Euroopan unionin osarahoittama

POHJOIS-POHJANMAA
COUNCIL OF OULU REGION

Haapaveden-Siikalatvan seutukunnan kehittämiskeskus

OAMK
OULUN AMMATTIKORKEAKOULU

# Haapaveden-Siikalatvan seutukunnan ekoenergia – toimintamalli maaseudun hybridiin uusiutuvaan energiaan (EKOENERGIA)

HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO, HYÖDYNTÄMINEN JA VARASTOINTI (CCUS)

Riina Juutinen, Tiina Mattila ja Karoliina Mäki (Oulun ammattikorkeakoulu)

# SISÄLTÖ

**Taustaa**

**Hiilidioksidin talteenotto**

**Hiilidioksidin hyödyntäminen**

**Hiilidioksidin varastointi**

**Bioenergian tuotantoon yhdistetty CCUS**

Taustaa

# Taustaa hiilensidonnan tekniikoille

Suurimmat hiilidioksidin päästölähteet muodostuvat teollisuudesta ja energiantuotannosta. Hiilidioksidin talteenoton, hyödyntämisen ja varastoinnin teknologiat tarjoavat ratkaisuja sellaisilla teollisuuden sektoreilla, joissa päästöjen vähentäminen ei ole muutoin riittävän nopeaa.

Hiilen sidontatekniikoiden avulla voidaan pitää teollisuus- ja energiantuotanto toiminnassa siirtymävaiheessa kohti hiilineutraaleja ratkaisuja.

# Hiilidioksidi ja ilmastotavoitteet

Euroopan Unioni on linjannut ilmastotavoitteita, jotka edellyttävät päästöjen vähentämistä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen teknologiat ovat tunnustettu keskeisiksi teknologioiksi EU:n ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

Suomen ilmastotavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteiden edellytyksenä on teknisten hiilinielujen käyttöönotto ja negatiivisten päästöjen muodostaminen.

# Hiilidioksidin talteenotto

# Yleistä hiilidioksidin talteenoton teknologiat

CCUS-teknologiat ovat keskeinen keino vähentää teollisuuden ja energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidin talteenotto pistemäisistä lähteistä yhdistettynä pysyvään varastointiin tarjoaa ratkaisun, jolla korvataan fossiilipohjaisen energian käyttöä.

CCU-teknologioiden avulla hiilidioksidia on mahdollista hyödyntää raaka-aineena ja korvata samalla fossiilisten raaka-aineiden käyttöä. Tekniikat soveltuvat käytettäväksi myös silloin, kun $CO_2$-päästöjä on hankalaa vähentää muilla keinoilla.

# Hiilidioksidin talteenoton teknologiat

Hiilidioksidin talteenoton teknologiat pistemäisistä lähteistä voidaan jakaa talteenottoon ennen polttoa, happipolttoon ja polton jälkeiseen talteenottoon.

Hiilidioksidia voidaan siepata ilmasta DAC-teknologialla. Tekniikoiden tavoitteena on tuottaa puhdas $CO_2$-virta kuljetusta, jatkokäyttöä ja varastointia varten.

# Hiilidioksidin talteenotto ennen polttoprosessia

Hiilidioksidia voidaan talteenottaa polttoaineesta ennen polttoprosessia (eng. pre-combustion capture). Talteenottoa ennen polttoprosessia voidaan käyttää kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kaasutuksen yhteydessä. Polttoaineena käytetään esimerkiksi kivihiiltä ja maakaasua. Polttoaineet kaasutetaan synteettiseksi polttokaasuseokseksi, mikä koostuu vedystä $H_2$, hiilimonoksidista CO ja hiilidioksidista $CO_2$. Haitalliset komponentit, kuten rikkiyhdisteet, vetysyanidi ja ammoniakki, poistetaan.

# Lisää huomioita talteenotosta ennen polttoprosessia

Tuotekaasulle suoritetaan käsittely vesikaasun siirtoreaktion avulla. Tällöin kaasu reagoi höyryn kanssa ja lopputuotteena muodostuu kaasua, joka koostuu vedystä ja hiilidioksidista. Tämän jälkeen $CO_2$ voidaan erottaa kaasusta esimerkiksi adsorptiolla tai fysikaalisella ja kemiallisella absorptiolla.

