

Johanna Kutuniva

UUSIUTUVAT ENERGIAT
Hiilidioksidin hyödyntäminen ja kuivamädätys

Johanna Kutuniva

UUSIUTUVAT ENERGIAT

Hiilidioksidin hyödyntäminen ja kuivamädätys

Jyväskylän yliopisto
Kokkolan yliopistokeskus Chydenius
&
Oulun yliopisto
Oulun Eteläisen Instituutti

2012



POHJOIS-POHJANMAA
Council of Oulu Region



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY OF OULU



ISBN 978-951-39-4802-3 (nid.)

ISBN 978-951-39-4803-0 (pdf)

ESIPUHE

Kiinnostus uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämiseksi on kasvanut. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä sekä osuutta energian kulutuksesta. Tavoitteena on myös fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen. Uusiutuvan energian käytön lisääminen antaa mahdollisuuden yrittäjyydelle ja maaseudun elinvoimaisuudelle. Jotta nämä mahdollisuudet voidaan hyödyntää, tarvitaan sen tueksi tutkimusta ja tutkimustulosten menestyksestä kaupallistamista.

Tämän julkaisun ensimmäisessä osassa selvitetään erilaisia mahdollisuuksia hyödyntää bio- ja puukaasun ohella muodostuvaa hiilidioksidia ja erityisesti sen hyötykäyttöä kasvihuoneympäristössä. Toisessa osassa käsitellään kuivämädätysteknologiaa sekä siihen liittyviä käyttökokemuksia kirjallisuuteen ja henkilökohtaisiin haastatteluihin pohjautuen. Julkaisun tarkoituksena on tukea uusiutuvaan energiaan liittyvää tutkimus- ja kehittämistoimintaa. Oulun Eteläisen alueella on olemassa biokaasulaitoksia, ja hiilidioksidin hyötykäyttö esimerkiksi kasvihuoneissa voisi olla yksi ratkaisu hiilidioksidipäästöjen pienentämiseksi. Maatalousvaltaisen alueen maatioilla orgaaninen aines on perinteisesti hajotettu märkämädätyksen keinoin. Kuivämädätys voisi olla vaihtoehtoinen ratkaisu maatalouden ympäristökuormituskysymyksiin.

Julkaisua varten tehty tutkimustyö on osa Nivala-Haapajärven ja Haapaveden-Siikalatvan seutukuntien koheesio- ja kilpailukykyohjelman (KOKO) maaseutu ja luonnonvarat -toimenpidekokonaisuuden toteuttamista. Työtä on ohjannut Oulun Eteläisen instituutin, muiden Oulun Eteläisen korkeakoulukeskustoimijoiden sekä Kokkolan yliopistokeskus Chydeniuksen edustajista koottu työryhmä.

Lopuksi haluamme kiittää kaikkia yhteistyötahoja; tutkijoita, aktiivisia yrityksiä, rahoittajia sekä kaikkia niitä, jotka ovat antaneet oman panoksensa tämän julkaisun toteutukseen.

Ulla Lassi
Professori
Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Eija-Riitta Niinikoski
Kehityspäällikkö
Oulun yliopisto,
Oulun Eteläisen instituutti

HIILIDIOKSIDIN HYÖDYNTÄMINEN KASVIHUONEISSA

1 Johdanto	7
2 Hiilidioksidi	8
2.1. Yleistä	8
2.2. Hiilidioksidin hyötykäyttö	10
2.3. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi	14
3 Kasvihuoneet ja hiilidioksidi	17
3.1. Fotosynteesin perusteet	17
3.2. Hiilidioksidin vaikutus kasvuun	20
3.3. Lämpötilan vaikutus kasvuun	24
3.4. Biokaasu, hiilidioksidi ja kasvihuoneet	27
4 Johtopäätökset	28
Lähteet	28

KUIVAMÄDÄTYS

1 Johdanto	35
2 Yleistä	35
3 Raaka-aineet ja olosuhteet	37
4 Kuivamädätysteknologiat	46
5 Johtopäätökset	56
Lähteet	57

Hiilidioksidin hyödyntäminen kasvihuoneissa



1 JOHDANTO

Kiinnostus uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämiseksi on kasvanut ja tähän on asetettu tavoitteet niin valtakunnallisesti kuin EU-tasollakin. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on lisätä uusiutuviin energialähteiden käyttöä sekä osuutta energian kulutuksesta, mikä on energiasäästön ohella merkittävä keino saavuttaa Suomen ilmastotavoitteet (Työ- ja elinkeinoministeriö, Uusiutuvat energialähteet). EU-tasolla tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä nostaa uusiutuvan energian osuus 20 prosenttiin energian loppukulutuksesta. Suomelle asetettu tavoite on 38 %. Vuonna 2005 uusiutuvan energian osuus Suomessa oli 28,5 % (Työ- ja elinkeinoministeriö, Tiedote 2010). Vastaavasti tavoitteet on asetettu fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiseksi. Uusiutuvia energiamuotoja hyödyntävää pienenergiantuotantoa ei ole tutkittu laajemmin, mutta toisaalta siitä ei ole vielä paljoa käyttökokemustakaan. Tästä syystä on koettu olevan tarvetta erityisesti biokaasu- ja puukaasuteknologiaan sekä niiden yhdistelmään liittyvälle tutkimustoiminnalle (Heiskanen, H. ja Leppälä, H., 2011).

Tämän taustaselvityksen tarkoituksena on selvittää erilaisia mahdollisuuksia hyödyntää bio- ja puukaasun ohella muodostuvaa hiilidioksidia. Suurena kiinnostuksen kohteena on hiilidioksidin hyötykäyttö kasvihuoneympäristössä. Tarve hiilidioksidin hyötykäytölle on olemassa jatkuvan ilmaston lämpenemisenkin näkökulmasta. Toisaalta siinä piilee myös suuri potentiaali, joka oikein hyödynnettynä parantaa mm. maanviljelijän omavaraisuutta ja pienentää parhaimmillaan myös kokonaiskustannuksia. Kiinnostus hiilidioksidin hyötykäyttöön on kasvanut yleisesti, josta on hyötyä asian eteenpäin viemisessä.

2 HIILIDIOKSIDI

2.1 Yleistä

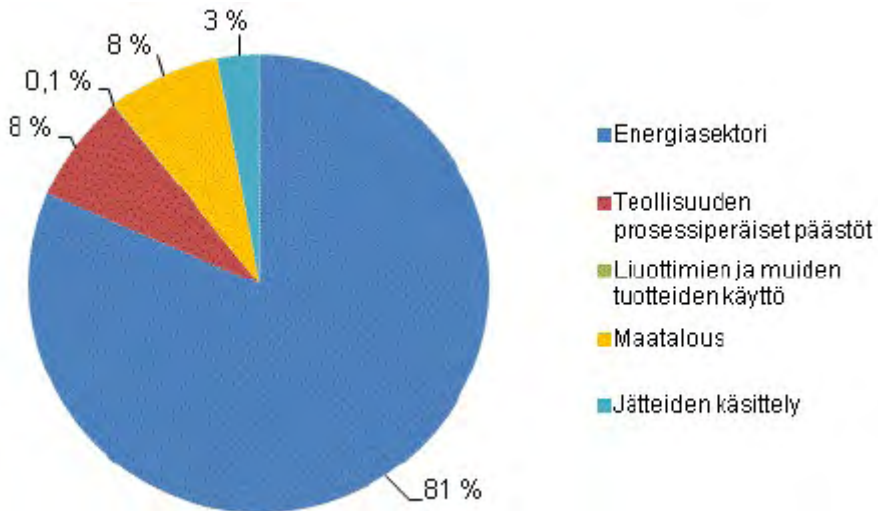
Tärkeää elämää ylläpitävää kaasua, hiilidioksidia, esiintyy luonnossa yhtenä ilman aineosana (n. 0,03 %) sekä liuenneena veteen. Ulkoisesti hiilidioksidi on ilmaa raskaampi väritön ja hajuton kaasu, jota syntyy luonnossa mm. elollisten organismien hajotessa. CO₂ ei pala eikä pidä yllä palotapahtumaa. Muita hiilidioksidin ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1. Hiilidioksidi on lisäksi lähes myrkytön kaasu. Hiilidioksidin ylin sallittu pitoisuus sisätiloissa on 5000 ppm ja vaaralliseksi rajaksi on asetettu 50 000 ppm. Hiilidioksidipitoisuuden nousu hengitysilmassa aiheuttaa mm. hengityksen kiihtymistä ja hapenpuutetta. Muilla kylmäaineilla sallittu raja on kuitenkin jo 1000 ppm ja ammoniakilla ainoastaan 50 ppm tasossa. (Aittomäki, 2005)

Taulukko 1. Hiilidioksidin ominaisuudet NTP-olosuhteissa (0 °C ja 1 bar). (Seppänen et al. 1992, Miilumäki, M., 2011, Laitinen ja Toivonen, 1982)

Molekyylikaava	CO ₂
Moolimassa	44,01 g/mol
Olomuoto	Väritön kaasu
Tiheys	1,977 g/l
Sulamispiste	- 78 °C
Kiehumispiste	- 57 °C
Viskositeetti	13,6 * 10 ⁻⁶ Ns/m ²
Lämmönjohtavuus	0,015 W/(mK)
Liukoisuus veteen	0,88 l/l

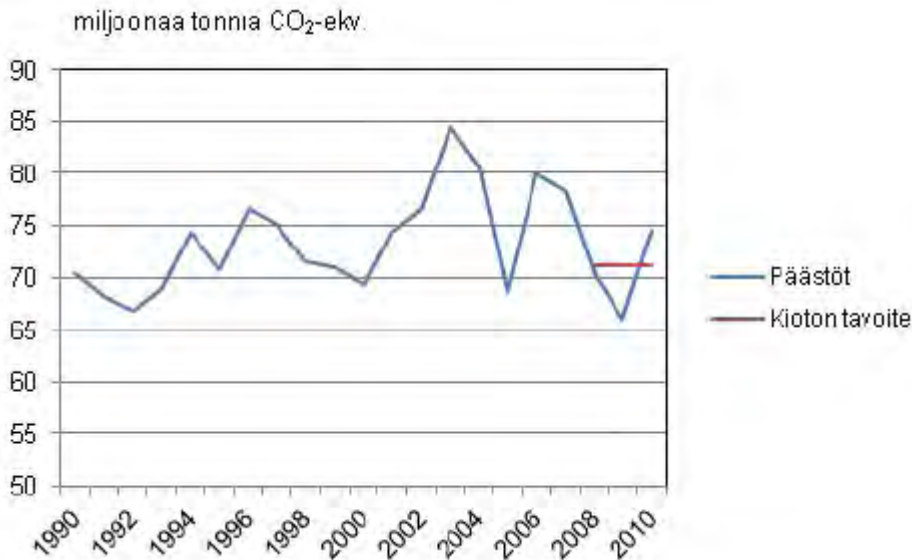
Ihmisen toimesta syntyy suuria määriä hiilidioksidia pääasiassa fossiilisia polttoaineita poltettaessa ja tämä on yksi suurimmista syistä, jonka vuoksi meidän tulee miettiä hiilidioksidin hyötykäyttökohteita. (AGA, 2010, Elinympäristömme kaasut, 2012). Suomen kasvihuonepäästöt olivat vuonna 2010 yhteensä 74,6 Mt CO₂-ekv ja näistä hiilidioksidipäästöjä oli 63,7 Mt, joka on 85,4 % kokonaismäärästä. Kuvassa 1 on esitetty sektoreittain Suomessa eri aloilla vuonna 2010 syntyneet kasvihuonepäästöt. (Tilastokeskus, 2011)

Vuonna 2007 hiilidioksidipäästöt olivat Suomessa yhteensä 61,8 Mt. Tuolloin Suomen väkiluku oli 5 300 484 (Tilastokeskus, Suomen väestö 2007). Näin ollen hiilidioksidipäästöt vuonna 2007 olivat 11,7 tonnia henkilöä kohden. Vastaavan luvun ollessa vuonna 2007 esimerkiksi Saksassa 9,2 tonnia henkilöä kohden tarkasteltuna, kun hiilidioksidipäästöt olivat 755,3 Mt ja väkiluku oli 82 266 372. Ruotsissa puolestaan hiilidioksidipäästöt olivat samana vuonna henkilöä kohden 5,1 tonnia (hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärä 46,4 Mt ja väkiluku 9 148 092). (European Commission, 2010 ja World Bank Search, 2012)



Kuva 1. Kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain Suomessa vuonna 2010 (Tilastokeskus 2011).

