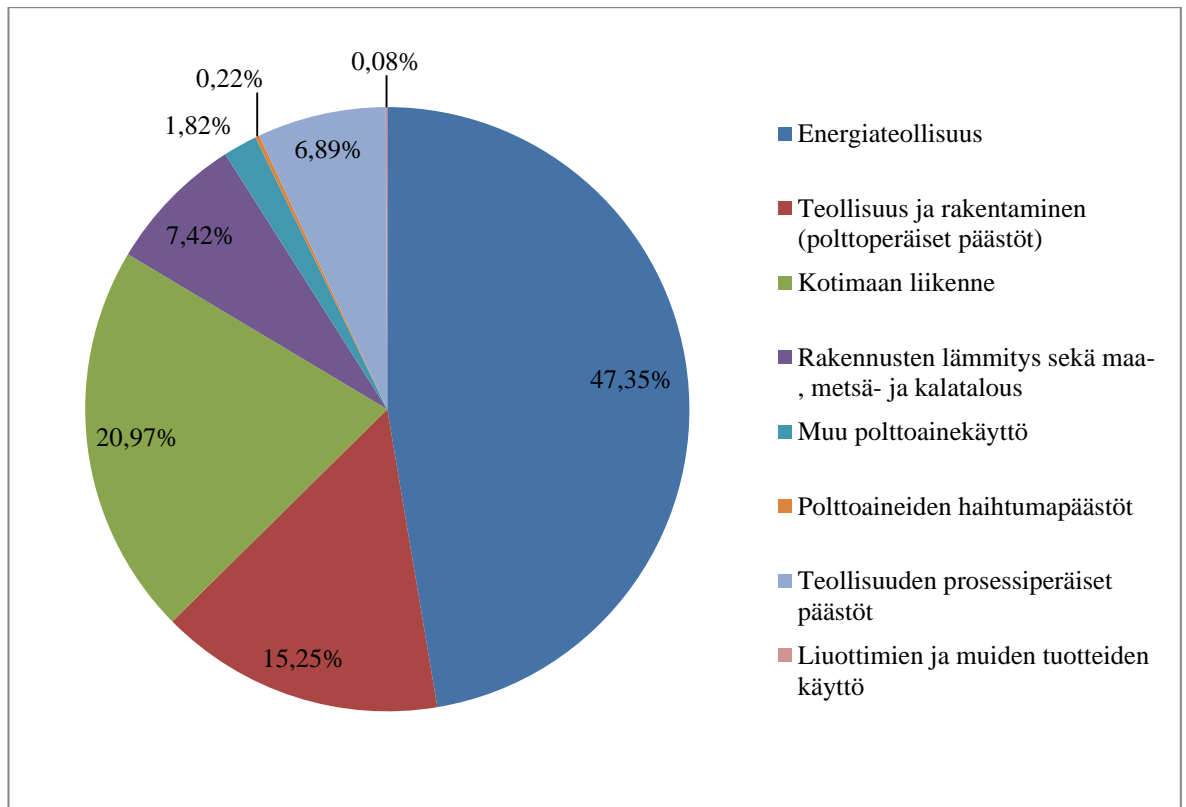
uusiutuvan energian osuutta energian loppukulutuksesta lisätä 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. (Teir et al. 2009)

Joulukuussa 2011 Durbanissa järjestetyssä YK:n ilmastokokouksessa on saatu aikaan uusi kansainvälinen ilmastopöytäkirja, johon kaikki suuret maat, Kiina ja Yhdysvallat mukaan luettuina, osallistuvat. Sitova sopimus on määrä hyväksyä vuoteen 2015 mennessä ja se tulee voimaan vuonna 2020. Uuden sopimuksen mukaan Kioton ilmastopöytäkirjasta jatketaan ensi vuonna sovittavan aikataulun mukaan. Kun edeltävä Kioton sopimus velvoitti vain teollistuneet maat rajoittamaan päästöjään, uudessa sopimuksessa myös Kioton sopimukseen kuulumattomat maat veloitetaan leikkaamaan päästöjään samassa määrin vuoteen 2020 mennessä. (Reuters 2011)

### **2.3 Hiilidioksidipäästöt Suomessa**

Suomen kasvihuonepäästöt vuonna 2010 olivat yhteensä 74,6 Mt CO<sub>2</sub>-ekv, joista hiilidioksidipäästöjä oli 63,7 Mt eli 85,4 %. Kasvihuonepäästöt kasvoivat edeltävästä vuodesta 8,5 miljoonalla hiilidioksiditonnilta ja ylittävät Kioton pöytäkirjan tavoitetasoa n. 5 prosentilla. (Tilastokeskus 2011)

Suurin hiilidioksidipäästösektori oli energiateollisuus (30,17 Mt), liikenteen ollessa toiseksi suurin (13,36 Mt) ja teollisuuden ja rakentamisen polttoperäisten päästöjen kolmanneksi suurin (9,72 Mt) sektori (Kuva 1) (Tilastokeskus 2011).



**Kuva 2.** Hiilidioksidipäästöjen jakautuminen Suomessa (ei sisällä LULUCF-sektoria) (Tilastokeskus 2011).

### 3 CCS

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi CCS (Carbon Capture and Storage) on prosessi, joka koostuu hiilidioksidin erottamisesta teollisesta ja energiaan liittyvistä lähteistä, sen kuljettamisesta varastointipaikalle ja pitkäaikaisesta eristämisestä ilmakehästä. (IPCC 2005) CCS-tekniikan avulla hiilidioksidipäästöt pienenevät merkittävästi hilliten samalla ilmastonmuutosta (Fortum 2011). Viimeisimpien arvioiden mukaan CCS-tekniikan laajamittainen käyttöönotto voisi tarkoittaa tarvittavasta hiilidioksidin maailmanlaajuisesta vähentämisestä viidesosaa vuoteen 2050 mennessä (Bowen 2011). Tavoitteena on, että talteenotettua hiilidioksidia voitaisiin myös hyödyntää teollisuudessa (Fortum 2011).

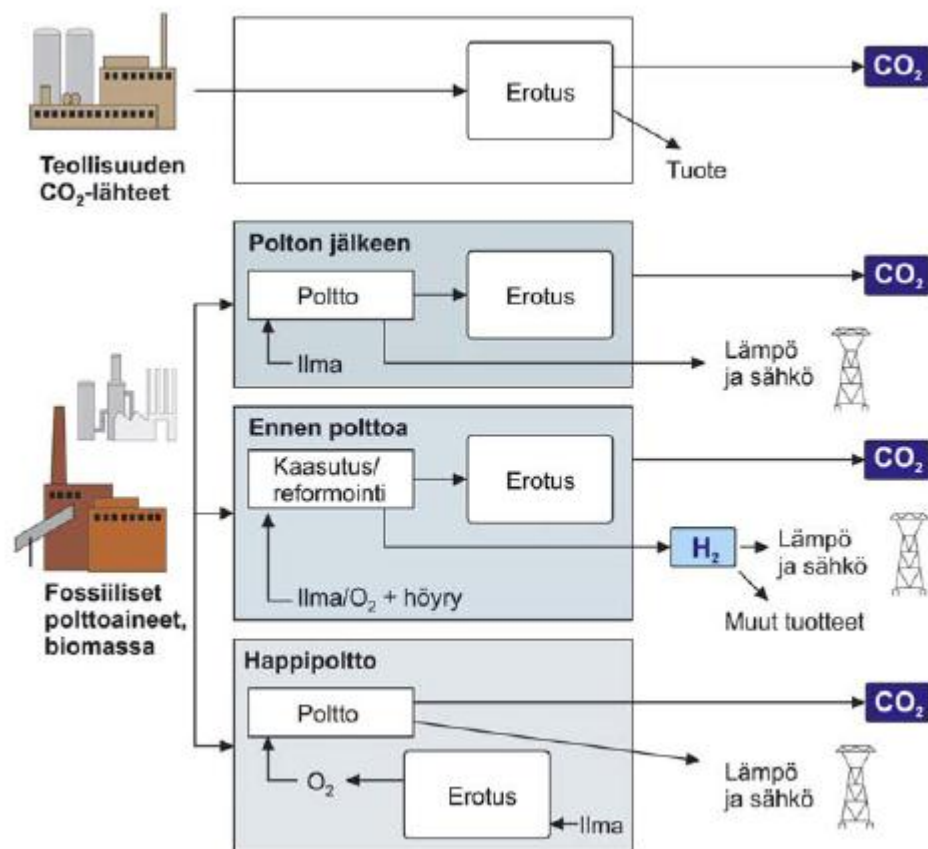
CCS-tekniikka mahdollistaa muutoksen jo olemassa olevaan systeemiin kuitenkin vaarantamatta kokonaisuutena. CCS-tekniikka voidaan myös ajatella olevan innovaatio, joka ”ostaa meille aikaa” radikaaleilta uudistuksilta ja toimii siltana fossiilisten polttoaineiden ja tulevaisuuden uusiutuvien energianlähteiden käytön välillä. CCS ei ole uusi konsepti vaan jotkin hiilidioksidin talteenottoon ja geologiseen säilytykseen liittyvät teknologiat ja käytännöt ovat olleet kaupallisessa käytössä useissa tehtaissa jo 10–50 vuotta. (Praetorius et al. 2009)