Tekniikassa käytetään korkeaa painetta ja $CO_2$-pitoisuus on korkea, mikä helpottaa hiilidioksidin erotusta. Hiilidioksidin talteenottoaste on tekniikassa jopa 90 %. Tulee huomioida, että tekniikka on hankala jälkiasentaa jo olemassa oleviin voimaloihin ja kaasutus- sekä reformointilaitokset ovat kalliita.

# Happipoltto

Happipoltossa (eng. oxy-fuel combustion) polttoaine poltetaan lähes puhtaan hapen ja kierrätetyn savukaasun seoksessa. Prosessissa typpi poistetaan ennen palamisprosessia, jolloin $CO_2$ -pitoisuus on tyypillisesti korkea, noin 80–95 vol-%. Tämä tekee hiilidioksidista helposti erotettavaa ja energiankulutus ei nouse korkeaksi.

Puhdasta happea tuotetaan ilmanerotuksella, ASU (engl. Air Separation Unit), mikä on prosessin suurin energiankuluttaja ja aiheuttaa korkeat kustannukset. Happipolttoon kuuluu voimalaitos, joka tuottaa sähköä. Hiilidioksidin käsittely-yksikön, CPU (engl. $CO_2$ Processing Unit) avulla hiilidioksidi kuivataan, puhdistetaan ja puristetaan putkistoja varten.

# Lisää huomioita happipoltosta

Happipoltto on yleisimmin käytetty hiilen ja maakaasun prosesseissa. Tekniikka soveltuu käytettäväksi lähes missä tahansa prosessissa, jossa on suuret savukaasuvirrat.

Tekniikan etuna on korkean $CO_2$-virran muodostuminen ja korkea talteenottoaste.

# Polton jälkeinen talteenotto

Polton jälkeisessä talteenotossa (eng. post-combustion capture) hiilidioksidi erotetaan savukaasusta matalassa paineessa ja pesureiden avulla. Hiilidioksidi johdetaan pesurikolonniin, jossa $CO_2$ sidotaan liuottimeen. Liuottimena käytetään yleisesti kemiallisia liuottimia, esimerkiksi monoetanoliamiineja (MEA). Happamat komponentit ja hiukkaset poistetaan ennen $CO_2$:n erotusta, jottei liuotin hajoa kemiallisesti. Liuos lämmitetään tai painetta muutetaan, jolloin $CO_2$ vapautuu kaasumaiseen muotoon. $CO_2$ voidaan ottaa talteen ja liuos kierrättää takaisin pesurivaiheeseen.

# Huomioita polton jälkeisen talteenoton soveltuvuudesta

Polton jälkeinen talteenotto soveltuu käytettäväksi savukaasuja tuottavissa laitoksissa, kuten voimalaitoksissa, teräs-, sementti- tai kemianteollisuudessa. Tekniikka on helppo jälkiasentaa jo olemassa oleviin rakenteisiin. Liuoksella on korkea energiankulutus regenerointivaiheessa, mikä heikentää voimalaitoksen hyötysuhdetta. Liuoksen hajoaminen ja haihtuminen regenerointivaiheessa lisäävät kustannuksia, kun liuosta lisätään hajonneen tilalle. Tulee huomioida, että amiinipohjaiset liuottimet aiheuttavat korroosiota laitteille.

# Suora talteenotto ilmasta

Hiilidioksidia on mahdollista siepata suoraan ilmasta. Menetelmästä voidaan käyttää lyhennettä DACCS, (engl. Direct Air Capture and Storage). Hiilidioksidin suoralla talteenotolla on mahdollista väkevöidä ilmasta lähes puhdas hiilidioksidivirta (98%).

DACCS on vaihtoehtoinen ja täydentävä teknologia kompensoimaan jo tuotettuja hiilidioksidipäästöjä. Sen avulla on mahdollista tuottaa negatiivisia $CO_2$-päästöjä.