Kioton pöytäkirjan tavoitetaso ylitettiin noin 5 %:lla kasvihuonepäästöjen noustessa 8,5 miljoonalla hiilidioksiditonnulla edeltävästä vuodesta. Päästöt kasvoivat energiasektorilla 15 % ja teollisuuden prosessipäästöt nousivat 8 %, kun muilla sektoreilla kasvu oli vähäisempää. Kuvassa 2 nähdään kasvihuonekaasujen päästöt suhteessa Kioton pöytäkirjan tavoitetasoon vuosina 1990-2010. Vuonna 2003 päästöt olivat korkeimmillaan, mutta kaaviosta voidaan havaita päästöjen olleen kuitenkin laskusuunnassa. Muutosta kasvihuonekaasujen muodostumisen suhteen on tapahtunut runsaasti vuosittain, mutta sahapainainen diagrammi kuitenkin viettää alas päin ja päästöjen määrä vähenee hiljalleen. (Tilastokeskus, 2011)

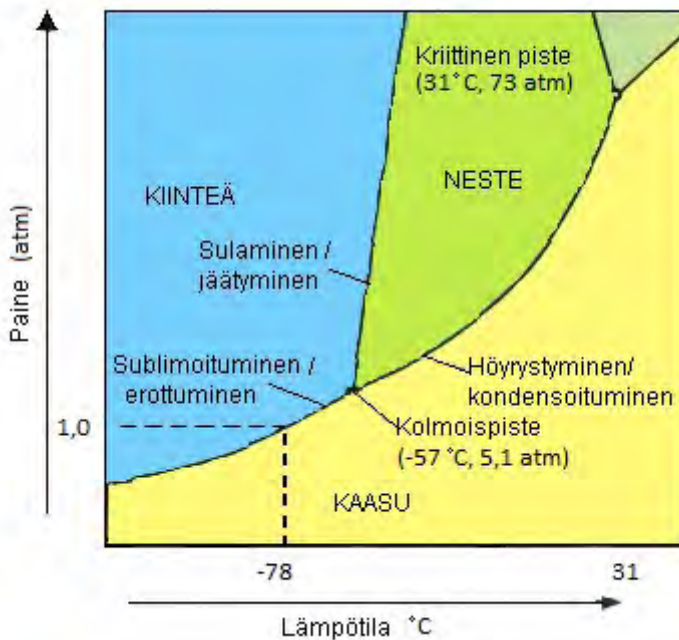


Kuva 2. Kasvihuonekaasujen päästöt suhteessa Kioton pöytäkirjan tavoitetasoon Suomessa vuosina 1990-2010. (Tilastokeskus, 2011)

2.2 Hiilidioksidin hyötykäyttö

Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen ja puhdistaa teollisuudessa esimerkiksi vedyn valmistuksen ja alkoholikäymisen yhteydessä syntyneistä kaasuista. Tällöin raakakaasusta erotetaan vesihöyry ja kaasu puristetaan sekä jäähdytetään. Muodostunut kaasu puhdistetaan vesipesurissa ja molekyylliseulan avulla erotetaan vielä jäljellä oleva vesi sekä haisevat aineet. Puhdistettu kaasu jäähdytetään, kunnes hiilidioksidi nesteytyy ja lopullinen kaasun puhdistus tehdään tislauksen avulla. (Elinympäristömme kaasut, 2012) Hiilidioksidin faasidiagrammista (kuva 3) voidaan tarkastella hiilidioksidin käyttäytymistä ja olomuotoja eri lämpötiloissa (Silberberg, 2000).

Faasidiagrammi esittää eri aineiden olomuodot lämpötilan ja paineen funktiona muodostaen kiinteä-neste-, neste-kaasu- ja kiinteä-kaasu-tasapainokäyrät. Kolmoispisteeksi kutsutaan pistettä, jossa kaikki kolme tasapainokäyrää ovat tasapainossa. Hiilidioksidin kolmoispiste saavutetaan lämpötilan ollessa $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja paineen $5,1\text{ atm}$. Kriittinen piste eli korkein mahdollinen lämpötila, jossa höyry voidaan nesteyttää painetta kasvattamalla on hiilidioksidille $31\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Laitinen ja Toivonen, 1982)



Kuva 3. Hiilidioksidin faasidiagrammi. (Silberberg, 2000, muokattu)

Hiilidioksidilla on lukemattomia hyötykäyttökohteita, joista osa jo tunnetaan, mutta paljon kohteita on vielä löytämättä ja tutkimatta. Tunnetuimpia hyötykäyttökohteita ovat elintarviketeollisuus ja veden käsittely. Elintarviketeollisuudessa hiilidioksidia käytetään suojakaasuna pakkaamisessa, virvoitusjuomissa, kasvihuoneissa, jäähdytysaineena sekä pakastamisessa. Hiilidioksidi onkin hyvin käyttökelpoinen jäähdytyssesteemeissä, sillä sen sublimoitumislämpötila (lämpötila, jossa aineen olomuoto muuttuu suoraan kiinteästä kaasuksi nesteytymättä välillä) 1 atm paineessa on $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lisäksi hiilidioksidi liukenee hyvin veteen. Esimerkiksi uimahalleissa veden pH säädetään hiilidioksidin avulla. Tämän lisäksi veden kovuus on mahdollista säätää hiilidioksidia käyttäen. Muita yleisiä hiilidioksidin käyttökohteita ovat palosammutusaine, kemikaalien sekä MIG/MAG-hitsauksen suojakaasu sekä metsäteollisuudessa massan pesun tehostaminen ja pH:n säätö. (AGA, 2010 ja Elinympäristömme kaasut, 2012)

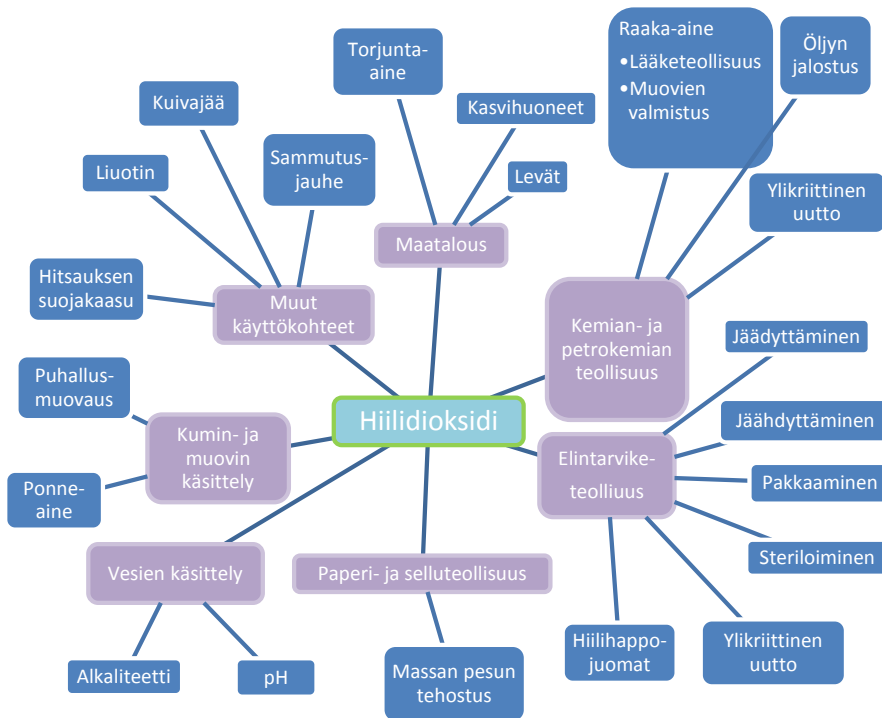
Miilumäki (2011) on tuonut hyvin esille erilaiset hiilidioksidin hyödynnettävät ominaisuudet. Nämä ovat nähtävillä taulukossa 2.

Taulukko 2. Hiilidioksidin hyödynnettävät ominaisuudet. (Turunen H., 2011 ref. Miilumäki, N., 2011 mukailten, Suomen akatemia, 2008^a)

Hiilidioksidin tarkoitus	Kohde	Hiilidioksidin hyödynnettävä ominaisuus
Raaka-aine	Urean synteesi Salisyylihapon synteesi Metanolin synteesi Hapetusprosessit Muovin valmistus ^a	Sisältää hiiltä Sisältää hiiltä ja happea Kuljettaa happea ja laimeaa hapetinta
Raaka-aine ja liuotin	Polykarbonaatin synteesi polyetyleni ja polypropyleeni karbonaateiksi	Sisältää hiiltä, alhaisen kriittisen pisteen ja ylikriittisen CO ₂ fluidin tiheys riippuu T:stä ja p:stä.
Liuotin ylikriittisessä tai nestemäisessä tilassa	Uuttoprosessit, kahvi, tee, humala, muut samantapaiset sovellukset elintarviketeollisuudessa	Alhainen kriittinen piste, ylikriittisen CO ₂ fluidin tiheys riippuu T:stä ja p:stä, hyvä aineensiirto ja läpäisy huokosiin (suuri tiheys, alhainen viskositeetti ja diffuusiokyky), alhainen haihtumislämpötila ja alhainen myrkyllisyys.
	Spray -päälystys ja partikkelien muodostuminen	Alhainen kriittinen T, ylikriittisen CO ₂ fluidin tiheys riippuu T:stä ja p:stä, alhainen haihtumislämpötila, suuri laajentuminen, inertti, ei VOC-päästöjä
Puhdistusaine	Kuivapesu, superkriittisen tilan alapuolella	Alhainen kriittinen piste, hyvä aineensiirto ja läpäisy huokosiin (suuri tiheys, alhainen viskositeetti ja diffuusiokyky), alhainen haihtumislämpötila ja alhainen myrkyllisyys
	Kuivajääpuhallus jäädytyllä hiilidioksidilla	Jään alhainen lämpötila, suuri laajentuminen sublimoitumisen aikana ja sublimoituminen ilma-kehän olosuhteissa.

Hiilidioksidin tarkoitus	Kohde	Hiilidioksidin hyödynnettävä ominaisuus
Suojakaasu	Ruoan pakkaus	Inertti erityisesti hapettumiselle (säilyttää maun), ei bakteerien kasvua, ei jätä kosteutta.
	Hitsaus Palosammuttimet (kiinteät ja kannettavat)	Inertti, erityisesti hapettumiselle, ei johda sähköä, ei jätä kosteutta, edullinen materiaali, ei vahingoita otsonikerrosta.
Jäähdytysaine	Jäähdytysjärjestelmät	Kaasu-neste-tasapaino-ominaisuudet, suuri tiheys ja alhainen viskositeetti ylikriittisessä tilassa, alhainen myrkyllisyys, inertti (palamaton), alhaiset materiaalikustannukset, ei vahingoita otsonikerrosta ja alhainen kasvihuoneilmiö.
	Suora jäähdytys kuivajäällä	Tehokas lämmönsiirto johtuen sublimoitumisesta ilmakehän olosuhteissa, ei jätä kosteutta
Lisäaine tuotteeseen	Panimo- ja virvoitusjuomateollisuus	Liukenee helposti, kaasun poisto
pH:n säätökemikaali	Sellu- ja paperiteollisuus ja vesienkäsittely (korvaa sulfurin) Neutralisointi (uima-altaat, vesien käsittely)	Hapan vesiseoksessa, ei ympäristölle haitallinen. Hapan vesiseoksessa, haitaton ympäristölle ja entsyymeille.
Täytekaasu	Öljynjalostusteollisuus (EOR)	Hyvä saatavuus, alhaiset materiaalikustannukset, inertti
Lannoitus	Kasvihuoneet	

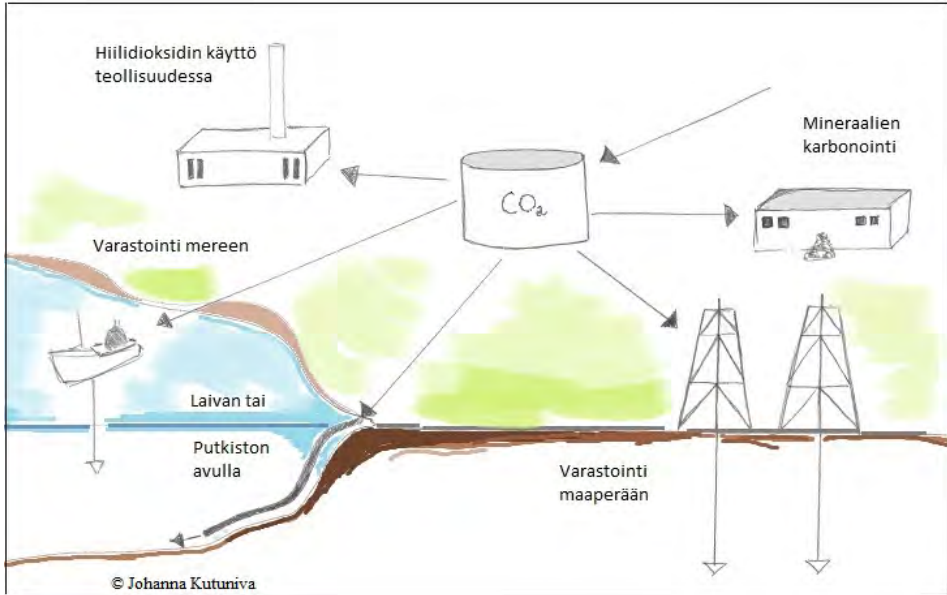
Hiilidioksidin ominaisuudet antavat mahdollisuuksia useille eri käyttökohteille. Kuvassa 4 on esitetty selvitystyön aikana esille tulleita hiilidioksidin käyttökohteita. Käyttökohteita voi olla vielä muitakin ja niitä kehitetään koko ajan lisää. Tässä selvityksessä keskitytään hiilidioksidin käyttöön kasvihuoneissa.



Kuva 4. Erilaisia hiilidioksidin käyttökohteita.