CCS-konseptin laajamittaiseen käyttöönottoon liittyy kuitenkin vielä epävarmuustekijöitä: useita kysymyksiä tekniikkaan, taloudellisuuteen, ympäristöasioihin ja turvallisuuteen liittyen on yhä ratkaisematta (Praetorius et al. 2009). Vaikka hallitukset yrittävät tehdä CCS-tekniikan hyödyntämisestä kannattavaa mm. hintakannustimilla hiilidioksidimarkkinoiden osalta, yhtiöiden päätöksentekijät kokevat sijoitukset kyseiseen tekniikkaan haastaviksi (Bowen 2011). Syynä tähän on mm. se, että CCS-tekniikka tulee aina vaatimaan enemmän energiaa kuin vastaavat prosessit, joissa kyseistä tekniikkaa ei hyödynnetä (Chalmers et al. 2008). Menetelmän haasteina ovat lisäksi suuret talteen otettavat hiilidioksidimäärät, pitkäaikaiseen varastointiin liittyvät epävarmuudet ja vastuukysymykset samoin kuin uusien, kehitysvaiheessa olevien yksikköprosessien lisäämisen vaikutukset tuotantolinjojen käytettävyyteen ja luotettavuuteen (Teir et al. 2011).

### 3.1 Hiilidioksidin talteenotto

Kallein osa CCS-ketjua on alustava hiilidioksidin talteenotto (Bowen 2011). Talteenotto on helpointa suurista lähteistä, kuten voimalaitoksista, öljynjalostamoista, terästehtaista sekä sellu- ja paperitehtaista. Talteen otettu hiilidioksidi tulisi konsentroida ja paineistaa neste- tai kaasuvirraksi, joka sopii kuljetukseen ja säilytykseen. (Koljonen et al. 2002)

Talteenottoteknologioiden tutkimuksessa on kolme pääväylää: polton jälkeinen talteenotto (Post-combustion), kaasutustekniikka (Pre-combustion) sekä happipoltotekniikka (Oxyfuel combustion) (Fortum 2011). Tärkeimmät talteenottotekniikat taas ovat absorptio, adsorptio, kryotekniikka sekä kalvot. Tekniikoita voidaan hyödyntää ennen fossiilisen polttoaineen palamista tai sen jälkeen riippuen talteenottomenetelmästä. (Koljonen et al. 2002) Kuvassa 3 on esitetty kaikki hiilidioksidin talteenottomenetelmät teollisuudessa ja energiantuotannossa.



Kuva 3. Hiilidioksidin talteenottomenetelmät (IPCC 2005 mukaan).



Talteenottomenetelmistä polton jälkeinen talteenotto ja kaasutustekniikka ovat kehittyneet jo pitkälle. Molemmat tekniikat hyödyntävät erotusprosessia, joka perustuu liuottimiin, kalvoihin, kryotekniikkaan tai muihin kemiallisiin tai fysikaalisiin prosesseihin, joita teollisuus hyödyntää tälläkin hetkellä. Polton jälkeisessä talteenotossa hiilidioksidi erotetaan savukaasuista, joita vapautuu teollisuuden prosesseista, kuten hiiltä polttoaineena käyttävästä voimalaitoksesta. (Bowen 2011) Hiilidioksidipitoisuus savukaasuissa on 3-15 til-% (Teir et al. 2009). Kaupallisesti kehittyneimmät menetelmät hyödyntävät erottamisessa märkähankausta nestemäisellä amiiniliuoksella (Chalmers et al. 2008). Tämän jälkeen hiilidioksidi syötetään varastosäiliöön. (Fortum 2011)

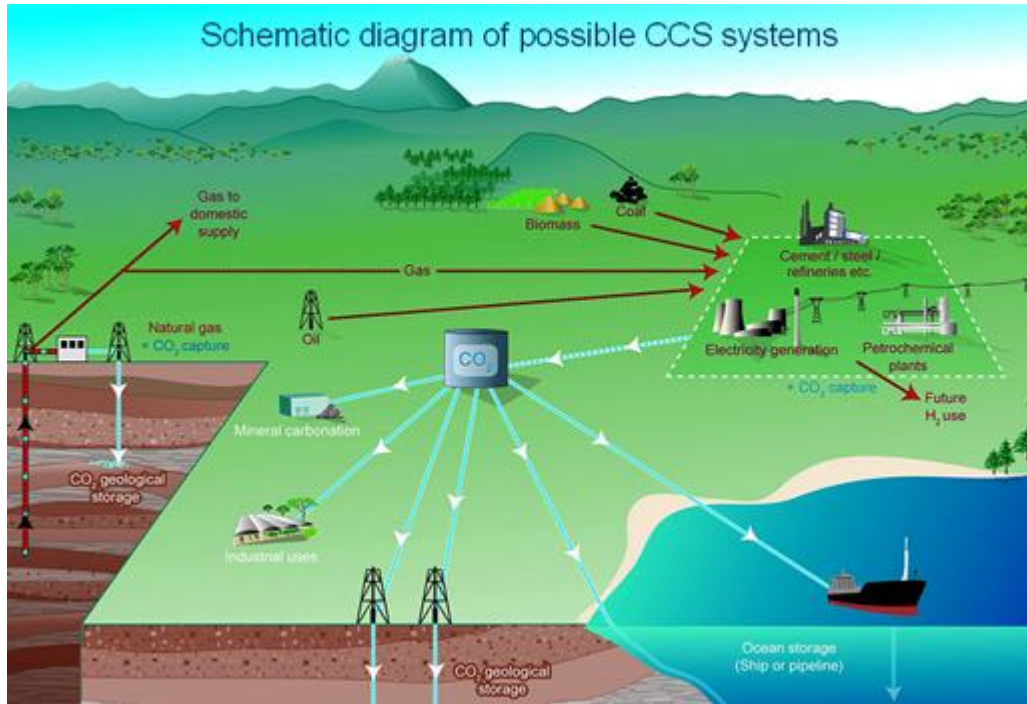
Pre-combustion- eli kaasutustekniikassa hiilidioksidi otetaan talteen ennen polttoaineen polttamista (Teir et al. 2009). Tekniikka vaatii polttoainelähteen alustavan kaasuuntumisen, mutta tuottaa puhtaamman hiilidioksidivirran talteenotettavaksi prosessin lopussa (Bowen 2011). Polttoaineen annetaan reagoida hapen tai ilman ja/tai höyryn kanssa, jolloin saadaan pääasiassa hiilimonoksidista ja vedystä koostuvaa synteesikaasua. Hiilimonoksidi reagoi höyryn kanssa, jolloin saadaan hiilidioksidia ja lisää vetyä. Tämän jälkeen hiilidioksidi erotetaan. (Fortum 2011)

Oxyfuel combustion eli happipolttotekniikka on myös yksi lupaava talteenottoteknologia, jota on testattu pilottilaitoksen mittakaavassa. Kyseinen teknologia ei ole kuitenkaan yhtä kehittynyt kuin pre- ja post-combustion -teknologiat. (Bowen 2011) Tässä tekniikassa tärkein erotusprosessi on hapen erottaminen typestä. Tämän jälkeen polttoaine, hiili tai kaasu, poltetaan hapen ja kierrätettyjen savukaasujen sekoituksessa. Näin savukaasut saadaan lopulta koostumaan suurimmalta osaltaan hiilidioksidista ja kondensoitavasta vesihöyrystä, joka voidaan erottaa ja puhdistaa melko helposti. (Chalmers et al. 2008) Lopulta puhdas hiilidioksidi voidaan muuntaa nestemäiseksi kuljetuksen ja varastoinnin helpottamiseksi (Fortum 2011).

### **3.2 Hiilidioksidin varastointi**

Talteenotettu hiilidioksidi kuljetetaan putkea pitkin suoraan varastointipaikkaan tai satamaan, josta se laivataan varastointipaikkaan (Fortum 2011). Hiilidioksidin varastoiminen geologisesti perustuu kaasun pumppaamiseen vähintään yhden kilometrin syvyyteen (Chalmers et al. 2008) Pääasiallisia geologisia loppusijoituskohteita ovat

mm. öljy- ja kaasukentät, kiviluolat sekä syvät vesimuodostumat, mukaan luettuna suolavesimuodostumat. Myös syvät meret antavat hyvän mahdollisuuden varastoida ihmisen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. (Koljonen et al. 2002) Eri varastointimahdollisuuksia on esitetty kuvassa 4.