# Ilmasta talteenotettavan hiilidioksidin tekninen perusidea

Tekniikoiden perusideana hiilidioksidi ja ilma erottuvat ilmasta adsorbenttiin. Tekniikat jaotellaan korkean- ja matalan lämpötilan tekniikoihin. Korkean lämpötilan tekniikoissa käytetään vesiliuosratkaisua, joissa saadaan aikaiseksi kaksi sykliä samanaikaisesti. Matalan lämpötilan tekniikoissa käytetään pääasiassa yhtä kiinteän sorbentin yksikköä, jossa adsorptio ja desorptio tapahtuvat vuorotellen.

DACCS-tekniikoiden etuna on se, etteivät ne ole sidottuja tiettyyn paikkaan. Tulee huomioida, että ilman sisältämä $CO_2$ -pitoisuus on matala, mikä aiheuttaa korkeita kustannuksia.

# Hiilidioksidin erotustekniikat talteenoton jälkeen: kemiallinen absorbtio

Hiilidioksi voidaan erottaa savukaasuista kemiallisella ja fysikaalisella absorptiolla. Kemiallisessa absorptiossa hiilidioksidin ja nesteen välillä tapahtuu kemiallinen reaktio. Tekniikassa käytettyjä nesteitä ovat amiinit, vesipohjaiset ammoniakki ja happopesu, jäähdytetty ammoniakki ja karbonaatit. Kemiallista absorptiota käytetään, kun savukaasujen $CO_2$:n osapaine on matala (alle 10 bar). Tekniikka soveltuu käytettäväksi esimerkiksi sementin, raudan ja teräksen valmistuksessa, lämpövoimalaitoksissa sekä öljynjalostuksessa. Kemiallisella absorptiolla on korkea energiankulutus.

# Hiilidioksidin erotustekniikat talteenoton jälkeen: fysikaalinen absorbtio

Fysikaalisessa absorptiossa $CO_2$ liukenee paineessa nesteeseen. Käytettyjä puhdistusmenetelmiä ovat vesipesu sekä polyetyleeniglykolien dimetyyli. Tekniikkaa käytetään, kun savukaasujen hiilidioksidin osapaine on korkea (yli 10 bar). Tekniikka soveltuu käytettäväksi öljynjalostuksessa, kemianteollisuudessa sekä lämpövoimalaitoksissa.

Molemmat absorptiotekniikat poistavat $CO_2$, $SO_2$, $NH_3$, $H_2S$, siloksaaneja, HCl, HF-yhdisteitä ja hiukkasia. Lisäksi kemiallisella absorptiolla saadaan poistettua $NO_X$ ja fysikaalisella puolestaan vesihöyryä.

# Hiilidioksidin erotustekniikat talteenoton jälkeen: kalvoerotus

Kalvoerotuksessa hiilidioksidi suodattuu selektiivisesti kalvon läpi. Tämä tarkoittaa sitä, että kalvo päästää läpi tietyt molekyylit ja estää osan läpipääsyn.

Kaasun kulkeutuminen kalvon läpi perustuu paine-eroon kalvon molemmilla puolilla. Kalvoerotusta käytetään lämpövoimalaitoksissa, kemianteollisuudessa sekä öljynjalostuksessa. Tekniikan etuna on kemikaalittomuus ja kustannustehokkuus.

# Hiilidioksidin erotustekniikat talteenoton jälkeen: kryogeeninen erotus

Yksi talteenoton teknologioista on kryogeeninen erotus. Tekniikassa hiilidioksidin erotus perustuu kaasun jäähdyttämiseen ja nesteyttämiseen.

Kryogeenisessa erotuksessa prosessiin tarvitaan korkea paine ja matala lämpötila. Tekniikan huonona puolena on korkea energiankulutus.

# Hiilidioksidin hyödyntäminen

# Hiilidioksidin hyödyntäminen ja laatuvaatimukset

Hiilidioksidi voidaan hyödyntää suoraan tai muuttamalla se tuotteiksi kemiallisen konversion kautta. Hiilidioksidin jatkohyödyntämisessä tulee huomioida mahdolliset laatuvaatimukset.