2.3 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

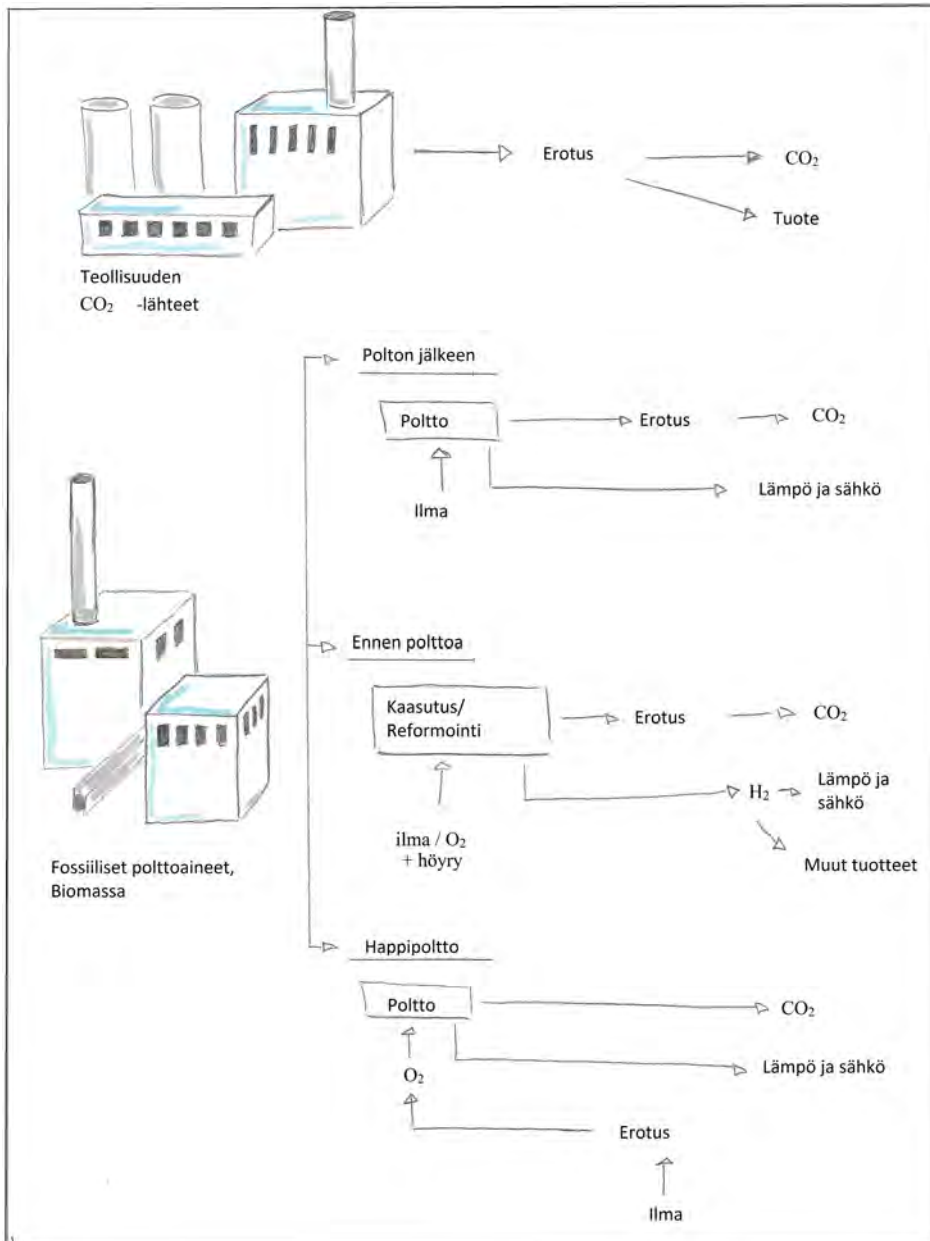
Hiilidioksidilla on paljon erilaisia hyötykäyttökohteita ja sen mahdollisuudet ovat laajat. Riippuen teollisuuden alasta hiilidioksidin talteenottotavat voivat olla hyvin erilaiset. Samoin hiilidioksidia vapauttavan teollisuuden sijainnista riippuen sen jatkokäyttö tai varastointitavat vaihtelevat. Seuravassa tarkastellaan muutamia talteenotto- ja varastointimahdollisuuksia.



Kuva 5. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi.

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi eli CCS (Carbon Capture and Storage) on prosessi jossa hiileen tai johonkin muuhun fossiiliseen polttoaineeseen perustuvassa energian tuotannossa syntyvä hiilidioksidi erotetaan, nesteytetään tai kiteytetään, kuljetetaan varastoitavaksi ja eristetään ilmakehästä pysyvästi. Hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitapahtumaa on havainnollistettu kuvassa 5. Mahdollisuuksien mukaan hiilidioksidia hyödynnetään erilaisissa teollisissa prosesseissa. (Fortum, 2011)

Hiilidioksidin talteenottomenetelmät teollisuudessa ja energiantuotannossa on esitetty kuvassa 6. Polton jälkeinen talteenotto ja kaasutustekniikka ovat talteenottomenetelmistä kehittyneet jo pitkälle. (Miilumäki, 2011).



Kuva 6. Erilaiset hiilidioksidin talteenottomenetelmät (Miilumäki, 2011, IPCC 2005 mukaan)

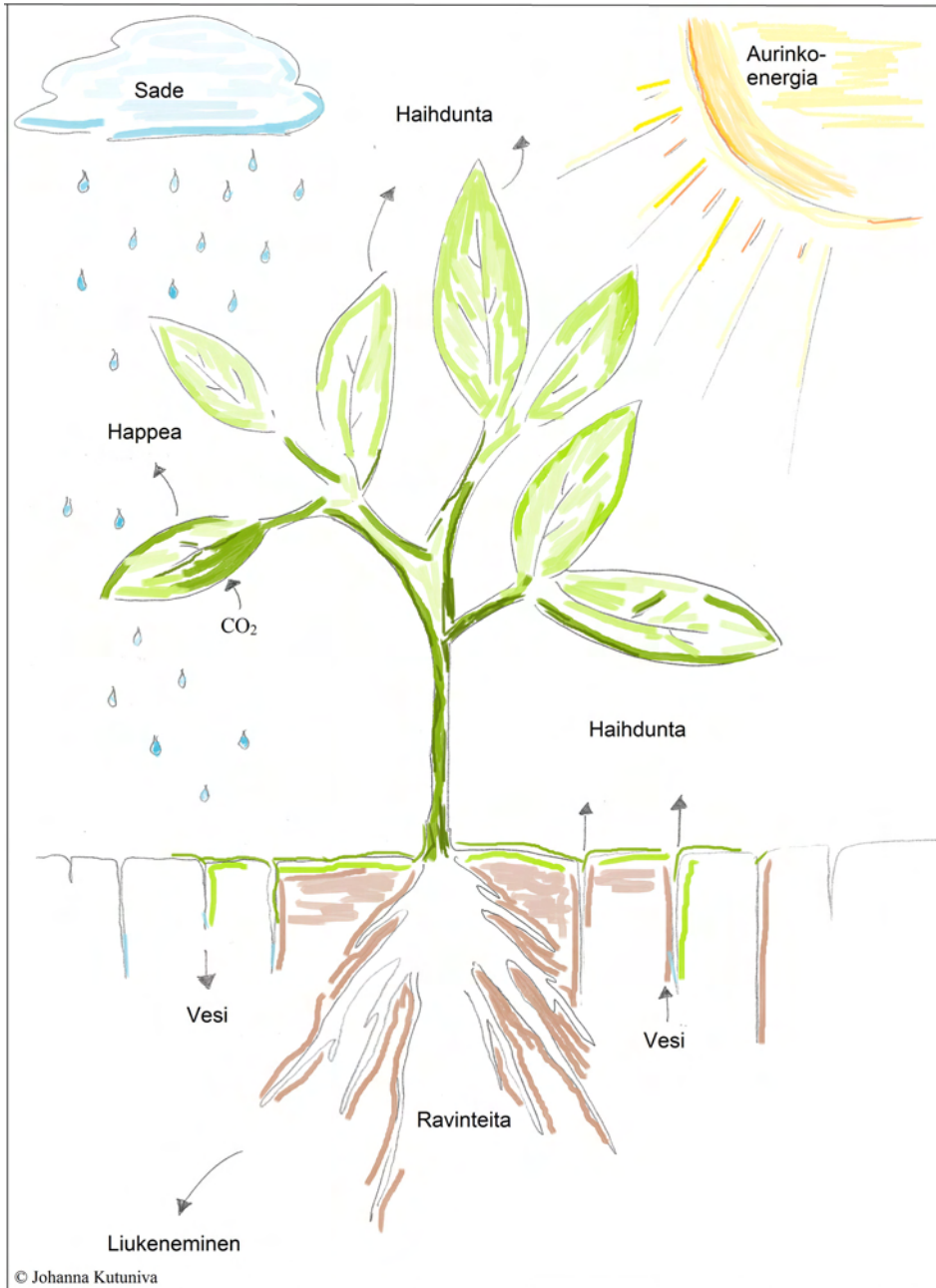
3 KASVIHUONEET JA HIILIDIOKSIDI

Suomessa lämmitettävät kasvihuoneet jaetaan yleisesti tilastoissa alle 7 kk ja vähintään 7 kk viljelykauden mukaisesti. Lisäksi jaottelu suoritetaan käytetyn katemateriaalin mukaisesti eli sen mukaan onko katemateriaalina käytetty lasi-, muovi- vai kerroslevykatetta. Tällä hetkellä vähintään 7 kk lämmitettävien kasvihuoneiden määrä on suurempi kaikista kasvihuoneista (3804 kpl / 6536 kpl). Molemmissa yleisimmin käytetty katemateriaali on muovi. Lasikate on kuitenkin nostanut nopeasti suosiotaan. (Westerlund, 2011)

Aikaisemmin esille tulleiden syntyvien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi yksi alentamiskeino onkin energiatuotannon hiilidioksidipäästöjen käyttö kasvilannoituksessa kasvihuoneissa. Onkin todettu, että biokaasujen hyödyntäminen kasvihuoneissa on erittäin varteenotettava vaihtoehto. Biokaasun tulee kuitenkin olla saatavilla alle viiden kilometrin säteellä käyttökohteesta ollakseen kannattavaa. (Motiva, 2012)

3.1 Fotosynteesin perusteet

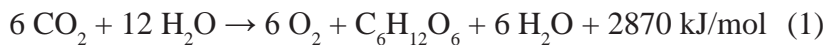
Kasvien kasvaminen kasvihuoneissa on monivaiheinen prosessi. Mikäli kasvi saa kaiken tarpeellisen kasvaakseen sato on hyvä, mutta mikäli yksikin osatekijä puuttuu kasvit fotosyntetisoivat rajoitetusti ja jättävät sadon pieneksi. Fotosynteesiin vaikuttavat niin valo kuin lämpötilakin. Lisäksi on pidettävä huolta veden, hiilidioksidin sekä ravinteiden saannista. (Lawlor, 2001 ref. Pohjola, A., 2009)



Kuva 7. Fotosynteesi l. yhteyttäminen.

Yhteyttäminen ja hengittäminen ovat kasvin elinedellytykset. Fotosynteesiä eli yhteyttämisprosessia on kuvailtu kuvassa 7. Kasvi varastoi valoenergiaa ja muuttaa sen avulla veden ja vihreiden osiensa ilmarakojen kautta imemänsä hiilidioksidin hiilihydraateiksi ja hapeksi. Hapen kasvi luovuttaa ilmakehään ja varastoi sokerin tärkkelyksenä, öljynä, rasvoina ja/tai proteiininä. Kasvin lehtien ilmaraot sulkeutuvat lämpötilan ollessa liian korkea tai veden määrän ollessa liian vähäinen. Fotosynteesin toiminnan kannalta on kuitenkin oleellisen tärkeää, että ilmaraot ovat avoimia. (Jokelainen A., 2011)

Oksygeeniselle fotosynteesille voidaan esittää hapetus-pelkistysreaktio (kaava 1), jossa hiilidioksidista ja vedestä muodostetaan hiilihydraatteja absorboitaessa valoenergiaa (Ihalainen, 2002 ja Withmarsh ja Govindjee, 1995 ref. Pohjola, A., 2009).



Fotosynteesissä on mahdollista absorboida valoa 350–1050 nm aallonpituusalueella (Hynninen ja Leppäkases, 2004 ref. Pohjola, A., 2009). Tämä on hieman ihmisen havaitsemaa valon aallonpituusaluetta (noin 400 – 800 nm) suurempi.

Kasvin molekyylin absorboidessa valoa elektroni virittyy ja siirtyy korkeampienergiselle molekyyliorbitaalille. Valoenergian absorboituminen nostaa näin aineen molekyylien energiapitoisuutta (Nyman ja Hynninen, 2004 ref. Pohjola, A., 2009). Viritysendergia siirtyy ja purkautuu hyvin nopeasti. Näiden mekanismien tarkastelu jätetään kuitenkin tämän selvityksen ulkopuolelle.

Kasveilla riittävän hiilidioksidin saatavuus on jo hiilihydraattien valmistuksen kannalta välttämätöntä. Lisäksi hiilidioksidia tarvitaan fotosynteesin hiilen pelkistysykyklissä eli PCR –syklissä (photosynthetic carbon reduction cycle), jossa hiilidioksidi liittyy Rubiscon (ribuloosi-1,5-bifosfaattikarboksyylaasi-oksygenaasin) katalysoimana RuBP:n (ribuloosi-1,5-bifosfaattiin). (Gutteridge ja Jordan, 2001 ref. Pohjola, A., 2009)

Hiilidioksidi diffundoituu ilmasta sytoplasmaan lehden ilmarakojen kautta. Täältä hiilidioksidi kuljetetaan kloroplastiin kaasuna tai sytoplasmaan liuenneena bikarbonaattina eli vetykarbonaattina. Liukenemisprosessi tapahtuu kaavan 2 mukaisesti.

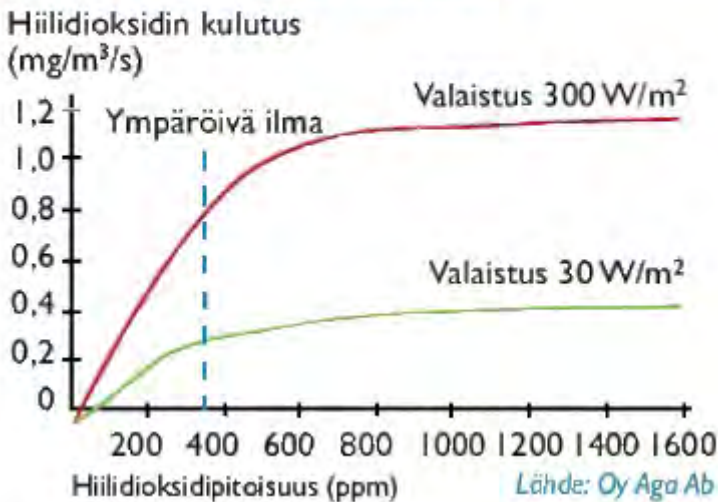


Ennen PCR-sykliin osallistumista hiilidioksidi ja bikarbonaatti kuljetetaan memraanin läpi (Lüttge, 2007 ref. Pohjola, A., 2009).