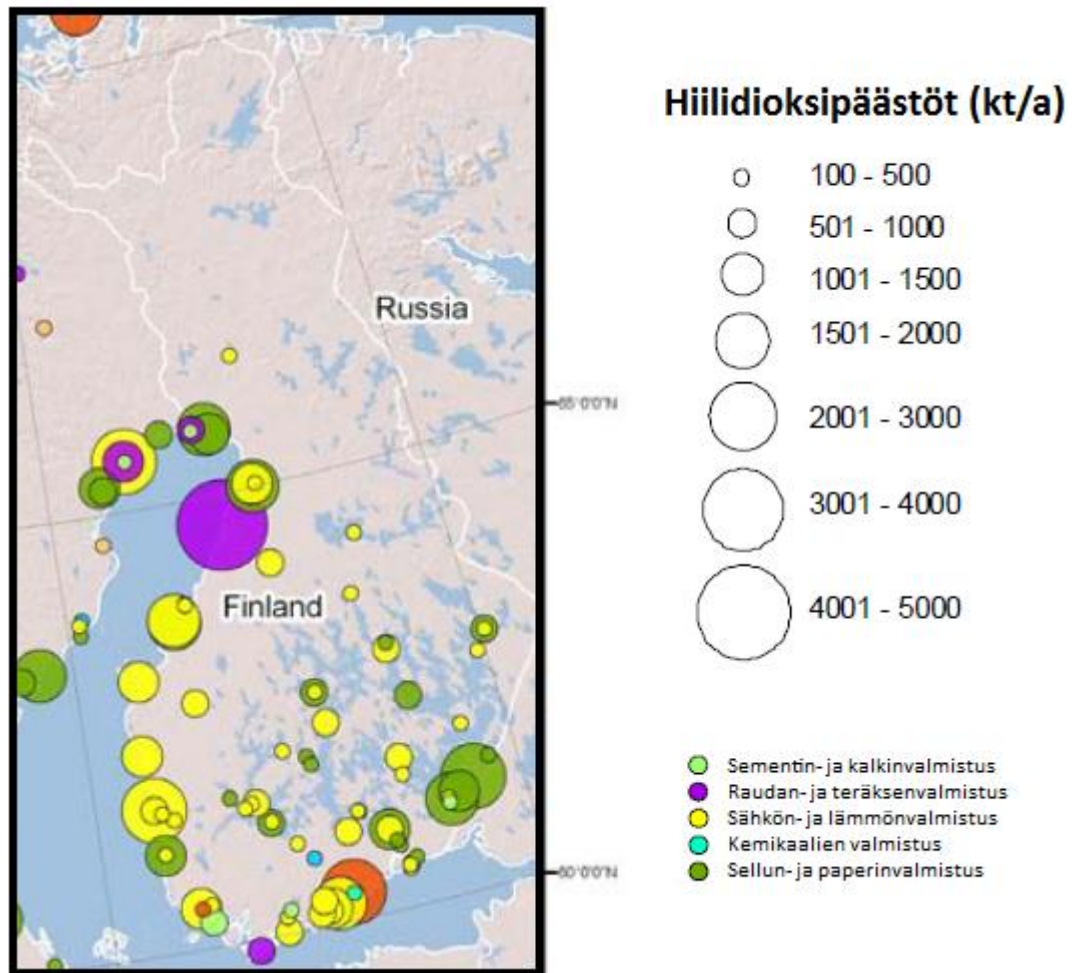


*Kuva 4. Kaaviokuva varastointimahdollisuuksista (IPCC 2005).*

### 3.3 CCS Suomessa

CCS-tekniikan avulla Suomen hiilidioksidipäästöistä voidaan vähentää 10-30% vuoteen 2050 mennessä, jos päästöoikeuden hintataso nousee noin 70-90€/t. Päästöjen perusteella päästökaupparekisterin 14 suurinta laitosta vastaa yli puolta rekisterissä olevien lähes 600 laitoksen yhteenlasketuista päästöistä. Koska tekniikan kaupallistumisen alkuvaiheessa potentiaalisimpia päästölähteitä hiilidioksidin talteenoton soveltamiseksi karakterisoi lähteen sijainti sekä hiilidioksidin suuri määrä, olisi päästövähennyksiä mahdollista saada aikaan soveltamalla CCS-tekniikkaa näihin muutamiiin suuriin laitoksiin. Sijainti rannikon läheisyydessä mahdollistaa hiilidioksidin kuljetuksen varastointipaikkaan laivalla, sillä Suomen maaperä ei tarjoa pysyvää varastointimahdollisuutta, ja hiilidioksidipäästöjen suuri määrä taas pienentää yksikkökustannuksia ainakin suunnittelun, laitteistojen, infrastruktuurin ja kuljetuksen

osalta. (Teir et al. 2011) Vuoden 2007 päästömäärien perusteella Suomesta löytyisi muutamia laitoksia, joihin halutut kriteerit pätevät (Kuva 5).



**Kuva 5.** Tuotantolaitokset, joissa fossiiliset ja bioperäiset CO<sub>2</sub>-päästöt >0,1 Mt/a vuonna 2007 (Teir et al. 2010 mukaan).

## 4 Hiilidioksidin hyödyntäminen

Hiilidioksidi on yhdiste, jonka ominaisuudet asettavat uuden tason terveydellisyydelle, turvallisuudelle ja ympäristöasioille moniin muihin vaihtoehtoihin verrattuna: se ei haise, se ei ole ympäristölle haitallinen ja sitä on mahdollista käyttää melko alhaisissa lämpötiloissa. Lisäksi se on melko turvallinen ja sen ominaisuudet ja käyttäytyminen luonnonsysteemeissä samoin kuin ihmisen suunnittelemissa systeemeissä tunnettaan. Mm. näiden ominaisuuksien ansiosta hiilidioksidin käyttö ei aiheuta korkeaa ympäristöriskiä, mikä helpottaa laillisia toimenpiteitä. (Turunen 2011) Kuvassa 6 on esitetty hiilidioksidin eri käyttökohteita.



Kuva 6. Käyttökohteita hiilidioksidille.

### 4.1 Elintarviketeollisuus

#### 4.1.1 Jäähdyttäminen ja jäädättäminen

Otsonikerrokselle haitallisten klooripitoisten CFC-kylmäaineiden (Chlorine-Fluorine-Carbon) sekä vähemmän haitallisten HCFC-yhdisteiden (Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon) käytölle on pyritty löytämään uusia vaihtoehtoja, joihin hiilidioksidi on

ympäristöystävällinen, kestävä ratkaisu. (Aittomäki 2005) Hiilidioksidin hyödyntämisen etuja ovat mm. alhaiset laitteistokustannukset sekä sen nopea jäähdyttävä vaikutus. Hiilidioksidia hyödyntävät systeemit ovat lisäksi hiljaisia ja vaativat vain vähän huoltoa. (Koljonen et al. 2002)

Nestemäistä hiilidioksidia käytetään ruokien jäähdyttämiseen ennen kuljetusta sekä sen aikana, joko jäähdyttämällä kuljetuskalusto ja sijoittamalla tavalliset kylmälaitteet jäähdytettyyn tilaan tai käyttämällä kokonaan hiilidioksidiin perustuvia kylmälaitteita. (Koljonen et al. 2002) Kylmälaitteet hyödyntävät erityisesti hiilidioksidin ominaisuutta höyrystyä: elintarvikkeen lämpöenergia muuttaa kiinteän hiilidioksidin kaasuksi samalla jäähdyttäen elintarviketta. Myös kylmä hiilidioksidikaasu edistää jäätymisreaktiota. (AGA 2010b) Höyrystyneellä hiilidioksidilla on huomattavasti suurempi lämmönsiirtokyky kuin perinteisillä lämmönsiirtonesteillä (Aittomäki 2005). Myös kuivajään hyödyntäminen elintarvikkeiden jäädyttämisessä on yleistynyt mm. sen myrkyttömyyden ansiosta, joka mahdollistaa suoran kosketuksen kuivajään ja elintarvikkeen välillä (Koljonen et al. 2002).

#### ***4.1.2 Elintarvikkeiden pakkaaminen***

Nestemäisestä hiilidioksidista valmistettua hiilidioksidikaasua hyödynnetään elintarvikkeiden, kuten kahvin, hedelmien ja murojen, pakkaamisessa (Koljonen et al. 2002). Niiden pilaantumista, esimerkiksi hapettumisen tai bakteerikasvuston seurauksena, voidaan vähentää pakkaamalla tuotteet muunneltuun ilmakehään (MAP Modified Atmosphere Packaging). Muunneltu ilmakehä sisältää sopivassa suhteessa hiilidioksidia, happea ja typpeä riippuen pakattavasta tuotteesta (Messer Group 2011). Pakkaamisessa voidaan hyödyntää joko yhtä kaasua tai kaasuseosta. CAP-tekniikka (Controlled Atmosphere Packaging) edellyttää kaasuseoksen määrän ja laadun kontrolloimista koko tuotteen säilytysajan. (Phillips 1996)

Vaikka elintarvikkeiden jäähdyttäminen hidastaa niiden pilaantumista, tuotteita ympäröivän ilman koostumusta muuttamalla voidaan tuotteiden säilyvyyttä yhä pidentää (Phillips 1996). Ilmakehän muokkaamisen etuja ovat myös tuotteiden houkutteleva ulkonäkö sekä lisääntynyt joustavuus pakkaamisessa ja jakelussa (Messer Group 2011).