$CO_2$ voidaan hyödyntää suoraan elintarviketeollisuudessa esimerkiksi elintarvikkeiden suojapakkauksissa. Tähän vaaditaan erittäin puhdasta kaasua, jotta vältytään haju- ja makuvirheiltä (laatuvaatimus $CO_2 \geq 99{,}9\%$).

# Lisää huomioita laatuvaatimuksista

Juomateollisuudessa hiilidioksidia tarvitaan esimerkiksi hiilihapotuksessa. Juomateollisuudessa on usein tiukemmat vaatimukset verrattuna elintarvikekäyttöön ja pienetkin epäpuhtaudet vaikuttavat makuun ja aromiin (laatuvaatimus $CO_2 \geq$ 99,9%).

Lääketieteelliseen käyttöön vaaditaan puhdas hiilidioksidivirta, $CO_2 \geq$ 99,5%.

# Muita hiilidioksidin hyödyntämiskohteita

Hiilidioksidia voidaan hyödyntää suoraan tehostetussa öljyntuotannossa ja kasvihuoneissa. Hiilidioksidia käytetään tehostettuun öljyntuotantoon (EOR) noin 70–80 miljoonaa tonnia vuosittain. Kasvihuoneissa hiilidioksidia käytetään fotosynteesin optimoinnissa. Sen käytöllä voidaan tehostaa saantoa jopa 25–30 %.

Hiilidioksidista voidaan valmistaa tuotteita kemiallisen konversion kautta. Suurin hiilidioksidin käyttäjä on lannoiteteollisuus, jossa hiilidioksidia käytetään urean valmistukseen noin 130 miljoona tonnia vuosittain. Hiilidioksidista voidaan lisäksi valmistaa kemiallisen konversion kautta polttoaineita sekä rakennusmateriaaleja, kuten betonia ja sementtiä.

# Metanointi ja biometanointi

Metanoinnin prosessissa hiilidioksidi ($CO_2$) ja vety ($H_2$) muunnetaan metaaniksi.

Biometanointi voidaan suorittaa biokaasuprosessissa kaasun käsittelyssä. Tällä tavoin voidaan nostaa metaanipitoisuutta seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti: $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

# Biometanointiprosessin jaottelu

Biometanointiprosessi voidaan jaotella in-situ ja ex-situ reaktioihin. In-situ reaktiossa vety injektoidaan suoraan biokaasureaktoriin, jossa se reagoi hiilidioksidin kanssa.

Ex-situ reaktiossa ulkoiseen reaktoriin ohjataan $CO_2$ ja $H_2$. In-situ reaktio on näistä kahdesta edullisempi, koska prosessi voidaan toteuttaa jo olemassa olevissa rakenteissa.

# Power-to-X

Power to X-tekniikoiden avulla voidaan valmistaa polttoaineita, kemikaaleja ja polymeerejä hiilineutraalisti. Hiilidioksidin talteenotto on tärkeä osaprosessi tuotteiden valmistuksessa.

Hiilidioksidia voidaan talteenottaa esimerkiksi biokaasulaitoksista tai metsäteollisuuden prosesseista.

# E-metaani ja Power-to-X

Uusiutuvaa e-metaania voidaan tuottaa Power-to-X-menetelmällä. $CO_2$ talteenotetaan esimerkiksi biokaasulaitoksesta. Vihreä vety tuotetaan elektrolyysillä uusiutuvaa energiaa ja vettä käyttäen.

E-metaanille voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa infrastruktuuria, joka on käytössä nesteytetylle maakaasulle ja biokaasulle (putkistot, kuorma-autot ja laivat).

# Hiilidioksidipohjaiset polymeerit

Talteenotettu hiilidioksidi soveltuu käytettäväksi polymeerien raaka-aineena korvaamaan raakaöljyä, maakaasua ja hiiltä. Olefiinit kuuluvat keskeisimpien välituotteiden joukkoon valmistettaessa polymeerejä. Olefiineja voidaan valmistaa synteesin kautta hiilidioksidista ja vedystä.