3.2 Hiilidioksidin vaikutus kasvuun

Hiilidioksidin käyttöä on kokeiltu useissa kasvihuoneissa onnistuneesti ja odotetustikin, sillä hiilidioksidin tiedetään tehostavan yhteyttämistä. Yleisimmin käytetty vaihtoehto on ollut puhdas tekninen hiilidioksidi. Tämän lisäksi kasvihuoneviljelyä varten on tuotettu hiilidioksidia polttamalla nestekaasusta, kevyestä polttoöljystä tai maakaasusta. Kasvien kasvun on havaittu lisääntyvän jopa noin 40 % hiilidioksidilannoituksen myötä (Motiva, 2012), mikä on todella merkittävä saavutus etenkin pohjoisilla alueilla. Tomaatin, kurkun ja salaatin satoa on puolestaan saatu kasvatettua 25-30 % hiilidioksidilannoituksen avulla. Tämän lisäksi esimerkiksi salaattisato valmistuu kaksi viikkoa aikaisemmin kuin ilman hiilidioksidilannoitusta kasvatettu salaatti. (Jaakkonen & Vuollet, 1997 ja Partanen, 1994 ref. Myyrä-Mustonen, 2011) Enää lyhyt kesäkausi ei rajoita tuotantoa yhteen satoon. Toisaalta pitkinä ja usein hyvin kylminäkin talvikausina kasvihuoneiden lämmityskustannukset nostavat kuitenkin tuotteiden hintatasoa, mutta hiilidioksidilannoituksen myötä kasvihuoneissa on mahdollista saada kolmekin satoa vuoden aikana. Kuvassa 8 on esitetty hiilidioksidipitoisuuden kasvattamisen vaikutusta tomaatin lehden fotosynteesiin valaistustehon pysyessä vakiona. (Motiva, 2012)

Kasvihuoneilman hiilidioksidipitoisuuden vaikutus tomaatin kasvuun.

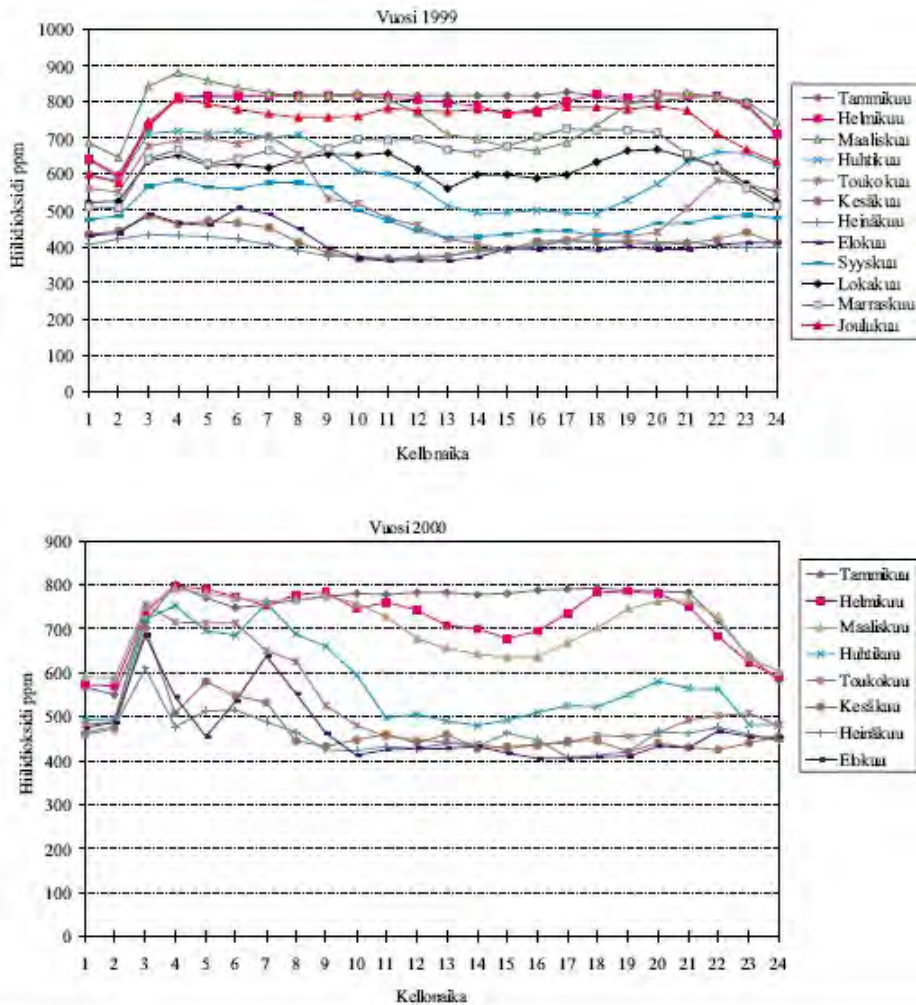


Kuva 8. Hiilidioksidipitoisuuden vaikutus tomaatin kasvuun. (Motiva, 2012, muokattu)

Hengittämämme ilma sisältää 21 % happea ja hiilidioksidia noin 0,039 %. Tämä pitoisuus (392,40 ppm) on mitattu 3/2011 Mauno Loan observatoriossa Havajilla. Ilman happipitoisuus on riittävä kasvien tarpeisiin, mutta alhainen hiilidioksidipitoisuus muodostuu kasvua rajoittavaksi tekijäksi. (Jokelainen, A., 2011)

Edellisen mukaisesti ulkoilmassa hiilidioksidipitoisuus on normaalisti noin 390 ppm. Huonosti ilmastoidussa ja tuulettamattomassa kasvatustilassa hiilidioksidipitoisuus voi laskea nopeasti muutamassa tunnissa aurinkoisen päivän aikana. Tällöin hiilidioksidipitoisuus voi päätyä alle 200 ppm:n, jolloin kasvien kasvu hidastuu jo selkeästi. (Jokelainen, A., 2011) Kasvihuoneolosuhteissa hiilidioksidipitoisuus nostetaan 600 – 1000 ppm tasolle, jotta kasvit yhteyttäisivät mahdollisimman tehokkaasti niukkasakin valossa. (Näkkilä, J., 2006) Yleisesti käytetty pitoisuus on noin 800 ppm (Westerlund, 2011) eli kaksinkertainen verrattuna ulkoilman hiilidioksidipitoisuuteen.

Leikkoruusun viljelyn tehostamista on puolestaan tutkittu MTT:n toimesta vuosien 1998-2000 aikana ja käytännön sovellutus on toteutettu Leipolan puutarhassa. Kasvupenkien alle hiilidioksidi syötettiin 800 ppm:n pitoisuutena puhtaana kaasuna. Mitatut hiilidioksidipitoisuudet on esitetty kuvassa 9. Kuvasta voidaan havaita hiilidioksidipitoisuuksien pysyneen korkeimmillaan keskitalvella. Keskipäivällä puolestaan hiilidioksidipitoisuus on alimmillaan. Tämä varmasti selittyy osittain ilmaluukkujen aukaisulla. Hiilidioksidia ei syötetty enää ilmaluukkujen ollessa 40 % avoinna. Tämä on perusteltua hiilidioksidin karatessa tuolloin kasvihuoneen ulkopuolelle. Hiilidioksidia ei myöskään annettu valotustauoilla. Hiilidioksidin lisäksi leikkoruusuille annettiin tekovaloa ympäri vuoden kokonaissäteilyn laskiessa alle 200 W/m². Valotusaika oli klo 02-22 välillä 20 tuntia ja valoteho lähes kaikille lajikkeille 220 μmol/m². Leikkoruusuille annettiin näiden ohella myös muita lannoitteita. (Särkkä et al., 2001) Toisaalta kasvien hengitys on vilkkainta pimeässä. Hiilidioksidia varastoituu yön aikana kasvihuoneeseen ja sitä on kasvihuoneessa kasvien käytettävissä eniten aamulla ja tuolloin kasvu onkin nopeinta. Eli mitä lyhyempi valoisa aika on, sitä enemmän kasveilla on hiilidioksidia käytössään. Päivällä kasvihuoneen hiilidioksidipitoisuus laskee kasvien yhteyttämisen seurauksena. (Partanen, 1994 ref. Myyrä-Mustonen, 2011)

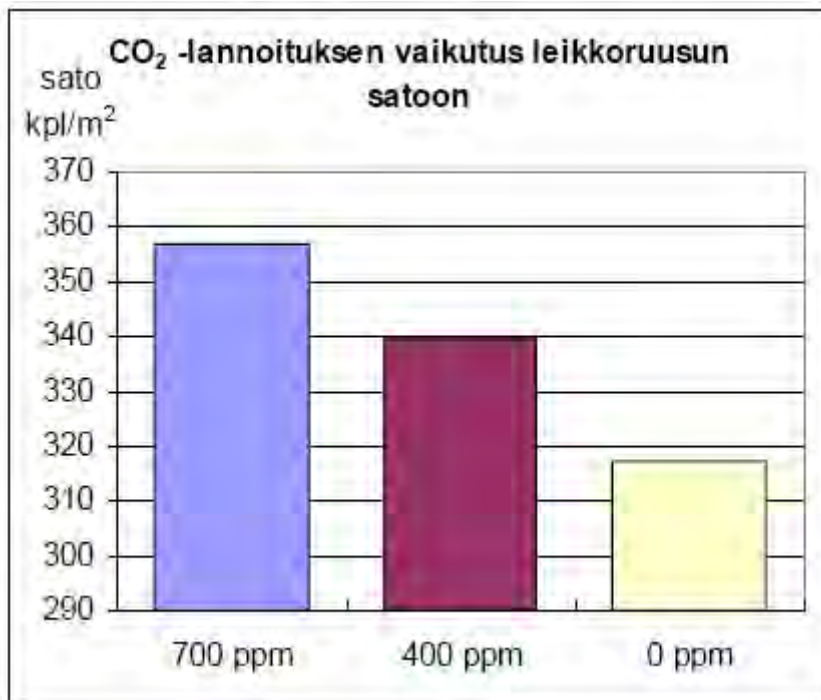


Kuva 9. Mitatut hiilidioksidipitoisuudet Leipolan puutarhassa. (Särkkä et al, 2001)

Viljelymenetelmää ja viljelyolosuhteita tehostamalla sadon määrä saatiin Leipolan puutarhassa moninkertaistettua ja satokiertoa nopeutettua. Hiilidioksidin kulutuksen arvioitiin olevan ruusuille $14 \text{ kg/m}^2/\text{v}$. (Särkkä et al., 2001) Piikkiössä puolestaan tutkittaessa talvitomaatin viljelyä, hiilidioksidin kulutus 12 h valotusajalla on ollut 11 kg/m^2 . Pidemmällä 12 – 16 h valotusajalla hiilidioksidin kulutukseksi on arvioitu 21 kg/m^2 . (Westerlund, K., 2011, Österman, P., 2002) Yleisesti kasvuston on ajateltu käyttävän hiilidioksidia $0 - 2 \text{ kg/h} / 1000 \text{ m}^2$. Kulutus voi kuitenkin hävikin takia olla jopa $1 - 4 \text{ kg/h}$. Hiilidioksidin tarve vaihtelee lisäksi huomattavasti mm. kasvilajista ja lajikkeesta, kasvin kasvuvaiheesta, vuodenajasta, valoisuudesta, lämpötilasta, vuorokaudenajasta, kasvihuoneen tiiveydestä

sekä kasvualustan laadusta. (Jaakkonen ja Vuollet, 1997 ref. Myyrä-Mustonen, 2011)

MTT:n puutarhatuotannon yksikössä on tutkittu esimerkkimaatilalla (viljelypinta-ala 5000 m²) eri pitoisuuksilla annetun hiilidioksidilannoituksen vaikutusta leikkoruusun sadon määrään ja laatuun. Kokeessa tilamalleja on kolme 700 ppm, 400 ppm ja 0 ppm pitoisuuksilla. Todelliset hiilidioksidipitoisuudet olivat 680 ppm, 400 ppm ja 350 ppm. Kokeissa havaittiin selvästi hiilidioksidilannoituksen merkittävä vaikutus leikkoruusun satoon (kuva 10). (Outa ja Särkkä, 2004)

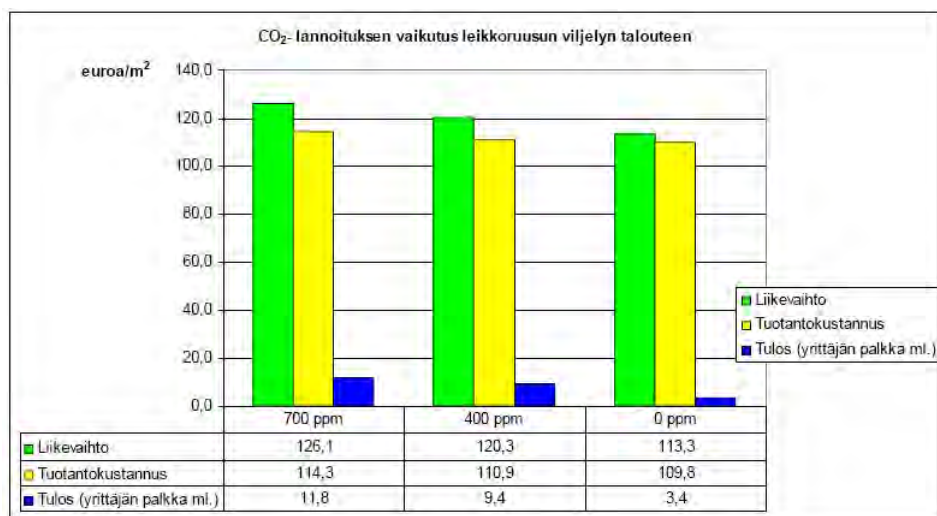


Kuva 10. Hiilidioksidilannoituksen vaikutus ruusun satoon. Kuvassa on tilamallien hiilidioksidipitoisuudet. Mitatut pitoisuudet ovat 680, 500 ja 350 ppm. (Outa ja Särkkä, 2004)

Leikkoruusujen sato oli suurin hiilidioksidilannoituksen ollessa 700 ppm. Tällöin myös tuotantokustannukset olivat suurimmat, johtuen sadon määrän kasvusta ja sen aiheuttamista työ- ja materiaalikuluista. Kuitenkin myös viljelyn tuotto oli suurin tässä ryhmässä. Selvästi kuitenkin hiilidioksidin käyttö jo pienilläkin pitoisuuksilla lisää leikkoruusun satoa ja parantaa viljelyn kannattavuutta. Lajikkeiden välillä on kuitenkin jonkin verran eroja. Lisäksi tilamallitarkastelu ei vastaa täysin todellisia kasva-

tusolosuhteita ja sen avulla ei esimerkiksi voida huomioida tuotannollisia tai markkinoihin liittyviä riskejä. (Outa ja Särkkä, 2004)