### **4.1.3 Steriloiminen**

Perinteinen lämpökäsittely voi tuhota lämpöherkkiä ravintoaineita sekä heikentää ruoan makua, väriä ja koostumusta (Garcia-Gonzalez et al. 2007). Huoneenlämpöisellä hiilidioksidilla voidaan kuitenkin korvata pastörinti nestemäisten ruokien ja lääkkeiden steriloimiskeinona. Hiilidioksidin avulla mikrobit, kuten tarttuvat bakteerit, itiöt ja virukset, voidaan eliminoida yhtä tehokkaasti kuin lämpökäsittelyllä. Esimerkiksi mehuja voidaan steriloida hiilidioksidin avulla samalla säilyttäen mehun ravintoarvo ja maku. Prosessi hyödyntää kalvoteknologiaa, joka on tehokkain tapa saada hiilidioksidi ja steriloitava neste kosketuksiin toistensa kanssa. (Koljonen et al. 2002)

### **4.1.4 Ylikriittinen uutto elintarviketeollisuudessa (SFE)**

Ylikriittiset fluidit ovat aineita, jotka ovat niiden kriittisiä arvoja korkeammassa lämpötilassa ja paineessa (Brunner 2005). Ylikriittinen hiilidioksidi on hydrofobinen liuotin, joka voi korvata orgaaniset liuottimet useissa sovelluksissa (Creutz et al. 2001b). Metodia suositetaan esimerkiksi kofeiinittoman kahvin valmistuksessa, sillä se ei ole myrkyllinen, siinä ei käytetä liuottimia eikä siitä jää jäämiä valmiiseen tuotteeseen (Koljonen et al. 2002). Ylikriittistä uuttoa hyödynnetään elintarviketeollisuudessa lisäksi mm. kofeiinittoman teen valmistuksessa, yrttien ja mausteiden aromien palauttamisessa, syötävien öljyjen uutossa ja erottelussa, alkoholittomien viinien ja oluiden valmistuksessa sekä rasvattomien tuotteiden, kuten lihan, valmistuksessa. Myös vitamiinilisät sekä useat muut jokapäiväiset elintarvikkeet on tuotettu usein ylikriittisen uuton avulla. (Brunner 2005)

### **4.1.5 Hiilihappojuomat**

Hiilihappojuomien käyttö on yleistynyt huomattavasti ja virvoitusjuomateollisuus onkin yksi tärkeimmistä hiilidioksidin hyödyntäjistä (Koljonen et al. 2002). Erityisesti hiilihappopitoisten vesien suosio on nousussa. Virvoitusjuomien sekä joidenkin kuohuviinien kuplat aikaansaadaan hiilidioksidilla (AGA 2010b). Hiilidioksidi suihkutetaan juomaan paineistetussa tilassa ennen juoman pakkaamista tölkkeihin tai pulloihin. Kun pakkaus avataan, sen paine palaa ilmakehän paineen tasolle ja liuennut hiilidioksidi vapautuu muodostaen kuplia. Myös virvoitusjuomille ominainen maku saadaan aikaan hiilidioksidin avulla: veteen liuetessaan hiilidioksidi muodostaa hiilihappoa, joka antaa juomalle sen terävän ja raikkaan maun. (AGA 2010b) Maun

lisäksi hiilidioksidi toimii säilöntäaineena estäen käymistä sekä homeiden ja bakteereiden kasvua (Koljonen et al. 2002).

Virvoitusjuomien valmistuksessa käytettävän hiilidioksidin tulee olla hajutonta ja mahdollisimman puhdasta, jotteivät epäpuhtaudet muuta juoman makua. Juomien valmistajilla onkin tärkeää olla saatavilla korkealaatuinen hiilidioksidin lähde. (Koljonen et al. 2002)

## **4.2 Kemian- ja petrokemianteollisuus**

### **4.2.1 Hiilidioksidi raaka-aineena**

Vuosituhanen vaihteessa hiilidioksidia hyödynnettiin noin 110 MT vuosittain kemianteollisuuden raaka-aineena. Hiilidioksidia voidaan hyödyntää eri kemikaalien, kuten urean (70 MT/vuosi), epäorgaanisten karbonaattien ja pigmenttien (noin 30 MT/vuosi) sekä metanolin (6 MT/vuosi), valmistuksessa. (Aresta et al. 2007) Urea on maailman tärkein typpilannoite (Creutz et al. 2001a).

Kemianteollisuus käyttää hiilidioksidia muovien valmistukseen. Esimerkiksi polyvinyylidikloridista (PVC) valmistetaan mm. polyakryylisiä kuituja sekä maaleja. (Creutz et al. 2001a) Lisäksi hiilidioksidia hyödynnetään pieniä määriä myös lääketieteellisyydessä salisyylihapon valmistuksessa (noin 20 kT/vuosi) (Aresta et al. 2007).

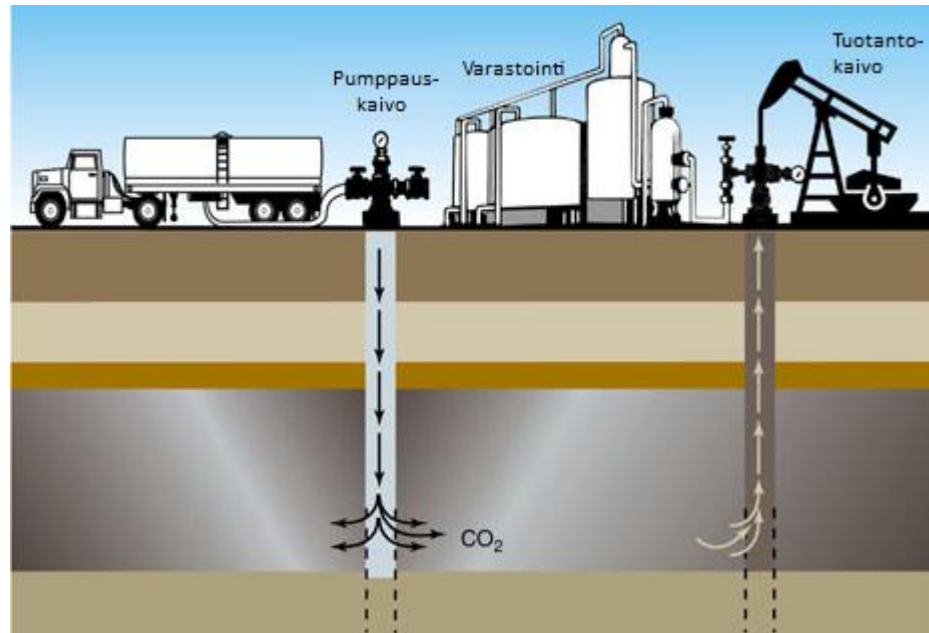
### **4.2.2 Öljynjalostus (EOR)**

EOR (Enhanced Oil Recovery eli tehostettu öljyn talteenotto) on ollut käytössä jo 1970-luvulta lähtien öljyvarantojen tuottavuuden parannuskeinona. Tekniikka hyödyntää hiilidioksidin ominaisuuksia liuottimena: se liukenee öljyyn ja pienentää öljyn viskositeettia. (Global CCS Institute et al. 2011)

Kun öljyvaranto otetaan käyttöön, öljy virtaa vapaasti painegradientin avulla. Varannon ehtyessä paine on kuitenkin liian pieni pakottaakseen öljyn maanpinnalle. EOR-tekniikassa ehtyneisiin öljykenttiin ruiskutetaan tiivistettyä hiilidioksidia, joka korvaa kentän sisällä olevan öljyn (Kuva 7). Näin voidaan hyödyntää öljyvarantoja, jotka muuten olisivat saavuttamattomissa. Yli 50-67% ruiskutetusta hiilidioksidista palaa



maanpinnalle öljyn mukana, jonka jälkeen se erotetaan ja ruiskutetaan uudelleen öljylähteeseen. Kun toiminta kentällä lopetetaan, voidaan suuria määriä hiilidioksidia varastoida tyhjiin öljykenttään. (Global CCS Institute et al. 2011)



**Kuva 7.** Hiilidioksidin hyödyntäminen öljyn talteenotossa

(Lawrence Livermore National Laboratory 2001).