Esimerkiksi polyolefiinien valmistus aloitetaan talteenottamalla ja puhdistamalla hiilidioksidi teollisuuden savukaasuvirroista. Olefiineja voidaan valmistaa hiilidioksidin ja vedyn käänteisessä vesi-kaasunsiirtoreaktiossa, jossa muodostuu synteesikaasua, $CO$ + $H_2$. Tämän jälkeen Fischer-Tropsch synteesillä voidaan valmistaa kevyitä olefiineja ja näistä edelleen polyolefiineja (PP ja PE).

# Hiilidioksidin mineralisaatio

Hiilidioksidia voidaan sitoa mineralisoimalla. Tämä voidaan toteuttaa joko johtamalla hiilidioksidi mineraaliesiintymään tai viemällä mineraali hiilidioksidin syntypaikalle. Reaktiossa $CO_2$ reagoi mineraalien metallioksidien kanssa muodostaen metallikarbonaatteja.

Lopputuotteet ovat pysyviä ja ympäristölle vaarattomia, joten voidaan puhua lopullisesta varastoinnista. Mineraalikarbonoinnin reaktio on luonnostaan hidas, joten sitä voidaan nopeuttaa lisäämällä painetta ja lämpötilaa. Kuitenkin nopeuttamalla reaktiota myös energiankulutus kasvaa.

# Mineralisaatiossa luonnon mineraaleja tai prosessisivuvirtoja

Mineralisaatiossa voidaan hyödyntää joko luonnon mineraaleja tai teollisuuden prosessien sivutuotteita. Luonnonmineraaleja ovat esimerkiksi magnesiumsilikaatit. Prosessien sivutuotteita voivat olla esimerkiksi raudan- ja teräksen jalostuksen sivutuotteita.

Kalsiumkarbonaatin käyttökohteita löytyy esimerkiksi raaka-aineena kemian- ja metalliteollisuudessa, maataloudessa sekä teiden rakentamisessa. Lopullinen hyödyntämiskohde riippuu mineraalien sisältämistä haitta-aineista ja niiden liuokoisuudesta.

# Muuta huomioitavaa mineralisaatiosta

Mineralisaatioreaktiossa tulee huomioida, että mineraalimäärä kasvaa alkuperäiseen määrään verrattuna eikä näin ollen mahdu alkuperäiseen tilavuuteen.

Hiilidioksidin mineralisaatio vaatii sähköä jauhamiseen ja murskaamiseen sekä energiaa hiilidioksidin tai mineraalien kuljettamiseen. Käytetty raaka-aine vaikuttaa energiankulutukseen ja valittuun prosessiin.

# Hiilidioksidin hyödyntäminen rakennusmateriaaleissa

Betonin valmistuksessa käytetään sementtiä sideaineena. Yhteen kuutiometriin betonia kuluu noin 200–400 kg eli 8–16 paino-% sementtiä.

Sementti koostuu luonnonmateriaaleista, erityisesti kalkkikivestä.

# Huomioita betoni- ja sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöistä

Betoni- ja sementtiteollisuudessa muodostuu merkittävästi hiilidioksidipäästöjä maailmanlaajuisesti. Hiilidioksidia vapautuu sementinvalmistuksessa, kun kalkkikiveä eli kalsiumkarbonaattia poltetaan.

Sekoitusprosessissa osa kalsiumista voidaan karbonatisoida lisäämällä siihen hiilidioksidia. Hiilidioksidia voidaan käyttää betonin sideaineena vähentäen samalla käytettävän sementin määrää. Menetelmän etuna on valmistusprosessin aikaisten päästöjen väheneminen sekä muodostunut kalsiumkarbonaatti, mikä parantaa betonin puristuslujuutta.

# Hiilidioksidin varastointi

# Geologinen varastointi

Geologinen varastointi suoritetaan direktiivin 2009/31/EY mukaisesti ja sillä varmistetaan talteenoton turvallisuus ja hiilidioksidin pysyvä eristäminen ilmakehästä.

Talteenoton ja paineistuksen jälkeen hiilidioksidi voidaan varastoida injektoimalla se geologisiin varastointipaikkoihin, kuten maaperään, meren pohjaan, öljyesiintymiin tai mineralisoimalla. Varastointipaikan tulisi olla mahdollisimman lähellä hiilidioksidin talteenottopaikkaa logistiikan kustannuksia ajatellen.