Mortenson ja Moe ovat selvittäneet jo aiemmin, että valon intensiteetin noustessa korkeampi hiilidioksidipitoisuus nostaa lehden fotosynteesiä alhaista pitoisuutta enemmän. (Särkkä et al., 2001) Tutkimuksessa on todettu, että valotuksen tehostamisesta ja hiilidioksidilannoituksesta aiheutuvat lisäkustannukset ovat melko vähäiset suhteessa saavutettuun tuotokseen ja sitä kautta saavutettuun tuottoon tarkasteltaessa Leipolan tilan tilannetta. Selvä johtopäätös on se, että hiilidioksidilannoituksesta ei tule tinkiä valoitettaessa kasveja runsaasti. (Särkkä et al., 2001)



Kuva 11. Hiilidioksidilannoituksen talousvaikutukset. Tulokset osoittavat lannoituksen olevan selvästi kannattavaa. (Outa ja Särkkä, 2004)

Hiilidioksidilannoitus lisää jo pienemmilläkin pitoisuuksilla leikkoruusun satoa ja viljelyn kannattavuutta, joita on tarkasteltu kuvassa 11 (Outa ja Särkkä, 2004). Myös koivun astiataimikasvatuksessa etenkin Betula-suvun lajien on todettu olevan erittäin vastaanottavaisia kontrolloidulle kasvatukselle, jossa lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidin määrä, valon intensiteetti ja päivän pituus voidaan säätää halutuksi. Rauduskoivu on saatu myös olosuhteita muokkaamalla kasvamaan metrin mittaiseksi kymmenen viikon kuluessa kylvöstä. (McDonald, 2006 ref. Lehisto ja Tolonen, 2011) Hiilidioksidin käytöstä Suomen kasvihuoneissa ei ole pidetty kirjjanpitoa, eikä tietoja ole näin ollen tilastoitukaan (Kauppapuutarhaliitto, 2012). Mielenkiintoista olisi kuitenkin selvittää kuinka yleistä hiilidioksidilannoitus on ja minkälaiset ovat kasvattajien kokemukset lannoituksesta sekä sen tehokkuudesta eri kasvihuoneissa.

Kasvihuoneissa käytettävä hiilidioksidi voidaan ottaa talteen bio-kaasusta joko ennen polttoa tai metaanin polttoprosessin savukaasusta. Hiilidioksidin erottaminen metaanista on tehokkaampaa ennen polttoa verrattuna hiilidioksidin keräämiseen polttoprosessin savukaasusta. Savukaasun käyttöä pidetään kuitenkin riittävänä ratkaisuna kasvihuoneilmakäyttöön. Savukaasua voi kuitenkin mahdollisesti joutua puhdistamaan esim. vesipesulla rikkidioksidin poistamiseksi. Haitallisten kaasujen korkeimpia sallittuja pitoisuuksia on esitetty taulukossa 3. (Rasi ja Rintala, 2007 ref. Erjava, A., 2009)

Taulukko 3. Korkeimmat sallitut pitoisuudet haitallisille kaasuille. (Rasi ja Rintala, 2007 ref. Erjava, A., 2009)

Kaasu	Ihminen (ppm)	Kasvit (ppm)	Kasvit, pitkä altistus (ppm)
Hiilidioksidi, CO ₂	5000	4550	1600
Hiilimonoksidi, CO	47	100	
Rikkidioksidi, SO ₂	3,5	0,1	0,015
Rikkivety, H ₂ S	10,5	0,001	
Eteeni, C ₂ H ₄	5	0,01	0,002
Typpimonoksidi, NO	5	0,01-0,5	0,25
Typpidioksidi, NO ₂	5	0,2-2	0,1

Hiilidioksidilannoituksen ja muiden olosuhteiden ohella kasvihuoneissa on todettu tarpeelliseksi tarkastella myös valo-oloja. Tekovalon tehokkaalla käytöllä auringon valon lisänä kasvien kasvun on havaittu lisääntyvän jopa noin 2-3 kertaiseksi ympärivuotisessa kasvatuksessa verrattuna kahdeksan tuotantokuukautta kestävään luonnonvaloon perustuvassa kasvatuksessa. (Näkkilä, J. et al., 2006) Yhteyttämiselle hyödyllinen valon aallonpituusalue on 400 – 700 nm eli PAR –valo (Photosynthetically Active Radiation) (Jokelainen, A., 2011). Suomessa yleisesti käytetty keinovalaistusteho vaihtelee 180 – 230 W/m² välillä (Motiva, 2012).

3.3 Lämpötilan vaikutus kasvuun

Lämpötilan tarkastelua ei tässä yhteydessä voi myöskään täysin jättää käsittelemättä, sillä se vaikuttaa fotosynteesin tehokkuuteen. Lämpötilan noustessa veteen liukenee enemmän happea ja hiilidioksidia, jonka seuraksena RuBP:n liittyvän substraatin määrä lisääntyy. Kuitenkin lämpötilan noustessa liian korkealle tämä häiriintyy ja vähenee muiden synteesi-

en vähenemisen vaikutuksesta. (Gutteridge ja Jordan, 2001 ja Lawlor, 2001 ref. Pohjola, A., 2009) Kasvihuonekasvit vaativat yleistäen noin 20 – 24 asteen lämpötilaa, kurkku ja tomaatti esimerkiksi vaativat hieman paprikaa korkeampaa lämpötilaa. Lämpötilan sietoraja useilla kasveilla on kuitenkin jo 30 °C:ssa. Sietoraja on riippuvainen myös kasvien muista olosuhteista. (Westerlund, 2011)

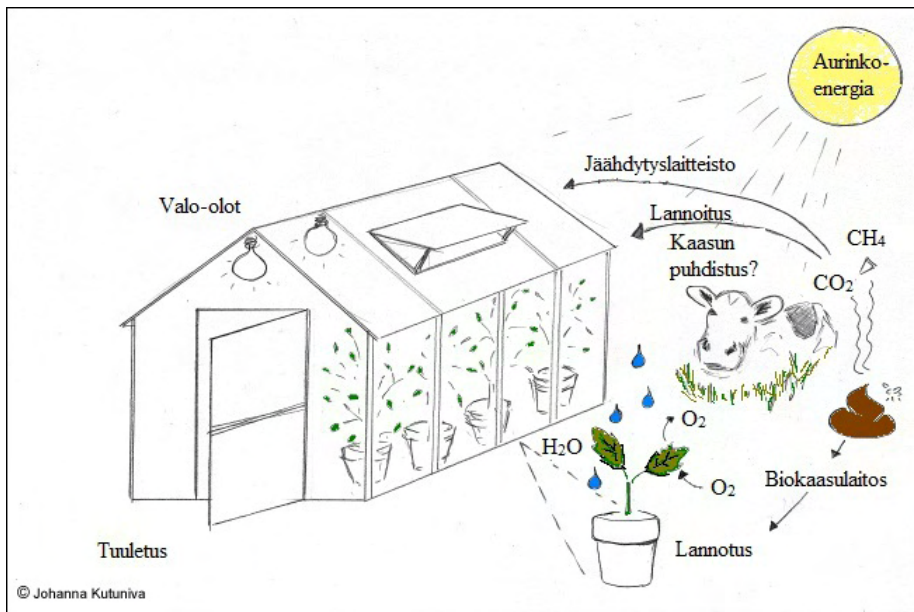
Suomen kesä luo kasvihuoneille omat haasteensa. Kesälämpötilat nousevat ajoittain hetkellisesti hyvin korkeiksi ja kasvihuoneet vaativat viilennystä, joka yleensä huolehditaan ilmaluukkujen aukaisulla ja tuuletuksella. Tämä katkaisee hiilidioksidilannoituksen ja usein kasvien kasvu on jopa vähäisempää kesäaikana kuin talviaikana hiilidioksidilannoituksen, ilmankosteuden ja valaistuksen optimoinnin ansiosta. (Näkkilä, J. et al, 2006, Westerlund, 2011) Kasvihuoneissa ratkaistavaksi tulisivin jäähdytysongelma. Olisiko tämä mahdollista toteuttaa alueella runsaasti muodostuvaa hiilidioksidia hyväksi käyttäen? Hiilidioksidia on tietävästi käytetty kylmälaitoksissa, mutta onko se sovellettavissa tähän tarkoitukseen? Tietävää on, että kylmälaitoksissa soveltuu käytettäväksi myös talteenotettu hiilidioksidi. (Aittomäki, 2005 ref. Korhonen, 2009) Hiilidioksidia on käytetty mm. laivojen jäähdytyskoneistoissa ennen nyt vaarallisiksi todettujen halogeenihiilivetypohjaisten (freonien) jäähdytysaineiden käyttöönottoa. Ensimmäisen jäähdytyskoneiston laivaan (höyrytin, lauhdutin, kompressori-kokonaisuus) rakensi Hall Englannissa jo vuonna 1890. Hiilidioksidin käyttö laivoissa olikin yleistä aina 60-luvulle saakka. Tuolloin syynä hiilidioksidin syrjäytymiselle oli kompressoreiden ja putkituksen raskaus sekä tuolloisten prosessien suuri energian kulutus ja huono hyötysuhde. Useimmat hiilidioksidin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet ovat suotuisia kylmälaitoskäyttöön. Materiaalin valinta ei ole siinä mielen ongelma tämän inertin kaasun käytössä, ainoastaan muovien ja kumiin soveltuvuus on tarkastettava. Lisäksi käytettäessä alhaisia lämpötiloja tai korkeita paineita mahdollisesti käytettävän teräksen laadun lujuus tulee varmistaa. (Aittomäki, A., 2005)

Hiilidioksin ominaisuuksista johtuen se soveltuu hyvin kylmätekniikoihin, joissa sitä on käytettykin ennen CFC-kylmäaineiden suosion kasvamista. Nyt näistä ollaan kuitenkin luopumassa niiden haitallisuuden vuoksi. Hiilidioksidi ei syövytä kuparia tai terästä, mutta vaadittavat paineet ovat hiilidioksidilaitoksissa korkeammat kuin perinteisillä kylmäaineilla ja tällöin putkistoilta vaaditaan enemmän paineenkestominaisuuksia. (Aittomäki, A., 2004 ja 2005 ref. Westerlund, 2011) Uudesakaupungissa tutkimuksen kohteena on toiminut Vahterus Ringin hiihtoputki, joka on maan päälle elementeistä rakennettu 5 x 1000 m kokoinen putki ja korkeuseroa putkella on 7 metriä. Hiilidioksidi toimii putkessa

lämmönsiirron väliaineena niin latuputkissa kuin ilman jäähdytysverkotossakin. (Sipilä et. al 2009)

3.4 Biokaasu, hiilidioksidi ja kasvihuoneet

Biokaasun hyödyntäminen kasvihuoneissa on osoittautunut kannattavaksi useissa kohteissa. Suomessa kokeiluja on ollut kuitenkin vielä vähän, mutta esimerkiksi Saksassa useiden kasvihuoneiden yhteydessä toimii biokaasulaitos. Biokaasulaitoksen on todettu soveltuvan hyvin kasvihuone-etuotantoon laitoksesta saatavien energian, lämmön, hiilidioksidin sekä ravinteiden vuoksi. (Erjava, A., 2009) Nämä kaikki on hyödynnettävissä kasvihuoneessa. Alueellamme on biokaasulaitoksia ja kannattavuutta voisi miettiä myös päinvastaisesti. Kasvihuone-toiminta biokaasulaitoksen yhteydessä ratkaisisi osittain myös ongelman hiilidioksidipäästöjen ratkaisemiseksi. Kokonaisuutta on havainnollistettu kuvassa 12.



Kuva 12. Maatilan yhteydessä toimiva kasvihuone voisi saada lannasta ja muodostuvasta hiilidioksidista lannoitetta kasveille.

4 Johtopäätökset

Hiilidioksidin hyötykäyttö eri kohteissa on osoittautunut toteuttamiskelpoiseksi ja kannattavaksi ratkaisuksi. Ainoastaan hiilidioksidia hyödyn-tävän kohteen tulee sijaita riittävän lähellä hiilidioksidia sivutuotteenaan tuottamaa laitosta, jotta sen käyttö on kannattavaa valittaessa teknisen ja sivutuotteena syntyneen hiilidioksidin välillä.

Kasvihuoneissa hiilidioksidilannoituksella saadut hyödyt ovat kiis-tattomat. Kasvien kasvua on saatu nopeutettua hiilidioksidilannoituksen myötä huomattavasti samalla kun satojen määrä ja kasvu on lisääntynyt selvästi. Tällä hetkellä Suomessa hiilidioksidilannoituksessa käytetään yleensä kaupallista hiilidioksidia. Jatkossa tulisikin selvittää hiilidioksi-dilta vaadittava puhtausaste kasvihuonekäytössä. Suomessa ei ole kirjattu kasvihuoneiden hiilidioksidin käyttöä ja hiilidioksidin käytön optimoimi-seksi olisi hyvä selvittää käyttökokemukset eri kasvihuoneissa hiilidioksi-dilannoituksen suhteen.

Biokaasun hyödyntäminen kasvihuoneissa on kuitenkin osoittautunut kannattavaksi. Oulun eteläisen alueella biokaasulaitoksia on olemassa ja hiilidioksidin hyötykäyttö kasvihuoneissa voisi olla yksi ratkaisu hiilidi-oksidi-päästöjen pienentämiseksi.

Lähteet

AGA, 2010, Viitattu 12.1.2012, http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/nav_prod_bulk#2

AGA, Käyttöturvallisuustiedote, Viitattu 18.6.2012

[http://www.linde-healthcare.fi/international/web/lg/fi/like35lgltfi.nsf/repositorybyalias/hiilidioksidi_ktt/\\$file/Hiilidioksidi_1%C3%A4%C3%A4kinn%C3%A4llinen_laite.pdf](http://www.linde-healthcare.fi/international/web/lg/fi/like35lgltfi.nsf/repositorybyalias/hiilidioksidi_ktt/$file/Hiilidioksidi_1%C3%A4%C3%A4kinn%C3%A4llinen_laite.pdf)

Aittomäki, A., 2005, Hiilidioksidi kylmälaitoksissa. Kokemukset Suomes-sa. Raportti. Energia- ja prosessitekniiikan laitos. Tampereen teknillinen yliopisto.