Kaupallisessa mittakaavassa toimivat laitokset hyödyntävät pääasiassa luonnollisesti esiintyviä hiilidioksidivarastoja, mutta myös teollisuudesta talteenotettua hiilidioksidia käytetään. Sijainti on hyvin tärkeä hiilidioksidia hyödyntävälle EOR-tekniikalle: hiilidioksidin lähde ja kuljetusmahdollisuudet öljylähteelle määrittelevät sen, onko EOR taloudellisesti kannattava tapa pidentää lähteen ikää. (Global CCS Institute et al. 2011)

#### 4.2.3 Ylikriittinen uutto kemianteollisuudessa (SFE)

Kuten elintarviketeollisuudessa, myös kemianteollisuudessa hiilidioksidia käytetään lämpöherkkien tuotteiden erotuksessa sekä ylikriittisiä fluideja hyödyntävässä tislauksessa. Lääketeollisuus suosii hiilidioksidin käyttöä ylikriittisessä uutossa erityisesti siksi, että se toimii matalissa lämpötiloissa eikä jätä tuotteeseen jäämiä. Sen avulla voidaan myös poistaa epäpuhtauksia kemiallisista prosessivirroista. Ylikriittisen hiilidioksidin avulla epävakaidenkin aineiden erottaminen kohtuullisissa lämpötiloissa, joissa kyseisiä aineita ei yleensä voi tislata, onnistuu. (Koljonen et al. 2002)



### **4.3 Paperi- ja selluteollisuus**

#### ***4.3.1 Massan pesun tehostus***

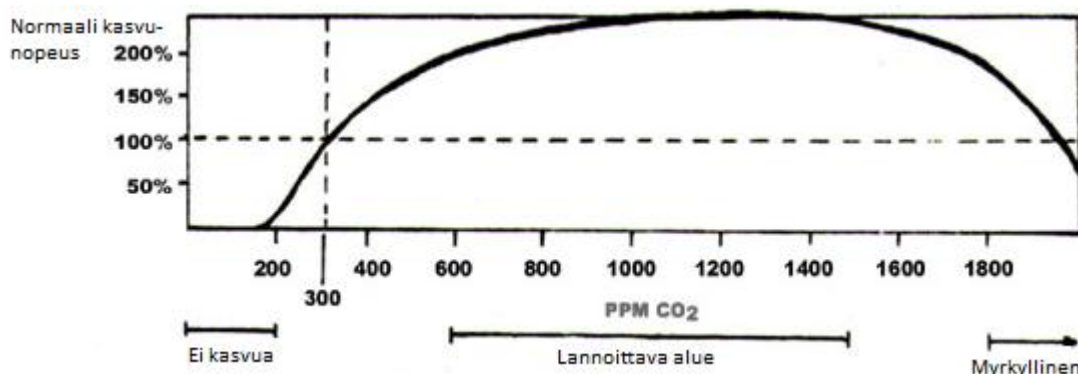
Massanvalmistukseen liittyvän prosessin, massan pesun, tarkoituksena on erotella mahdollisimman paljon puukuitua keittoliuoksesta, joka sisältää liuennutta puuainesta sekä keittokemikaaleja. AGA on kehittänyt ja patentoinut menetelmän, jossa hiilidioksidin avulla parannetaan massan pesun tehokkuutta. Menetelmää voidaan hyödyntää niin valkaisuamattoman kuin valkaistunkin sellun tuotannossa. (AGA 2010c) AGA on patentoinut myös useita muita kehittämiään, paperinvalmistuksessa hyödynnettäviä menetelmiä, joissa hiilidioksidia hyödynnetään mm. pH:n säätelyyn (AGA 2010d).

### **4.4 Maatalous**

#### ***4.4.1 Kasvihuonekäyttö***

Hiilidioksidi on kasveille tärkeä kasvutekijä mm. lämpötilan ja valon lisäksi. Säättämällä hiilidioksidin konsentraatio kasvihuoneen ilmassa sopivaksi, voidaan kasvien kasvunopeutta ja kehitystä parantaa. Lisäksi satojen määrät kasvavat. (Siikamäki 2001) Erityisesti tomaattien, kurkkujen ja mansikoiden tuottavuus ja laatu paranevat, mutta myös esimerkiksi leikkokukat hyötyvät hiilidioksidilannoituksesta. (Koljonen et al. 2002)

Tavallisessa huoneilmassa hiilidioksidin määrä on noin 300 ppm ja sen voidaan ajatella olevan normaalin kasvun raja (100%) (Kuva 8). Kun hiilidioksidin määrä on alle 200 ppm, kasvit eivät kykene yhteyttämään. Hiilidioksidin lisääminen voi kaksinkertaistaa kasvunopeuden ja joskus kasvunopeus on jopa tätäkin suurempi. Hiilidioksidin liika lisääminen kuitenkin hidastaa kasvua, ja kun hiilidioksidin määrää on suurempi kuin 2000 ppm, on se kasveille myrkyllinen. (Thayer 2011)



*Kuva 8. Hiilidioksidin vaikutus kasvihuonekasveihin (Thayer 2011).*

Hiilidioksidi on lannoitteena tehokas ja turvallinen, eikä se tuota myrkyllisiä sivutuotteita. Sen käyttö kasvihuoneissa tarjoaa hyvät kasvuolosuhteet ympäri vuoden. (Siikamäki 2001) Hiilidioksidia voidaan myös lisätä kasvien kasteluveteen, missä se muuttaa kasvualustan pH:ta parantaen kasvien kykyä imeä maasta ravintoaineita (Koljonen et al. 2002).

#### **4.4.2 Levien kasvatus teollisuuskäyttöön**

Kuten kasvihuonekäytössä, myös levien kasvatuksessa hiilidioksidin käyttö tuo etuja: hiilidioksidin poreiluttaminen kasvuston läpi voi parantaa tuottavuutta ja satoa huomattavasti (Global CCS Institute et al. 2011). Mm. elintarvike- ja lääkealan sektorit ovat osoittaneet kasvavaa kiinnostusta luontaisia ja uusiutuvista lähteistä peräisin olevia hienokemikaaleja kohtaan. Näiden hienokemikaalien lisäksi levät, erityisesti Spirulina-laji, tarjoavat myös mahdollisuuden pysyä tiukentuneiden päästörajoitusten sisällä, sillä niiden kasvatuksessa voidaan hyödyntää voimalaitosten tuottamaa ylimääräistä lämpöä sekä levien kykyä sitoa hiilidioksidia. (Koljonen et al. 2002)

Levistä eristettäviä tuotteita ovat mm. pigmentit, joita hyödynnetään elintarvike- ja lääketieteellisyydessä sekä polymeerien valmistuksessa, ja vitamiinit, joiden käyttökohteita löytyy elintarvike-, kosmetiikka- sekä lääketieteellisyydestä (Koljonen et al. 2002). Suurta kiinnostusta on myös herättänyt mahdollisuus tuottaa levästä öljyä hinnalla, joka on kilpailukykyinen raakaöljyn kanssa. (Global CCS Institute et al. 2011). Myös Suomessa levät nähdään yhtenä lupaavimpana ympäristöystävällisenä bioenergian lähteenä. Lisäksi se ei kilpaile maankäytöstä ruoantuotannon ja luonnonmetsän kanssa. Levien kuivapainosta 20–50 prosenttia on öljyä, mikä tekee

öljynsaannosta jopa yli satakertaisen tavallisiin öljykasveihin verrattuna. Levät myös tuottavat biomassaa nopeammin kuin puuvartistet kasvit. (Wallenius 2010)

#### **4.4.3 Torjunta-aine**

Hyönteismyrkkinä hiilidioksidi tarjoaa huomattavia etuja kilpaileviin kemiallisiin torjunta-aineisiin, kuten metyyli-bromidiin verrattuna, myrkyttömyytensä ansiosta. Hiilidioksidia voidaan hyödyntää esimerkiksi viljasiiloissa. Käytettäessä hiilidioksidia torjunta-aineena nestemäinen hiilidioksidi muutetaan kaasuksi paikanpäällä ja kaasu syötetään siiloon. Kaasu korvaa olemassa olevan ilman koostumuksella, joka on tappava kaikille hyönteisten muodonmuutosvaiheille. (Koljonen et al. 2002)

### **4.5 Vesien käsittely**

#### **4.5.1 pH ja alkaliteetti**

Vesien käsittelyssä hiilidioksidia hyödynnetään veden pH-arvon hallintaan, alkaliteetin nostoon sekä putkikorroosion estämiseen (AGA 2010b). pH-luku kuvaa veden syövyttävyyttä ja alkaliteetti taas veden kykyä vastustaa pH-muutoksia. Mikäli veden pH ja alkaliteetti ovat liian matalat, on vesi syövyttävää. (Nordkalk 2011) Säättämällä pH-taso sopivaksi vesiputkiin muodostuu suojaava pintakerros, joka estää korroosiota ja parantaa veden laatua (Koljonen et al. 2002).