Varastoitaessa hiilidioksidi on nestemäisessä muodossa ja sen tilavuus pienenee.

# Geologinen varastointi öljyesiintymiin ja pohjavesikerrostumiin

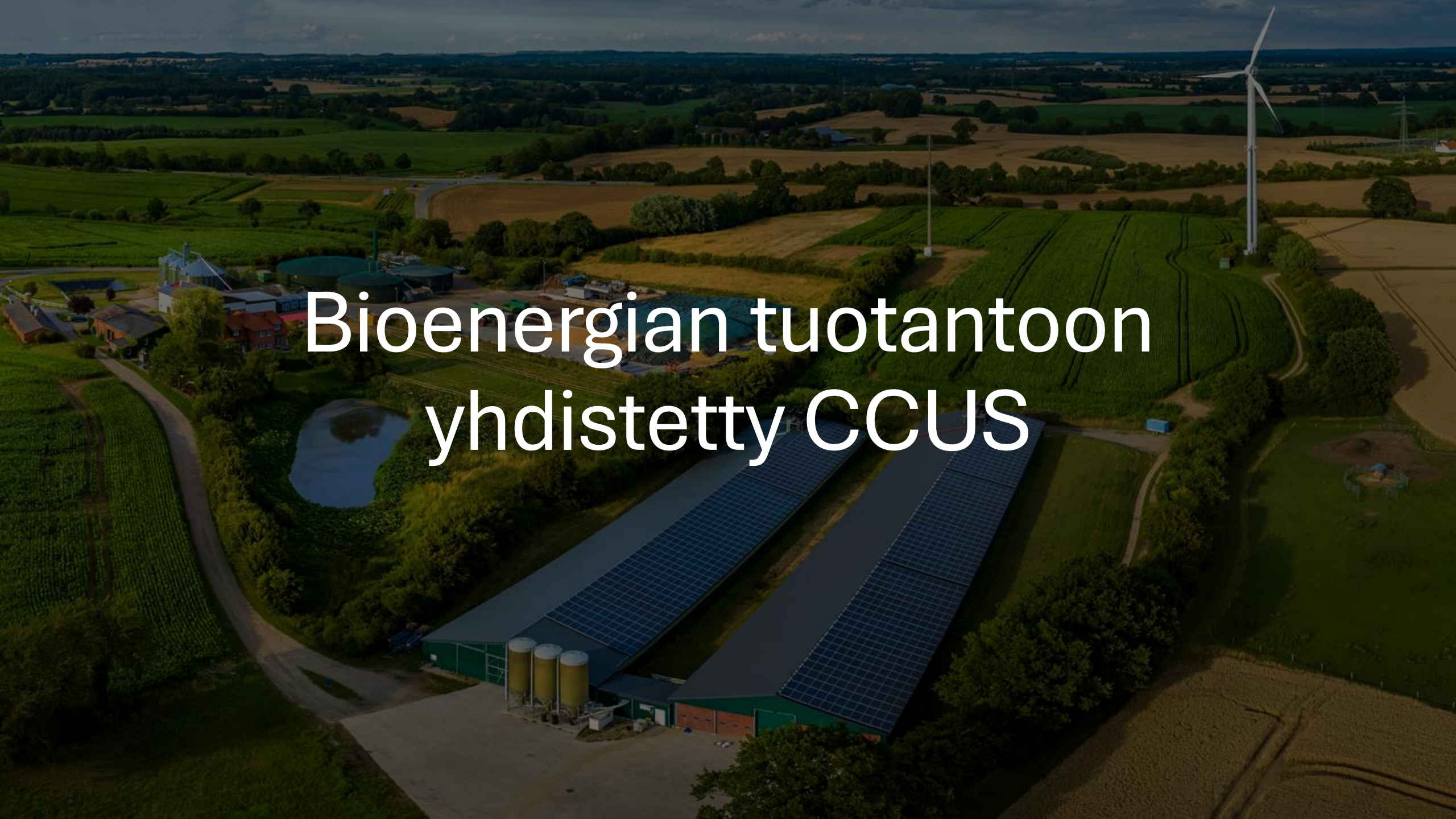
Hiilidioksidin geologinen varastointi öljyesiintymiin on käytetty ratkaisu öljy- ja maakaasuteollisuudessa. Öljyn ja kaasun tuottaminen helpottuu, kun hiilidioksidia pumpataan öljy- tai maakaasuesiintymiin. Hiilidioksidi paineistetaan nestemäiseksi, pumpataan vähintään 800 metrin syvyyteen ja paikka tiivistetään hyvin, jotta se pysyy nestemäisenä.