Elinympäristömme kaasut, Viitattu: 12.1.2012.

<http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/kaasut/index.html>

- Erjava, A., **2009**, Biokaasulaitoksen perustaminen kasvihuonetilalla – Taus-tatietojen selvitys, Opinnäytetyö, Luonnonvarainstituutti, Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja Nro. 46.
- European Comission, EU Energy in figures 2010, CO₂ Emis-sion by Sector, Verkkojulkaisu. Viitattu 15.2.2012. http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/statistics/ext_co2_emissions_by_sector.pdf
- Fortum, **2011**, Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, Viitattu 13.1.2012. http://www.fortumresearch.com/filebank/25-Hiilidioksidin_varastointi_FL.pdf
- Heiskanen, H. ja Leppälä, H., **2011**, BioE – Liiketoimintasuunnitelma, 12.10.2011.
- Jokelainen, A., **2011**, Kasvihuoneenohjausjärjestelmä, Opinnäytetyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- Järvinen, Jari, **2011**, KaVo – Kaakosta Voimaa hanke, Levästä biokaasua alustavia tuloksia.
- Korhonen, K., **2009**, Ohjelmoitavan kontrollerin käsikirja peruskäyttäjälle jäädytys- ja lämpöpumppusovelluksiin, Opinnäytetyö, Tietotekniikan koulutusohjelma, Lahden ammattikorkeakoulu.
- Laitinen, R. ja Toivonen, J., 1982, Yleinen ja epäorgaaninen kemia, Otati-eto, 17. painos, Hakapaino Oy, Helsinki 2007.
- Lehisto, H. ja Tolonen, N., 2011, Koivun taimikasvatus kasvihuoneessa, Opinnäytetyö, Puutarhatalouden koulutusohjelma, Oulun seudun ammattikorkeakoulu. http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/24616/Lehisto_Tolonen.pdf?sequence=1
- Kauppapuutarhaliitto, Puhelinkeskustelu 17.2.2012 / Jukka Tuominen, tekniikan asiantuntija.
- Miilumäki, M., **2011**, Hiilidioksidin suora teollinen hyödyntäminen, Kan-didaatintyö 218, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulun Ylio-pisto. <http://cc oulu.fi/~jpjaako/d/nro218.pdf>
- Motiva Oy, Kasvihuoneviljelijän energia- ja ilmasto-opas. CO₂-päästöt hallintaan ja kannattavuutta liiketoimintaan. Viitattu 2.2.2012. <http://www.motiva.fi/files/494/kasvihuone10.pdf>
- Myyrä-Mustonen, Satu, 2011, Salaatin idättäminen ja taimikasvatus, Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma, Pohjois-Karjalan amat-tikorkeakoulu. http://publications.theseus.fi/xmlui/bitstream/handle/10024/34257/myyra-mustonen_satu.pdf?sequence=1

-
- Näkkilä, J., Hovi-Pekkanen, T. ja Tahvonen, R., **2006**, Ympärivuotisen kasvihuoneviihannestuotannon tehostaminen, MTT Kasvituotannon tutkimus. <http://www.smts.fi/pos06/0101.pdf>
- Outa, P. ja Särkkä, L., **2004**, Hiilidioksidilannoituksen vaikutus leikkoruusun viljelyn kannattavuuteen –tilamallitarkastelu, Maataloustieteen päivät 2004, MTT.
- Pohjola, A., **2009**, Vihreiden kasvien fotosynteesi, Kandidaatintyö, Kemian laitos, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, Helsingin yliopisto.
- Silberberg, Martin, S., Chemistry, The Molecular Nature of Matter and Change, Second Edition, International Edition, 2000.
- Sipilä, K., Rämä, M., Aittomäki, A., Mäkinen, A. ja Söderman, J., **2009**, Urheilupaikkojen integroidus lämmitys- ja jäähdytystekniset ratkaisut, VTT tiedotteita 2476.
- Suomen akatemia, 2009, Leena Vähäkylä, Hiilidioksidista voi tehdä muovia, 4.5.2009, Tietysti.fi, Uutta tieteen ääreltä. Verkkojulkaisu. Viitattu 16.2.2012
<http://www.aka.fi/fi/T/Tarinoita-tieteesta/Tiedetarinoita--luonnontieteiden-ja-tekniikan-tutkimuksesta/Hiilidioksidista-voi-tehda-muovia/>
- Särkkä, L., Kaunisto, T. ja Rauniomaa, E., **2001**, Leikkoruusun viljelyn tehostaminen –tiheäviljelytuotanto ja sen talous, MTT.
- Tilastokeskus, 2011, Kasvihuonekaasut 2010, verkkojulkaisu. Suomen virallinen tilasto, Ympäristö ja luonnonvarat 2011. Helsinki 13.12.2011. Viitattu 13.1.2012. http://www.stat.fi/til/khki/2010/khki_2010_2011-12-13_fi.pdf
- Tilastokeskus, Suomen väestö 2007, verkkojulkaisu. Suomen virallinen tilasto, Väestörakenne 2007. Helsinki 28.3.2008. Viitattu 15.2.2012. http://www.stat.fi/til/vaerak/2007/vaerak_2007_2008-03-28_tie_001_fi.html
- Turunen, H., **2011**, CO₂-balance in the atmosphere and CO₂-utilisation, An engineering approach, Väitöskirja, Lämpö- ja diffuusiotekniikan laboratorio, Oulun yliopisto.
- Työ- ja elinkeinoministeriö, Uusiutuvat energialähteet, 24.5.2012. Viitattu 13.6.2012. <http://www.tem.fi/index.phtml?s=2481>
- Työ- ja elinkeinoministeriö, Tiedote 2010, Suomi toimitti uusiutuvan energian toimintasuunnitelman komissiolle, 1.7.2010, Viitattu 13.6.2012. http://www.tem.fi/index.phtml?101881_m=99651&s=4265

- Westerlund, K., **2011**, Kasvihuoneiden energiankulutus Suomessa, Motivan tilaama raportti, 12.8.2011. Viitattu 3.2.2012. http://www.energiatehokkuussopimukset.fi/midcom-serveattachment-guid-1e0c4e30062e668c4e311e09d19451d02ba9f899f89/kasvihuoneiden_energiankulutus_suomessa.pdf
- World Bank Search, Verkkojulkaisu. Viitattu 15.2.2012. <http://search.worldbank.org/data?qterm=population+Germany+2007&language=EN&format=>
- Österman, P., **2002**, Talvitomaatin tuotantokustannus ja kannattavuus, MTT:n selvityksiä 13. MTT. 24 s, 6 liitettä. Verkkojulkaisu. <http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts13.pdf>

Kuivamädätys

1 JOHDANTO

Kiinnostus uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämiseksi on kasvanut ja tähän on asetettu tavoitteet niin valtakunnallisesti kuin EU-tasollakin. Vastaavasti tavoitteet on asetettu fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiseksi. Uusiutuvia energiamuotoja hyödyntävää pienenergiatuotantoa ei ole tutkittu laajemmin, mutta toisaalta siitä ei ole vielä paljoa käyttökemustakaan. Tästä syystä on koettu olevan tarvetta erityisesti biokaasu- ja puukaasuteknologiaan sekä niiden yhdistelmään liittyvälle tutkimustoiminnalle (Heiskanen, H. ja Leppälä, H., 2011).

Tämän taustaselvityksen tarkoituksena on antaa jonkin verran pohjatietoa erityisesti kuivamädätysteknologiasta sekä siihen liittyvistä käytökokemuksista kirjallisuuteen ja henkilökohtaisiin haastatteluihin pohjautuen. Lisäksi tarkoituksena on selvittää mahdollisuuksia hyödyntää biokaasuna muodostuvaa hiilidioksidia lähinnä kirjallisuusselvityksen avulla. Tarve hiilidioksidin hyötykäytölle on olemassa ilmaston lämpenemisen näkökulmasta. Toisaalta siinä piilee myös suuri potentiaali, joka oikein hyödynnettynä parantaa mm. maanviljelijän omavaraisuutta ja pienentää myös kokonaiskustannuksia.

Lyhenteet

HRT = Hydraulinen viipymäaika (hydraulic retention time)

LBR = Huuhtova peti reaktori (leaching bed reactor)

Nm³ = Normaalkuutiometri

ORL = Orgaaninen kuormitus (organic loading rate)

TS = Kuiva-aine (total solids)

VS = Orgaaninen kuiva-aine, hehkutushäviö (volatile solids)

ww = Märkápaino (wet weight)

2 YLEISTÄ

Biokaasua muodostuu orgaanisen aineksen hajotessa anaerobisissa olosuhteissa. Muodostunut biokaasu koostuu metaanista (55 – 75 %), hiilidioksidista (25 – 45 %) sekä pienehköistä määristä muita aineita (Alakan-gas, E., 2000 ja Turpeinen, J. 2010). Määrät vaihtelevat hieman eri lähteitä ja toisaalta eri raaka-aineita ja tuotantotapoja verrattaessa (Taulukko 1).

Perinteisesti maataloilla orgaaninen aines on hajotettu märkämädätyksen keinoin. Nyt kiinnostuksen kohteena on kuivämädätys, joka mahdollistaa mm. lannan, peltobiomassan ja biojätteenkin mädättämisen kuivemmissä olosuhteissa. Korkeamman kuiva-ainepitoisuuden vuoksi prosessissa olevan veden määrä on pienempi ja se usein kierrätetään prosessissa. Näin myös mädätettävän materiaalin määrä on huomattavasti aikaisempaa pienempi, jolloin pelloille lannoitteena levitettävän rejektin määrä myös pienenee. Tämä olisi yksi vastaus maatalouden ympäristökuormitusky-symykseen, joka on nähty tarpeellisenä lähialueilla mm. vedenlaadun pa-rantamiseksi (Erkkilä ja Kostilainen, 2011). Kuivämädätyslaitosten etuihin voidaan myös lukea pienemmän reaktorin koko, prosessienergian kulutus sekä kuljetustarve (Schäfer et al., 2006). Mädätysprosessia tarkastellaan usein lehmän lannan näkökulmasta. Samanlaisia hyötyjä on havaittu kui-tenkin tarkasteltaessa myös kananlantaa. Tällöin jopa märkämädätys on poissuljettu vaihtoehto arvokkaan veden lisäämisen vuoksi (Kuokkanen, P., 2010).

Taulukko 1. Biokaasun tyypillisiä koostumuksia Suomessa. Verrokkina Suomeen tuotava siperialainen maakaasu (Ahonen, S., 2010)

Kompo-nentti	Biokaasulaitos	Biokaasu Jätevedenpuh-distamo	Kaatopaikka	Maakaasu (Venäjä)
CH ₄ (%)	60 - 70	55 - 65	45 - 55	98
CO ₂ (%)	30 - 40	35 - 45	30 - 40	0,1
N ₂ (%)	< 1	< 1	5 - 15	0,9
Rikkivedyt (%)	10 - 2000	10 - 40	50 - 300	Ei mainittu

(CH₄ = metaani, CO₂ = hiilidioksidi ja N₂ = typpi)

Kiinnostus kuivämädätystä kohtaan on kasvanut jatkuvasti, mutta to-teutuneita kuivämädätyslaitoksia Suomessa ei ole vielä useita. Ranska-sa, Sveitsissä ja Saksassa puolestaan on rakennettu runsaasti yksittäisiä maataloja palvelevia pieniä biokaasulaitoksia, jotka hyödyntävät tuotetun energian omassa toiminnassaan (Leinonen, 1998). Haasteen kuivämädä-tykselle luovat ilmasto-olosuhteet sekä laitehankinnat. Muutamia onnis-tuneita kokeita kuivämädätyksen osalta on kuitenkin suoritettu ja tulokset ovat olleet lupaavia (Korhonen, E., 2010). Kuivämädätyksen ehdottomi-

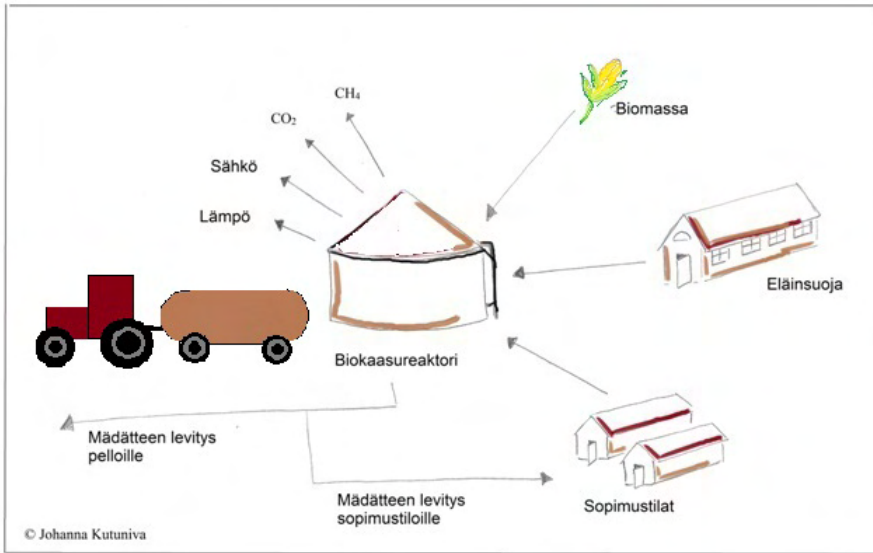
na etuina voidaan pitää hajuhaittojen pienenemistä sekä mahdollisuutta käyttää mädätysjännös suoraan lannoitteena, jolloin säästetään energiaa ja ilmastopäästöt pienenevät. Muodostunut biokaasu voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön tuotannossa tai se voidaan hiilidioksidin erottamisen jälkeen jatkojalostaa polttoaineeksi. Biokaasusta erotettu hiilidioksidikin olisi suositeltavaa käyttää hyödyksi hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Näin tehdäänkin mm. muutamissa kasvihuoneissa. Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö vaativat kuitenkin vielä eri mahdollisuuksien selvittämistä ja tätä on tarkasteltu erillisenä kokonaisuutena selvityksen toisessa osassa.