Hiilidioksidin avulla voidaan parantaa niin juomavesien, erityisesti pehmeiden pintavesien, kemianteollisuuden kuin teollisuuden jätevesienkin laatua. Kemianteollisuudessa hiilidioksidi tarjoaa useita etuja yleisiin happoihin nähden, kuten reagenssin, välineistön ja valvontalaitteiden pienemmän määrän sekä lisääntyneen turvallisuuden. (Koljonen et al. 2002)

Lupaava, kustannustehokas keino hiilidioksidin turvalliseen hävittämiseen on sen käyttö emäksisten jätevesien neutraloimiseen. Emäksistä jätevettä tuottavat lukuisat eri teollisuuden alat, kuten metalliteollisuus, tekstiili- ja värjäysalat sekä sellu- ja paperiteollisuus. Hiilidioksidin avulla jätevesi neutraloidaan, jonka jälkeen se voidaan laskea vesistöön tai kuljettaa edelleen biologisesti käsiteltäväksi. Perinteisesti neutralisointiin on käytetty rikki- tai suolahappoa. Nämä hapot aiheuttavat ongelmia

mm. prosessinhallinnassa, käsittelyssä sekä laitteiden kunnossapidossa. Erityisesti tarkka pH:n hallinta on näiden happojen avulla vaikeaa. (Elkanzi 2011)

## **4.6 Kumin ja muovin käsittely**

### **4.6.1 Ponneaine**

Hiilidioksidia käytetään ponneaineena valmistettaessa polyuretaanista erilaisia lämmöneristeitä. Hiilidioksidia käyttämällä tuotteille saadaan erinomaiset lämmöneristysominaisuudet. Polyuretaanin valmistuksessa kaksi nestemuodossa olevaa perusmateriaalia reagoivat keskenään. Reaktiossa syntyvä lämpö saa ponneaineen höyrystymään ja samalla polyuretaani muuttuu vahtomaiseksi. (PU Nordic 2011) Polyuretaania käytetään mm. talojen seinä- ja kattoeristykseen, mutta myös esimerkiksi jääkaapin ovien lämmöneristeinä (Koljonen et al. 2002).

Ponneaineena on aiemmin käytetty mm. CFC- ja HCFC –yhdisteitä, jotka aiheuttavat otsonikerroksen ohentumista. Hiilidioksidilla pyritään korvaamaan kyseisten yhdisteiden käyttö ponneaineena. Myös ponneaineina käytettyjen butaanin ja pentaanin vaikutuksia ympäristöön on alettu tarkkailla, sillä niiden käyttö yhdistetään VOC-yhdisteiden päästöihin. (Koljonen et al. 2002)

### **4.6.2 Puhallusmuovaus**

Puhallusmuovauksessa muovi pakotetaan haluttuun muotoon. Kun muoto on saavutettu, muovi jäähdytetään. Ruiskuttamalla nestemäistä hiilidioksidia muovattuun tuotteeseen heti muotoilun jälkeen jäähdytysaikaa saadaan lyhennettyä ja samalla tuotantokapasiteetti kasvaa (Koljonen et al. 2002).

## **4.7 Kuivajää**

Kuivajää, toisin sanoen hiilidioksidi kiinteässä muodossaan, valmistetaan laajentamalla nestemäistä hiilidioksidia ilmakehän paineessa. Laajenemisen seurauksena syntyy yhtä suuri määrä kaasua kuin hiilidioksidilunta. Syntynyt hiilidioksidilumi puristetaan korkeassa paineessa, jolloin saadaan valmistettua pellettejä tai kuutioita. Kuivajään lämpötila on  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Koljonen et al. 2002)

#### **4.7.1 Kuivajään jäähdyttävä ominaisuus**

Kuivajäätä käytetään lähes kaikenlaisilla teollisuuden aloilla pääasiassa sen jäähdytysominaisuuksien ansiosta. Se on erityisen hyödyllinen menetelmissä, missä tarvitaan paikallista jäähdytystä. Kuivajää on erinomainen vaihtoehto vedestä tehdyille jääille useissa tapauksissa, sillä kuivajää sublimoituu suoraan ilmakehään, sen jäähdytyskapasiteetti on korkeampi ja lämpötila matalampi. (Koljonen et al. 2002)

#### **4.7.2 Kuivajääpesu**

Kuivajäätä käytetään myös hiilidioksidipuhalluksessa mm. maalinpoistoon sekä tuotantolaitteiston pesuun. Pintapesu kuivajään avulla perustuu kuivajääpartikkeleiden puhaltamiseen kovaa vauhtia puhdistettavalla pinnalle. Pinnalle osuessaan partikkelit räjähtävät. Nopea lämpötilan muutos sekä kiinteän hiilidioksidin yhtäkkinen laajeneminen kaasuksi poistavat yhdessä tehokkaasti kaikenlaiset liat. Kuivajääpesun etuja ovat mm. kuivajään sublimoituminen kaasuksi, jolloin jätteenä syntyy vain itse poistettava lika, kyky puhdistaa pintaa kuluttamatta (vertaa hiekkapuhdistus) sekä kuivajään ominaisuus eristeenä, mikä mahdollistaa myös sähkölaitteiden puhdistuksen. (Koljonen et al. 2002)

### **4.8 Muut käyttökohteet**

#### **4.8.1 Sammutinaine**

Hiilidioksidikaasu sopii erinomaisesti käytettäväksi palosammuttimissa, sillä se on inertti eli huonosti reagoiva. Hiilidioksidin sammutusteho perustuu jäähdytykseen sekä hapen syrjäyttämiseen. Tavallinen hiilidioksidisammutin sisältää paineistettua nestemäistä hiilidioksidia, joka sammuttimesta poistuessaan muuttuu hyvin kylmäksi, kiinteän ja kaasumaisen hiilidioksidin seokseksi. (AGA 2010b) Hiilidioksidi tukahduttaa palon vaurioittamatta materiaaleja ja sitä käytetään erityisesti silloin, kun paloa ei voida sammuttaa vedellä (Koljonen et al. 2002).

#### **4.8.2 Hitsauksen suojakaasu**

Yleisin hiilidioksidin käyttökohde metalliteollisuudessa on hitsaus. Hitsauksessa hiilidioksidi toimii suojakaasuna yksin tai muiden kaasujen kanssa estäen ilman haitalliset vaikutukset hitsiin. (Koljonen et al. 2002) Hiilidioksidi toimii suojakaasussa

hapettavana komponenttina, joka vakauttaa valokaaren ja varmistaa tasaisen aineensiirtymisen hitsauksen aikana. Hapettavana aineena voidaan hyödyntää myös happea tai hiilidioksidin ja hapen seosta. Useimmiten komponentiksi valitaan kuitenkin hiilidioksidi, sillä sen avulla kuonanmuodostus on vähäisempää ja hitsin geometria sekä ulkonäkö saadaan paremmiksi. Myös tarvittavan jälkityön määrä vähenee. (AGA 2011)

### ***4.8.3 Liuotin***

Hiilidioksidin muita käyttökohteita liuottimena ovat spray-maalaukset, aerosolit, puhdistus, kuivapesu sekä erittäin hienojen hiukkasten valmistus. Spray-maalauksessa hiilidioksidista on tulossa toimiva vaihtoehto korvaamaan VOC-yhdisteet, sillä se sekoittuu hyvin monien maalien polymeerien kanssa, toisin kuin useat muut kaasut. Aerosoleissa hiilidioksidi on tullut korvaamaan maan otsonikerrosta ohentavien aineiden käyttöä. Ylikriittistä hiilidioksidia käytetään muun muassa elektronisten komponenttien ja erittäin hienorakenteisten osien puhdistukseen. Sitä voidaan käyttää myös erittäin hienojen partikkeleiden valmistukseen esimerkiksi lääketeollisuudessa sekä maalipigmenteissä. Kuivapesussa hiilidioksidista toivotaan ympäristöystävällisempää ja myös ekonomisesti parempaa vaihtoehtoa nykyisin käytössä oleville liuottimille (PERC ja CFC 113). Hiilidioksidin käyttö kuivapesussa vaatii kuitenkin vielä teknologian ja laitteistojen kehittymistä. (Koljonen et al. 2002)

## 5 Tulevaisuus

Tällä hetkellä hiilidioksidia tuotetaan enemmän kuin sitä hyödynnetään uudelleen – vain muutama prosentti ihmisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä saadaan hyötykäyttöön. Vaikka hyödyntämistekniikoita on useita, ovat ne pienen mittakaavan keinoja eivätkä siten kykene kattamaan kaikkia syntyviä päästöjä. (Global CCS Institute et al. 2011) Suomessa suurimpia hiilidioksidin hyödyntäjiä ovat sellu- ja paperiteollisuus, virvoitusjuomateollisuus, vesienkäsittelylaitokset sekä maatalous. Useat näistä, kuten hiilihappojuomat ja jäähdytys, eivät kykene pitkäaikaiseen hiilidioksidin sitomiseen. Hiilidioksidin käyttö tulee kuitenkin tulevaisuudessa kasvamaan, kun haitallisemmat kemikaalit korvataan hiilidioksidilla. (Koljonen et al. 2002)

Hiilidioksidin uudelleenkäyttö öljynjalostuksessa (EOR) on hallitseva hyödyntämismuoto ja tulee olemaan sitä myös lähitulevaisuudessa. Kyseinen menetelmä on jo hyvin pitkälle kehittynyt ja se kykenee hyödyntämään suuria määriä hiilidioksidia. Suurimmalla osalla uusista hyödyntämiskeinoista on edessään vielä useiden vuosien kehitys ennen kuin ne saavuttavat teknisen valmiuden, jota kaupallisen laajuuden käyttöönotto edellyttää. Myös näitä hyödyntämismenetelmiä pidetään lupaavina tekniikoina, joita tulee kuitenkin vielä testata esimerkiksi pilottihankkein. (Global CCS Institute et al. 2011)