Hiilidioksidia voidaan varastoida suolaisiin pohjavesikerrostumiin, jotka koostuvat mineraali- ja orgaanisesta aineksesta. Varastointipaikkana muistuttavat rakenteeltaan öljy- ja maakaasukerrostumia, mutta ovat näitä yleisempiä.

# Lisää huomioita geologisesta varastoinnista

Teoriatasolla hiilidioksidia on mahdollista sitoa meren pohjakerrostumiin. Kuitenkin tekniikalla on mahdollisesti haitallisia vaikutuksia meriympäristöön, laskemalla meren pH:ta ja aiheuttamalla happamoitumista. Tämän takia tekniikka on kielletty Euroopan alueella.

Suomessa ei ole mahdollisuutta varastoida hiilidioksidia geologisesti. Hiilidioksidi tulee sitoa, käyttää muilla tavoin tai vaihtoehtoisesti kuljettaa rajojen yli, mikä lisää kustannuksia ja logistiikan päästöjä.


Bioenergian tuotantoon
yhdistetty CCUS

# Bioenergian tuotantoon yhdistetty CCUS

Bioenergian tuotantoon yhdistetystä hiilidioksidin talteenotosta, hyödyntämisestä ja varastoinnista käytetään lyhennettä bio-CCUS tai BECCUS (engl. Bioenergy with carbon capture, utilization and storage). Biomassa muutetaan polttoaineiksi, hyödynnetään sähkön tai lämmön tuottamiseen tai varastoidaan pysyvästi.

Biogeeninen hiilidioksidi on peräisin orgaanisen aineen hajoamisesta tai palamisesta. Biogeenistä alkuperää oleva hiilidioksidi on kestävää fossiiliseen verrattuna, koska se on peräisin luonnollisesta hiilen kierrosta.

# Biokaasun tuotanto ja hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidia voidaan talteenottaa esimerkiksi biokaasuprosessista, josta se muuten vapautuisi ilmakehään. Talteenottamalla $CO_2$, biokaasulaitos voi lisätä energiaomavaraisuuttaan ja huoltovarmuuttaan. Tulee huomioida, että hiilidioksidin talteenottojärjestelmä lisää investointikustannuksia ja hiilidioksidin jatkokäyttö tulee suunnitella taloudellisesti järkevästi.

Hiilidioksidia bioperäisistä lähteistä voidaan talteenottaa samoilla teknologioilla kuin fossiilista alkuperää olevaa hiilidioksidia.

# Nettonegatiivisten $CO_2$-päästöjen tuottaminen

Bioperäisen hiilidioksidin hyötykäytöllä on mahdollista vähentää hiilidioksidipäästöjä, jos bioperäisellä $CO_2$:lla korvataan fossiilisen hiilidioksidin käyttöä.

Nettonegatiivisten hiilidioksidipäästöjen tuottaminen tapahtuu ottamalla hiilidioksidi talteen bioenergiasta, biogeenisistä savukaasuista tai ilmasta talteenottamalla ja varastoimalla.

# Miten miinuspäästöjä syntyy?

Miinuspäästöjä syntyy, kun metsät ja muu biomassa sitoo itseensä hiiltä ilmakehästä. Jos hiili talteenotetaan ja varastoidaan pysyvästi, tuotetaan miinuspäästö. Jos biomassa poltetaan pysyvän varastoinnin sijaan, vapautuu sidottu hiili takaisin ilmakehään ja miinuspäästö nollaantuu. Suomessa BECCS on erityisen potentiaalinen ratkaisu esimerkiksi yhdistettynä sellun tuotantoon, jätteenpolttolaitoksiin, biopolttoaineiden tuotantoon tai sähkö- ja lämpövoimaloihin.