Niin kuivamädätyksen kuin hiilidioksidin talteenoton päätavoitteena on käyttää hyödyksi jo olemassa olevia lähtöaineita ja tätä kautta pienentää jätteen määrää sekä parantaa ilmasto-olosuhteita. Erilaisia menetelmiä on olemassa ja on ollut kehitteilläkin pitkän aikaa, mutta mm. maatilakoh- taiset erot poikkeavat toisistaan. Näin ollen tarkastelu täytyy tehdä aina tilakohtaisesti huomioiden erilaiset lähtöainevarannot niin tarkasteltaval- la tilalla kuin lähiseudullakin. Tämän lisäksi on otettava huomioon myös olemassa olevat puitteet. Tämänkin taustaselvitys on tehty Oulun Eteläisen alueen tarpeesta energiaomavaraisuutta silmällä pitäen.

Taustaselvityksen lähtökohtana pidetään maatilakokoluokkaa. Selvi- tystä on toivottu Haapajärven ammattiopiston puolesta, jossa biokaasua tuotetaan tällä hetkellä lietelannasta. Ammattiopistolla on tällä hetkellä 5 hevosta sekä 70 lehmää, joista 45 on lypsävää. Näiden lisäksi opistolla on olkea ja vanhoja paaleja mädätettäväksi (Malinen, S., 2011).

3 RAAKA-AINEET JA OLOSUHTEET

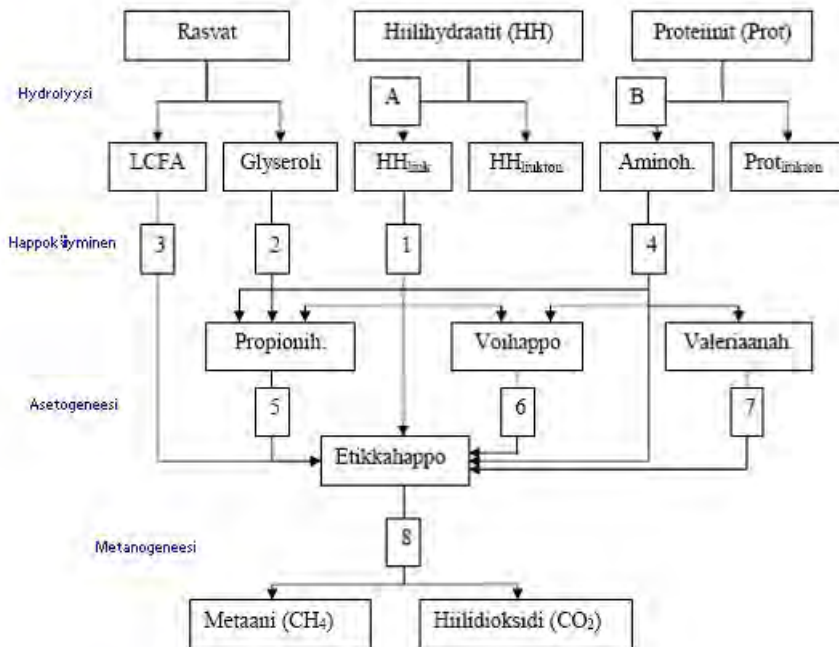
Maatilakokoluokan biokaasutuotannossa käytetään raaka-aineena lähtö- kohtaisesti oman ja mahdollisesti myös lähiseudun mautilojen varantoja. Toisinaan raaka-aineena on käytetty ainoastaan lantaa ja toisinaan tähän on lisätty peltobiomassaa tai erilaisia muita jätteitä. Onnistuneita tulok- sia on saatu muun muassa MTT:n Sotkamon toimipaikassa, jossa lannan sekaan on lisätty kalan perkuujätettä (Korhonen, M., E., 2010). Yleisesti maatilan tilannetta on esitelty kuvassa 1.



Kuva 1. Maatilan biokaasulaitoksen toimintavaihtoehdot.

Puhuttaessa kuivamädätyksestä tarkoitetaan tilannetta, jossa syötteen kuiva-ainepitoisuus on 25 – 50 % (Motiva, 2009). Lämpötila-alueeksi valitaan yleensä joko mesofiilinen n. 35 °C tai termofiilinen 55 – 60 °C. Sopivimmaksi havaittu lämpötila pyritään pitämään reaktorissa samana koko mädätyksen ajan, jotta anaerobinen hajotus olisi mahdollisimman nopeaa. Lämpötilan vaihdeltaessa anaerobinen hajoaminen hidastuu. Tällöin olosuhteet eivät ole optimaaliset millekkään mikrobiryhmälle (Korhonen, E., 2010 ref. Rittman ja McCarty 2001) ja biokaasun tuotanto heikkenee.

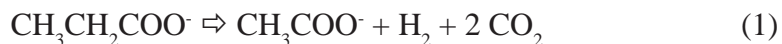
Maatiloilla käytettävissä oleva raaka-aine koostuu orgaanisista ja epäorgaanisista aineista. Tämän eloperäisen aineksen ollessa anaerobisissa olosuhteissa bakteerit hajottavat orgaanista ainesta eli proteiineja, lipidejä sekä hiilihydraatteja.



Kuva 2. Anaerobisen hajotuksen vaiheet ja hajotukseen osallistuvat mikrobit.

1) Glukoosia käyttävät hapon muodostajat, 2) Lipolyyttiset bakteerit, 3) Pitkaketjuisia rasvahappoja hajottavat asetogeenit, 4) Aminohappoja hajottavat haponmuodostajat, 5) Propionihappoa hajottavat asetogeenit, 6) Voihappoa hajottavat asetogeenit, 7) Valeriaanahappoa hajottavat asetogeenit, 8) Asetoklastiset metanogeenit. (Korhonen, M. E., 2010 ja Angelidaki ym. 1999)

Mädätysprosessi on jaettavissa kolmeen eri vaiheeseen, joka on esitetty myös kuvassa 2. Ensimmäisessä vaiheessa mikrobit hajottavat suuret makromolekyylit orgaanisiksi hapoiksi, alkoholeiksi ja muiksi pienmolekyyleiksi. Toisessa vaiheessa heteroasetogeeniset mikrobit pelkistävät orgaanisia pienmolekyylejä. Tästä syntyy asetaatteja, vetyä ja hiilidioksidia (kaava 1). (Turpeinen, J., 2010)



Heteroasetogeenien muodostamasta vetykaasusta tuotetaan asetaatteja ja vettä homoasetogeenien vaikutuksesta (kaava 2).



Viimeisessä vaiheessa bakteerit tuottavat asetaateista tai vedystä ja hiilidioksidista metaanikaasua (kaavat 3 ja 4).



Syötteen kuiva-ainepitoisuudella sekä kosteuspitoisuudella on vaikutusta metaanin tuottoon. Kuiva-ainepitoisuuden noustessa liian korkealle metaanin tuotto alenee (Angelidaki ym. 2006). Kosteuspitoisuudelle täytyy myös etsiä optimaalinen raja. Fujishima et al. (2000) ovat selvittäneet tutkimuksissaan optimaaliseksi kosteuspitoisuudeksi täyssekoitteen reaktorin syötteenä käytetylle kuivatulle jätevesilietelle 92,9 %. Alhaisemmassa kosteuspitoisuudessa hiilihydraattien hajoaminen väheni ja proteiinien hajoaminen lisääntyi. Kuivamädätteellä optimaalinen kosteuspitoisuus on todennäköisesti alhaisempi.

Raaka-aineen koostumukseen vaikuttavia tekijöitä arvioitaessa on lähdettävä liikkeelle ihan nauttan nauttimasta ravinnosta alkaen. Metaanintuottopotentiali on alhaisempi ainoastaan karkearehua syöneiden nauttojen sonnassa (0,1 m³ CH₄/kg VS) kuin karkea- ja väkirehua syötettäessä (0,12–0,16 m³ CH₄/kg VS). Tämän jälkeen osa orgaanisesta raaka-aineesta ennättää hajota ennen biokaasureaktoriin syöttöä ja osa metaanituotosta menetetään, mikäli lantaa varastoidaan. (Moller ym, 2004). Eri lantaerien metaanintuottokin vaihtelee erästä ja käytetystä kuivikkeesta riippuen. Käytettäessä turvetta kuivikkeena metaanintuotto oli selvästi heikointa muihin lantanäytteisiin verrattaessa. Turpeen huonoa metaanintuottopotentialia voi selittää korkea ligniinipitoisuus. Suokasvien hajotessa anaerobisissa olosuhteissa muodostuu turvetta. Tämän maatuessa kokonaismassassa suhteellinen ligniinin osuus kasvaa ollen maatumisasteesta riippuen 5 – 40 % (Alakangas E., 2000). Pelkästään kuivikkeiden metaanintuottoa tutkittaessa on oljella havaittu olevan korkein metaanintuottopotentiali (Korhonen, E. 2010 ja Moller ym. 2004). Muista tutkituista materiaaleista korkein metaanintuottopotentiali on saatu säilörehulla, jonka soveltuvuus biokaasutuotantoon on havaittu jo aiemmin (Korhonen, E., 2010, Lehtomäki ym. 2008, Seppälä ym. 2009).

Taulukossa 2 on esitetty eri raaka-aineiden metaanintuottopotentialia. Taulukon laajuudesta voidaan jo huomata, että nimityksellä kuivikelanta voidaan tarkoittaa hyvin erilaisen koostumuksen omaavia syötteitä.

Taulukko 2. Eri raaka-aineiden biokaasutuotto. Metener Oy, 2009^a,

Lehtomäki, A., 2006^b, Alakangas, E. 2000^c, Lehtomäki, A. ja Rintala, J., 2006^d, Korhonen, M., Elina 2010^e, Moller H. ym., 2004^f, Karapaju P. ym., 2002^g, Seppälä M.y.m. 2009^h, Rico ym. 2007ⁱ, Latvala 2009^j, Saariniemi^k. Arvot on laskettu vastaamaan toisiaan artikkeleista löytyneiden tietojen perusteella.

Raaka-aine	Kuiva-ainepitoisuus %	Metaanin tuotto Nm ³ /t	Metaanin tuotto Nm ³ /t _{orgaanista ainetta}
Naudan lietalanta ^a	~ 7	14 - 16	120 – 360
Naudan lietalanta ^f			169 – 237
Naudan lietalanta ^k	~ 7		168
Naudan sonta ^f			113 – 181
Naudan lanta ⁱ			350
Lanta ^d		8 – 23	114 - 454
Sian lietalanta ^a	~ 7	16 – 18	240 – 540
Sian lietalanta ^k	~ 6		319
Kanan lanta ^k	~ 70		239
Turkiseläinlanta ^k	~ 30		213
Ruokohelppi ^b		85	299
Ruokohelppi ^a	~ 23	53	246
Perunan kuorimajäte ^a	~ 20	60 - 80	360 – 380
Perunan kuoret ^k	~ 20		310
Nurmisäilörehu ^a	~ 25	70 – 80	290 – 310
Maissisäilörehu ^a	~ 25	80 – 90	340 – 360
Teurastamojäte ^d		170	647
Kasvibiomassa ^k	~ 10		177 – 266
Roskakala ^a	~ 22	90 – 100	510 – 530
Kotitalouksien biojäte ^a	~ 30	100 – 150	300 – 400
Biojäte ^d		114 – 170	568 – 681
Leipomojätteet ^a	~ 70	400 – 420	550 – 600
Paistorasvajäte ^a	~ 90	620 – 630	690 – 700
Timotei-Apilas-eos ^b		70 – 79	308 – 343
Timotei ^h		316 – 384	350 – 417
Apila ^g		135 – 214	160 – 237

Raaka-aine	Kuiva-ainepitoisuus %	Metaanin tuotto Nm ³ /t	Metaanin tuotto Nm ³ /t _{orgaanista ainetta}
Kaura-Virnaseos ^b		48 – 53	343 – 379
Raparperi ^b		33 – 37	405 – 458
Jättitatar ^b		15 – 41	79 – 220
Maa-artisokka ^b		69 – 95	273 – 379
Nokkonen ^b		22	185
Energiakasvit ^d		34 – 170	341 – 568
Jätevesiliete ^d		9 – 18	352 – 727
Turve ja lanta ^e	~ 13 ^e		204 – 238
Kutterinpuru- ja säilörehulantalanta ^e	~ 14 ^e		284 – 295
Turve ^e	~ 51 ^e		57
Kuorike ^e	~ 40 ^e		90
Kauran olki ^e	~ 76 ^e		238 – 250
Kauran olki ^g		259 – 271	282 – 293
Kuivaheinä ^g		282 – 361	338 – 395
Säilörehu ^e	~ 22 ^e		420
Kutterinpuru ^e		259 – 271	282 – 293
Nurmi ^j	~ 30	127	454

Tuotettu kaasu ilmoitetaan usein normaalikuutiometreinä (Nm³), jolloin kaasu on normaali-ilmanpaineessa (101,3 kPa, 1 atm) lämpötilan ollessa 0 °C (273,15 K). Tarvittaessa muunnokset voi laskea kaasujen tilanyhtälön ($pV = nRT$) avulla.