Hyödyntämistekniikoilla on siis vielä kasvunvaraa. Vaikka esimerkiksi EOR-tekniikkaa hyödynnetään jo laajassa mittakaavassa, myös sillä on yhä mahdollisuuksia kasvaa huomattavasti jopa lyhyessä ajassa. Esimerkiksi levien kasvatusta hiilidioksidin avulla puolestaan on vielä alkuvaiheessa ja kehitystyötä tarvitaan ennen kuin levien avulla tuotettava öljy voisi kilpailla raakaöljyn kanssa. Koska useat tekniikoista ovat vasta kehitysvaiheessa, niihin tarvittavat sijoitukset vaihtelevat suuresti. (Global CCS Institute et al. 2011)

Tärkein edellytys CCS-tekniologian kaupallistumiselle on sitova, kansainvälinen ilmastopöytäkirja sekä kansainvälinen yhteisymmärrys. Kun taloudelliset edellytykset on luotu, voidaan kaupallistumista nopeuttaa tekniologian kehittämisellä ja demonstroinnilla. (Teir et al. 2011) Vaikka hiilidioksidista kyetään hyödyntämään vasta

pientä osaa, tarjoaa suuri raaka-aineen määrä mahdollisuuden uusille toimijoille ja uusille innovaatioille (Turunen 2011).



## 6 Yhteenveto

Hiilidioksidi kasvattaa huonoa mainettaan kasvihuonekaasuna. Hiilidioksidipäästöt ovat suuria eikä niitä kyetä pienentämään tehokkaasti. Uusien tekniikoiden, kuten CCS:n, avulla ilmakehään pääseviä päästöjä voidaan rajoittaa, vaikkakin hitaasti: tekniikat ovat yhä melko uusia ja niiden integroiminen jo olemassa oleviin tuotantoprosesseihin on haastavaa. CCS ja hiilidioksidin uudelleen hyödyntäminen ovat ratkaisuja, jotka luovat polun kohti uudenlaista tuotantoa ja ajattelua.

Lainsäädäntö edesauttaa ympäristöystävällisempien prosessien käyttöönottoa: kansainvälinen ilmastopimus vaatii maita pienentämään päästöjään. Lisäksi esimerkiksi Suomi noudattaa EU:n sisäistä päästövähennysvelvoitetta. Jotta maat onnistuisivat pysymään alle asetetun päästörajoituksen, on uusia tekniikoita otettava käyttöön.

Hiilidioksidin ominaisuudet luovat mahdollisuuden sen moninaiseen hyödyntämiseen. Mm. hiilidioksidin myrkyttömyys sekä ominaisuudet liuottimena takaavat sen laajan hyödyntämisen esimerkiksi elintarviketeollisuudessa. Myös kemian- sekä petrokemianteollisuus käyttävät hiilidioksidia: hallitsevana hyödyntämiskohteena on käyttää hiilidioksidia apuna öljyn pumpaamisessa ylös maanalaisista lähteistä. Maataloudessa hiilidioksidia hyödynnetään luontaisena kasvutekijänä. Hiilidioksidilla on lisäksi useita muita käyttökohteita, kuten palosammuttimet.

Vaikka tulevaisuuden näkymät ovat vasta arvattavissa, tiedetään, että maapallon väkiluku kasvaa jatkuvasti. Tämä viittaa kasvaviin päästömääriin. Haaste on siis suuri niin eri maille, teollisuuslaitoksille kuin yksittäisille ihmisillekin. CCS, yhdessä hiilidioksidin hyödyntämisen kanssa, on kuitenkin suuri askel eteenpäin. Niiden, sekä muiden uusien, kehittyvien tekniikoiden, avulla kuitenkin päästään tilanteeseen, jossa syntyneet hiilidioksidipäästöt saadaan saavuttamaan niin ihmisille kuin maapallollekin hyväksyttävä taso. Taso, jolle tasapaino voidaan vakiinnuttaa.

## 7 Lähdeluettelo

AGA (2010a) Nesteytetyt kaasut [verkkodokumentti]. Julkaistu 2010 [viitattu 10.6.2011]. Saatavissa:

[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/nav\\_prod\\_bulk#2](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/nav_prod_bulk#2)

AGA (2010b) Hiilidioksidin käyttökohteet [verkkodokumentti]. Julkaistu 2010 [viitattu 6.7.2011]. Saatavissa:

[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/gasschool\\_co2\\_sol](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/gasschool_co2_sol)

AGA (2010c) Kuitulinja [verkkodokumentti]. Julkaistu 2010 [viitattu 17.7.2011]. Saatavissa:

[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/sol\\_fiber\\_line](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/sol_fiber_line)

AGA (2010d) Paperinvalmistusprosessin tehostaminen hiilidioksidilla [verkkodokumentti]. Julkaistu 2010 [viitattu 17.7.2011]. Saatavissa:

[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/sol\\_paper\\_efficiency](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/sol_paper_efficiency)

AGA (2011) Suojakaasukäsikirja [verkkodokumentti]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 18.7.2011]. Saatavissa:

<http://viewer.webproof.com/pageflip/277/52281/index.html#/1/>

Aittomäki A (2005) Hiilidioksidi kylmälaitoksissa. Kokemukset Suomessa [verkkodokumentti]. Julkaistu 2005 [viitattu 7.7.2011]. Raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Energia- ja prosessitekniikan laitos. 31 s.

Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.tut.fi/units/me/ener/julkaisut/CO2-loppuraportti.pdf>

Anderson S & Newell R (2003) Prospects for carbon capture and storage technologies [verkkodokumentti]. Julkaistu: tammikuu 2003 [viitattu 10.6.2011]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.rff.org/documents/RFF-DP-02-68.pdf>

Aresta M & Dibenedetto A (2007) Utilisation of CO<sub>2</sub> as a chemical feedstock: opportunities and challenges. Dalton Transactions [verkkolehti]. Julkaistu 26.6.2007 [viitattu 20.12.2011]. DOI: 10.1039/b700658f

Beyer S (2010) The chemical industry is trying to recycle carbon dioxide back into the production process [verkkodokumentti]. Julkaistu 27.10.2010 [viitattu 10.7.2011]. Saatavissa: [http://www.process-worldwide.com/management/research\\_development/articles/300742/](http://www.process-worldwide.com/management/research_development/articles/300742/)

Bowen F (2011) Carbon capture and storage as a corporate technology strategy challenge. Energy Policy, s. 2256-2264 [verkkolehti]. Vol 39:5 [viitattu 16.6.2011].

Brunner G (2005) Supercritical fluids: technology and application to food processing. J Food Eng, s.21-33 [verkkolehti]. Vol 67:1-2 [viitattu 9.7.2011]. ISSN 0260-8774

Chalmers H & Gibbins J (2008) Carbon capture and storage. Energy Policy, s. 4317-4322 [verkkolehti] Vol 36:12 [viitattu 7.6.2011]. ISSN 0301-4215.

Creutz C & Fujita E (2001a) Carbon dioxide as Feedstock [verkkodokumentti]. Julkaistu 2001 [viitattu 28.10.2011]. Brookhaven National Laboratory. Saatavissa: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=10153&page=83](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=10153&page=83)

Creutz C & Fujita E (2001b) Carbon dioxide as Feedstock [verkkodokumentti]. Julkaistu 2001 [viitattu 28.10.2011]. Brookhaven National Laboratory. Saatavissa: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=10153&page=85](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=10153&page=85)

Dry ice network.com (2011) Dry ice basics [verkkodokumentti]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 26.7.2011]. Saatavissa: <http://dryicenetwork.com/>

Elkanzi E.M (2011) Using carbon dioxide for alkaline wastewater treatment [verkkodokumentti]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 26.7.2011]. Saatavissa: [http://www.co2management.org/proceedings/Elkanzi\\_ARAMCO\\_CO2.pdf](http://www.co2management.org/proceedings/Elkanzi_ARAMCO_CO2.pdf)

Fortum (2011) Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi [verkkodokumentti].  
Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 7.6.2011]. Saatavissa PDF-tiedostona:  
[http://www.fortumresearch.com/filebank/25-Hiilidioksidin\\_varastointi\\_FI.pdf](http://www.fortumresearch.com/filebank/25-Hiilidioksidin_varastointi_FI.pdf)

Garcia-Gonzalez L, Geeraerd AH, Spilimbergo S, Elst K, Van Ginneken L, Debevere J,  
Van Impe JF & Devlieghere F (2007) High pressure carbon dioxide inactivation of mi-  
croorganisms in foods: The past, the present and the future. *Int J Food Microbiol*, s. 1-  
28 [verkkolehti]. Vol 117:1 [viitattu 7.7.2011].