# Yhteenveto

# Yhteenveto

CCUS-teknologiat ovat keskeisessä osassa teollisuuden ja energiasektorin siirtymistä kohti vähähiilisyyttä. Hiilidioksidi tulee nähdä päästön lisäksi hyödynnettävänä raaka-aineena.

Jotta saavutetaan suurin ilmastohyöty ja asetetut ilmastotavoitteet, tulee hiilidioksidi varastoida pysyvästi geologisella varastoinnilla ja mineralisoimalla. Tavoitteiden saavuttamiseksi biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämistä tulee lisätä ja korvata sillä fossiilisen hiilidioksidin käyttöä.

BECCS- ja DACCS-tekniikoilla voidaan tuottaa nettonegatiiviset $CO_2$-päästöt, kun hiilidioksidia poistetaan ilmakehästä ja varastoidaan pysyvästi.

# Lähteitä


Betoni, n.d., Betonin valmistus. Saatavissa: https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/ [viitattu: 21.4.2026]

Biosykli $CO_2$, n.d.a, Rakennusmateriaalit. Saatavissa: https://sites.google.com/lab.fi/biosykli-co2/k%C3%A4ytt%C3%B6kohteet/rakennusmateriaalit [viitattu: 23.4.2026]

Biosykli $CO_2$, n.d.b, Hiilidioksidin puhdistus. Saatavissa: https://sites.google.com/lab.fi/biosykli-co2/puhdistus [viitattu: 23.4.2026]

Direktiivi 2009/31/EY. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32009L0031 [viitattu: 17.4.2026]

# Lähteitä

Gasum 2025. Biogeeninen hiilidioksidi on biokaasun potentiaalinen sivutuote – Gasum tutkii sen mahdollisuuksia useassa hankkeessa. Saatavissa: https://www.gasum.com/fi/uutiset-ja-asiakastarinat/artikkelit/2025/biogeeninen-hiilidioksidi-on-biokaasun-potentiaalinen-sivutuote--gasum-tutkii-sen-mahdollisuuksia-useassa-hankkeessa/ [viitattu: 22.4.2026]

IEA Bioenergy 2025. BECCUS Science & Policy, WP7 Summary Report. Contribution of IEA Bioenergy Task 45 & Task 40 to Inter-Task Project (ITP) Management of biogenic CO2: BECCUS Phase 2. Saatavissa: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/09/IEA-Bioenergy_Intertask_BECCUS_Phase2_Science-and-Policy-Report.pdf [viitattu: 20.4.2026]

# Lähteitä

Landau, T., n.d. Hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (CCU ja CCS) VTT. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/hiilidioksidin-talteenotto-kaytto-ja-varastointi-ccu-ja-ccs [viitattu: 17.4.2026]

Landström, M., 2023. Miinuspäästöt tarvitsevat kannustimet, mutta niillä ei pidä edistää hakkuita. Saatavissa: https://arkisto.sitra.fi/blogit/miinuspaastot-tarvitsevat-kannustimet-mutta-niilla-ei-pida-edistaa-hakkuita/ [viitattu: 20.4.2026]

# Lähteitä

Mäkikouri, S., Kujanpää, L., Lehtonen, J., Heikkinen, N., Linjala, O., Jutila, E., ja Reinikainen, M. 2024. VTT. Projektiraportti: Selvitys hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön kansallisesta ilmasto- ja talouspotentiaalista. Saatavissa: https://metsateollisuus.fi/wp-content/uploads/2025/02/66c81a80456d0b63f25c89b9_VTT20projektiraportti_Selvitys20hiilidioksidin20talteenoton20ja20hyC3B6tykC3A4ytC3B6n20potentiaalista.pdf *[viitattu: 21.4.2026] (Dian 19 kuva muokattu mukaillen tästä lähteestä)*

Suomen ympäristökeskus, n.d., Ilmasto-opas.fi. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Saatavissa: https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi [viitattu: 17.4.2026]

# Lähteitä

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. ja Aatos, S., 2011. VTT. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Saatavissa: https://publications.vtt.fi/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf [viitattu: 17.4.2026]

Kuvalähteet: Pixabay