Global CCS Institute & Parsons Brinckerhoff (2011) Accelerating the uptake of CCS:  
Industrial use of captured carbon dioxide [verkkodokumentti]. Julkaistu 1.3.2011  
[viitattu 9.7.2011]. Saatavissa PDF-tiedostona:  
[http://www.globalccsinstitute.com/sites/default/files/45071%20GCCSI%20Accelerating%20Report\\_INT\\_07\\_DTP.PDF](http://www.globalccsinstitute.com/sites/default/files/45071%20GCCSI%20Accelerating%20Report_INT_07_DTP.PDF)

IPCC (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [verk-  
kodokumentti]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New  
York, NY, USA: 2005 [viitattu 16.6.2011]. Raportti. Prepared by Working Group III of  
the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz B, Davidson O, de Coninck H,  
Loos M, and Meyer L (Ed.)], 442 s. Saatavissa PDF-tiedostona:  
[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)

Järvinen P (2009) Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi [verkkodokumentti]. Julkaistu  
2009 [viitattu 10.6.2011]. Hyvä tietää hiilestä, Energiateollisuus ry. ja Hiilitieto ry.,  
s.15. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.hiilitieto.fi/File/c37f0bcb-27b5-401d-9cee-  
da44aa12a3b9/Hyv%C3%A4+tiet%C3%A4+hiilest%C3%A4.pdf](http://www.hiilitieto.fi/File/c37f0bcb-27b5-401d-9cee-da44aa12a3b9/Hyv%C3%A4+tiet%C3%A4+hiilest%C3%A4.pdf)

Koljonen T, Siikavirta H & Zevenhoven R (2002) CO<sub>2</sub> capture, storage and utilisation  
in Finland [verkkodokumentti]. Julkaistu 29.8.2002 [viitattu 7.6.2011]. Saatavissa:  
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2002/co2capt.pdf>

Lawrence Livermore National Laboratory (2001) Science and technology review [verk-  
kodokumentti]. Julkaistu 30.12.2001 [viitattu 27.10.2011]. Saatavissa:  
<https://www.llnl.gov/str/November01/Kirkendall.html>

Messer Group (2011) Modified Atmosphere Packaging [verkkodokumentti]. Julkaisupäivämäärä tuntematon [viitattu 7.7.2011]. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Food/Modified\\_Atmosphere\\_Packaging.pdf](http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Food/Modified_Atmosphere_Packaging.pdf)

Nordkalk (2011) Veden pH ja alkaliteetti [verkkodokumentti]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 19.7.2011]. Saatavissa: <http://www.nordkalk.com/default.asp?viewID=717>

Opetushallitus (2011) 2. Eri olomuodot [verkkodokumentti]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 21.12.2011]. Saatavissa: [http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/fysiikka4/2/2.eri\\_olomuodot.html](http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/fysiikka4/2/2.eri_olomuodot.html)

Phillips CA (1996) Review: Modified atmosphere packaging and its effects on the microbiological quality and safety of produce. International Journal of Food Science and Technology, s. 463-479 [verkkolehti]. Vol 31:6 [viitattu 7.7.2011]

Praetorius B & Schumacher K (2009) Greenhouse gas mitigation in a carbon constrained world: The role of carbon capture and storage. Energy Policy, s. 5081-5093 [verkkolehti]. Vol 37:12 [viitattu 16.6.2011]. ISSN 0301-4215

PU Nordic (2011) Polyuretaanista (PUR/PIR) valmistetut lämmöneristeet [verkkodokumentti]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 28.10.2011]. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.pu-nordic.fi/files/pu-nordic/pdf/81228\\_PU\\_Nordic\\_lammoneriste\\_esite\\_spread\\_LR.pdf](http://www.pu-nordic.fi/files/pu-nordic/pdf/81228_PU_Nordic_lammoneriste_esite_spread_LR.pdf)

Reuters (2011) Durbanin ilmastokokous sopi Kioton sopimuksen jatkamisesta [verkkodokumentti]. Yle, Luonto ja ympäristö, artikkeli. Julkaistu: 11.12.2011, päivitetty 12.12.2011 [viitattu 18.12.2011]. Saatavissa: [http://yle.fi/uutiset/luonto\\_ja\\_ymparisto/2011/12/durbanin\\_ilmastokokous\\_sopi\\_kioton\\_sopimuksen\\_jatkamisesta\\_3095199.html](http://yle.fi/uutiset/luonto_ja_ymparisto/2011/12/durbanin_ilmastokokous_sopi_kioton_sopimuksen_jatkamisesta_3095199.html)

Rubin E. (2006) IPCC Special report on carbon dioxide capture and storage [verkkodokumentti]. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. February 20, 2006 [viitattu 10.6.2011]. Presentation to the RITE International Workshop on CO<sub>2</sub>

Geological Storage, Tokyo, Japan. Saatavissa PDF-tiedostona:  
[http://www.rite.or.jp/English/lab/geological/geowse/20-3-1\\_Rubin.pdf](http://www.rite.or.jp/English/lab/geological/geowse/20-3-1_Rubin.pdf)

Seppänen, R at al. (1991) MAOL-taulukot. Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto. Otava. Julkaistu 1991 [viitattu 20.12.2011]. ISBN 951-1-16053-2.

Siikamäki R (2001) Higher productivity and higher quality [verkkodokumentti]. Julkaistu 2001 [viitattu 18.7.2011]. Vaisala Helsinki. Saatavissa PDF-tiedostona:  
[http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Vaisala%20News%20Articles/VN157/VN157\\_Higher\\_Productivity\\_and\\_Higher\\_Quality.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Vaisala%20News%20Articles/VN157/VN157_Higher_Productivity_and_Higher_Quality.pdf)

Teir S, Tsupari E, Koljonen T, Pikkarainen T, Kujanpää L, Arasto A, Tourunen A, Kärki J, Nieminen M & Aatos S (2009). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). [Carbon capture and storage (CCS).] [verkkodokumentti]. Julkaistu: Espoo 2009 [viitattu 27.10.11]. VTT Tiedotteita . Research Notes 2503. 61 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2503.pdf>

Teir S, Hetland J, Lindeberg E, Torvanger A, Buhr K, Koljonen T, Gode J, Onarheim K, Tjernshaugen A, Arasto A, Liljeberg M, Lehtilä A, Kujanpää L & Nieminen M. (2010) Potential for carbon capture and storage (CCS) in the Nordic region. Julkaistu: Espoo 2010 [viitattu 27.10.2011]. VTT Tiedotteita – Research Notes 2556. 188 s. + liitt. 28 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2556.pdf>

Teir S, Arasto A, Tsupari E, Koljonen T, Kärki J, Kujanpää L, Lehtilä A, Nieminen M & Aatos S (2011) Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa [Application of carbon capture and storage (CCS) in Finnish conditions] [verkkodokumentti]. Julkaistu: Espoo 2011 [viitattu 26.10.2011]. VTT Tiedotteita – Research Notes 2576. 76 s. + liitt. 3 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2576.pdf>

Thayer RH (2011) Carbon dioxide enrichment methods [verkkodokumentti]. Hydrofarm Inc. Julkaistu 2011 [viitattu 28.10.2011]. Saatavissa: [http://www.hydrofarm.com/articles/co2\\_enrichment.php](http://www.hydrofarm.com/articles/co2_enrichment.php)

Tilastokeskus (2011) Kasvihuonekaasut 2010 [verkkodokumentti]. Suomen virallinen tilasto, Ympäristö ja luonnonvarat 2011. Helsinki, 13.12.2011 [viitattu 18.12.2011]. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.stat.fi/til/khki/2010/khki\\_2010\\_2011-12-13\\_fi.pdf](http://www.stat.fi/til/khki/2010/khki_2010_2011-12-13_fi.pdf)

Turunen H (2011) CO<sub>2</sub>-balance in the atmosphere and CO<sub>2</sub>-utilisation, An engineering approach [verkkodokumentti]. Oulu: elokuu 2011 [viitattu 25.10.2011]. Väitöskirja. Oulun yliopisto, Lämpö- ja diffuusioteeniikan laboratorio. 148 s. + liitt. 1 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://herkules oulu.fi/isbn9789514294877/isbn9789514294877.pdf>

Visser K (2002) Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) for the food processing and cold storage industries [verkkodokumentti]. Julkaistu: kesäkuu 2002 [viitattu 6.7.2011]. The official journal of Airah. Saatavissa: [http://www.r744.com/knowledge/papers/files/pdf/pdf\\_309.pdf](http://www.r744.com/knowledge/papers/files/pdf/pdf_309.pdf)

Wallenius J (2010) Levissä piilee potentiaalia tulevaisuuden bioenergiaksi [verkkodokumentti]. Julkaistu 1.6.2010 [viitattu 19.7.2011]. Saatavissa: <http://www.ts.fi/teemat/ymparisto/135378.html>

Ympäristöministeriö (2011) Kioton pöytäkirja [verkkodokumentti]. Päivitetty: 10.11.2011 [viitattu 18.12.2011]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=1885&lan=fi#a0>

Zhang J, Davis TA, Matthews MA, Drews MJ, LaBerge M & An YH (2006) Sterilization using high-pressure carbon dioxide. Journal of Supercritical Fluids, s. 354-372 [verkkolehti]. Vol 38:3 [viitattu 7.7.2011]. ISSN 0896-8446