Taulukko 3. Keskimääräiset naudanlantojen ravinnepitoisuudet Suomessa vuosina 2000 – 2004. (Taulukko Korhonen, E, 2010, Viittaus Anonyymi 2005)

Ravinne	Yksikkö	Kuivikelanta	Lietelanta	Virtsa
N _{liuk}	kg/t (tuore lanta)	1,7	1,8	1,8
N _{tot}	kg/t	5,4	3	2,5
P	kg/t	1,6	0,5	0,1
K	kg/t	4,7	3,3	3,7
Mg	kg/t	1,2	0,4	0,1
Ca	kg/t	2,7	0,8	0,1
Na	kg/t	0,4	0,3	0,2
B	g/t	2,9	1,3	0,7
Cu	g/t	6	2,7	0,3
Mn	g/t	45,5	12,4	1,5
Zn	g/t	42,6	17,1	1,8

Viime vuosina on tutkittu erilaisen koostumuksen omaavia naudanlantojen keskimääräisiä ravinnepitoisuuksia. Vuosina 2000 – 2004 tehdyissä tutkimuksissa kuivikelannan kokonaistyyppipitoisuus on havaittu lietelannan tyyppipitoisuutta korkeammaksi. Vastaavasti liukoisen typen pitoisuus on ollut pienempi. Keskimääräiset naudanlantojen ravinnepitoisuudet on esitetty taulukossa 3. Tämän perusteella on voitu päätellä, että kuivikelannassa on enemmän aminohappoihin sitoutunutta tyyppiä kuin lietelannassa (Korhonen, E., 2010).

Muodostuvan kuivikelannan määrä riippuu käytetyn kuivikkeen määrästä sekä siitä, imeytetäänkö virtsa myös kuivikkeisiin. Mikäli virtsa imeytetään kuivikkeisiin, on muodostuvan kuivikelannan määrä kaksi kertaa niin suuri, mitä muodostuu tiloilla joissa virtsa erotetaan lannasta (Korhonen, E., 2010).

Reaktoriin lisättävän orgaanisen aineksen määrä on riippuvainen aineksen koostumuksesta. Lisättävän aineen määrä ilmaistaan reaktoritilavuutta kohden vuorokaudessa (kg VS/m^3 reaktorin nestetilavuus d). Ainoastaan lantaa käsiteltäessä suositeltu OLR on $2,5 - 3,5 \text{ kg VS/m}^3 \text{ d}$. Lannan yhteydessä syötettäessä jotakin lisämateriaalia suositeltu OLR on $5 - 7 \text{ kg VS/m}^3 \text{ d}$ (Korhonen E., 2010, kirjallisuuskatsaus Sakar ym 2009). Vertailemalla syöteseoksen teoreettista biokaasupotentiaalia ja tuotetun biokaasun määrää voidaan selvittää kuinka laitos toimii. Mikäli biokaasun tuotto on ole-

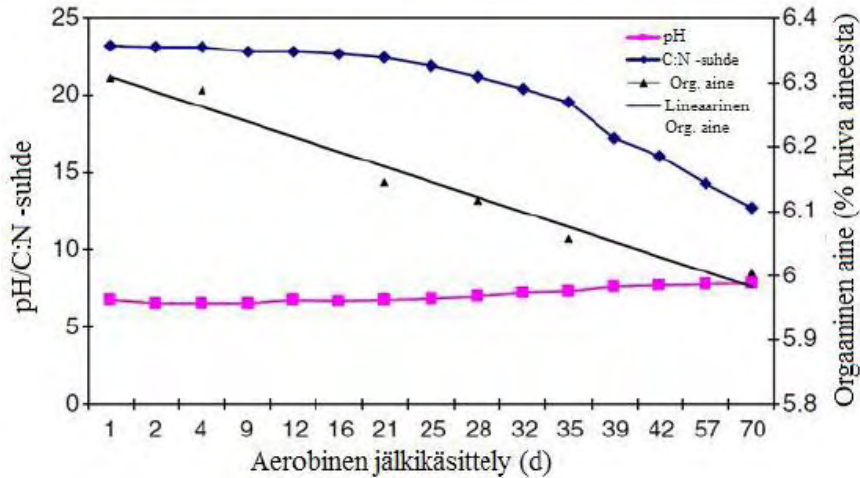
tettua pienempi, voidaan olettaa viipymääjan olevan liian lyhyt suhteessa kuormitukseen tai prosessissa on tällöin jokin muu häiriö (Latvala, 2009).

Mitoitettaessa biokaasulaitosta voidaan laskennallisesti arvioida kunkin eläimen tuottama orgaanisen kuiva-aineen kilomäärä. Tutkija Simo Leinonen Joensuun yliopistosta on arvioinut viitteellisesti (Taulukko 4), kuinka paljon biokaasua käytetystä raaka-aineesta saadaan kutakin kuiva-ainekiloa kohden.

Taulukko 4. Biokaasun saatavuus eri raaka-aineista. (Leinonen, 1998)

Eläin	Lanta kg/VS	Biokaasu/kpl/v	Vaste kevyt polttoöljy	Vaste sähköä kWh
Lehmä	1600	640-1120	416-728	3392-5936
Kana	6,2	2-4	2-3	13-23
Sika	104	42-73	27-47	223-387
Emakko	336	136-235	89-153	721-1246
Kettu	18	7-13	5-9	37-69
Supi	20	8-14	5-9	42-74
Minkki	7,5	3-5	2-3	16-27

Reaktorissa vallitseva pH on tärkeä selvittää. Lähes kaikilla raaka-aineilla pH laskee mädätyksen aikana. Rasvahappojen kertymisen on havaittu laskevan pH:ta entisestään, jolloin ammoniakki muuttuu vähemmän haitalliseen ammonium-muotoon (NH_4^+). Pitkäketjuiset rasvahapot puolestaan inhiboivat kaikkia anaerobiseen hajotukseen osallistuvia bakteereita (Angelidaki ym. 1999). MTT:n Sotkamon yksikössä tehdyissä kokeissa pH oli ennen koetta 7,26 – 8,20 ja kokeen jälkeen 7,31 – 7,60 (Korhonen, E., 2010). Aerobisessa jälkikäsitelyssä Turpeinen (2010) on havainnut pH:n puolestaan nousevan 6,7:stä 7,8:aan (kuva 3).

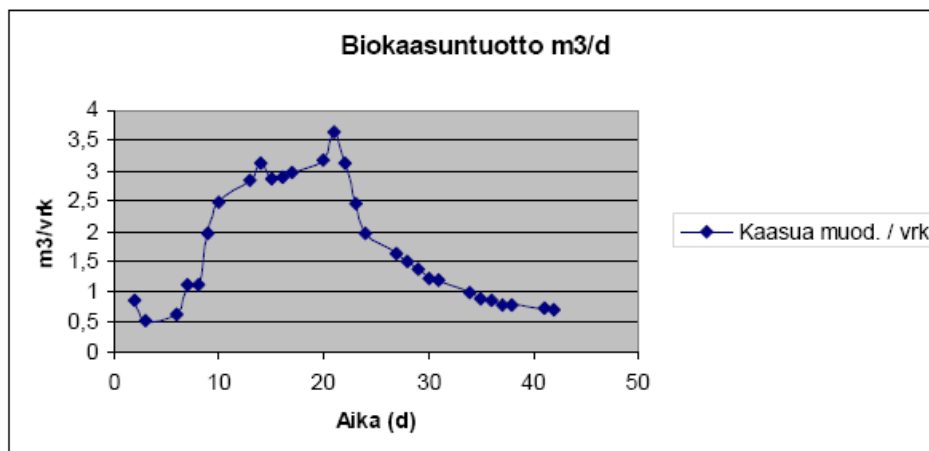


Kuva 3. Mädatteen fysikaalisten ominaisuuksien muuttuminen kompostoinnin edetessä (Turpeinen, J., 2010)

Hydraulinen viipymäaika eli aika, jonka syöte viipyy reaktorissa (HRT), vaihtelee syötteen koostumuksesta riippuen. Syötettäessä naudanlantaa on mesofiilisen anaerobisen käsittelyn viipymäajaksi suositeltu 12 – 25 vuorokautta. Lannan sisältäessä kuiviketta suositeltu viipymäaika on pidempi. Esimerkiksi olkea kuivikkeena käytettäessä suositeltu HRT on 15 – 35 vuorokautta (Korhonen E., 2010 ref. kirjallisuuskatsaus Sakar ym 2009). Prosessissa tulee välttää ylikuormatilannetta, jossa hydraulisen viipymän tai orgaanisen kuormituksen kapasiteetti ylitetään. Tällöin biokaasuntuotto laskee, kun prosessi ei toimi suunnitellusti eikä käsittelyjäännöksen laatu vastaa tällöin odotettua (Latvala, M., 2009).

Biokaasureaktorissa tuotettavan metaanin energiasisältö on noin 10 kWh/m³ CH₄. Todellisuudessa koko metaanintuottopotentiaalia ei lähes koskaan saavuteta, koska se vaatisi liian pitkän viipymäajan. Lisäksi osa metaanin energiasisällöstä kuluu reaktorin sekoitukseen ja lämmittämiseen. Lisäksi todellisissa reaktorikokeissa saatu metaanintuotto on ollut pienempi (0,16 m³ CH₄/kg VS) kuin vastaavissa laboratorikokeissa (0,18 m³ CH₄/kg VS) (Korhonen E., 2010).

Metaanin tuottonopeus ja anaerobisessa reaktorissa olevien mikrobien kasvunopeus ovat riippuvaisia mikrobien ravintonaan käyttämien materiaalien pitoisuuksista. Tämän vuoksi reaktorissa tulee olla riittävästi mikrobien tarvitsemaa ulkopuolista ravintoa.



Kuva 4. Panoskokeessa muodostuvan biokaasun määrä m^3/d (Virkkunen et al., 2010).

MTT:n Sotkamon toimipisteessä tehdyissä puolijatkuvassa panoskokeessa $4,5 \text{ m}^3$ reaktorissa saatu biokaasuntuotto on esitetty kuvassa 4. Reaktoriin ei laitettu aluksi ympymateriaalia ja syöte oli aluksi niin kiinteää, että telakuljetin ei liikkunut ollenkaan. Kolmantena päivänä reaktorin täytön jälkeen massa oli kuitenkin löystynyt jo bakteeritoiminnan ansiota ja telakuljetin alkoi toimia, vaikkakin se havaittiin teholta heikoksi jättäen reunoille sekoittamattoman alueen. Viikon kuluttua kokeen aloittamisesta biokaasuntuotto lähti jyrkkään nousuun. 3 m^3 massasta saatiin enimmillään $3,5 \text{ m}^3$ biokaasua vuorokaudessa (Virkkunen et al., 2010).

4 KUIVAMÄDÄTYSTEKNOLOGIAT

Kuivamädätysreaktori vaatii laitteistolta enemmän kestävyyttä verrattaessa pumpattavissa olevaan lietelantaa käsittelevään biokaasureaktoriin. Kuivikelannan korkean kuiva-ainepitoisuuden vuoksi materiaalin pumpaus ei ole mahdollinen vaihtoehto ja tätä varten joudutaan kehittämään sopivia menetelmiä. Sotkamossa MTT:n toimipaikalla lanta on syötetty syöttökierukalla reaktorin alaosaan kannella peitetyn syöttösuppilon kautta. Kaaviokuva (kuva 14) on esitetty kohdassa MTT Sotkamon tutkimuslaitos. Toisinaan kuivikelantaa on syötetty myös ruvikuljettimella (Demirer G. ja Chen S., 2008).

Reaktorit poikkeavat toisistaan myös sisällön sekoittamisen suhteen. On olemassa täyssekoitteisia, jaksottaisesti sekoitettuja ja sekoittamattomia reaktoreita. Lietelantaa käsiteltäessä täyssekoitteinen laitteisto on yleisin. Kuivalannan käsittelyssä käytetään usein tulppavirtausreaktoria, jossa ei juuri tapahdu sekoittumista aiemmin tai myöhemmin lisätyn raaka-aineen kanssa. Laitteiston etuna on, että reaktoriin syötetty massa viipyy reaktorissa täyden hydraulisen viipymääjan (Korhonen, E., 2010 ref. Rittman ja McCarty, 2001). Sekoitettavissa reaktoreissa raaka-aineen viipymästä ei ole aina varmuutta ja näin ollen metaanin tuotto voi olla epätaisaista. MTT:n Sotkamon toimipaikassa lannan sekoittamiseen on käytetty kuljetinta. Sekoittimelta vaaditaan suurta kestävyyttä. Sotkamossa tehdyissä tutkimuksissa ilmenikin ongelmia juuri sekoittimen kestävyys ja toimintavarmuuden kanssa.

Syötteen kuljettimet vaativat kuivamädätysreaktoreissa vielä kehitteilyä. Syöte ei aina ole pumpattavissa ja tilalle on täytynyt kehittää erilaisia menetelmiä. Syötettä voidaan kuljettaa sopivalla kuljetinvalinnalla tai kuljettaminen voidaan suunnitella tapahtuvaksi painovoiman avulla, kuten esimerkiksi Ytterenebyn tilalla on tehty Järnassa, Ruotissa.

Huuhtova petireaktori (LBR), jota esimerkiksi Bekon soveltaa, kerää mädätettävän materiaalin läpi suodattuvan veden säiliön pohjalle kiertäen suodattuen jälleen säiliön yläpuolelle, josta se suihkutetaan raaka-aineen päälle. Huuhtovasta petireaktorista on tehty useita eri sovelluksia kuten kaksi faasi- (a two-phase), hydrolyysi/happamoitumis- (hydrolysis/acidification) ja metanogeneesiprosessit (methanogenesis). Näissä prosesseissa huuhtouma, joka on ohjattu mädätettävän materiaalin läpi, uuttaa hydrolyysissä ja fermentaatiossa muodostuneet orgaaniset hapot. Hapot ohjataan metaanin muodostimelle (Demirer, G. ja Chen S., 2008).

Biokaasua tuottavia laitoksia on Suomessa useita. Toiminnassa vuonna 2009 ja suunnitteilla olevia biokaasulaitoksia on esitetty kuvassa 5. Maatilalaitoksia näistä on yhdeksän, joissa tuolloin on ollut käytössä märkämädätys menetelmä. Tiedot tuolloin maatiloilla toimivista laitoksista, reaktoreiden koosta ja syötteistä on esitetty taulukossa 5. Tietyvästi ainakin osa näistä maatiloista on siirtynyt/siirtymässä märkämädätyksen keinoista kuivamädättämiseen. Taulukossa 6 on esitetty eri naudantalantaa syötteenä käyttäneiden reaktoreiden tuloksia.

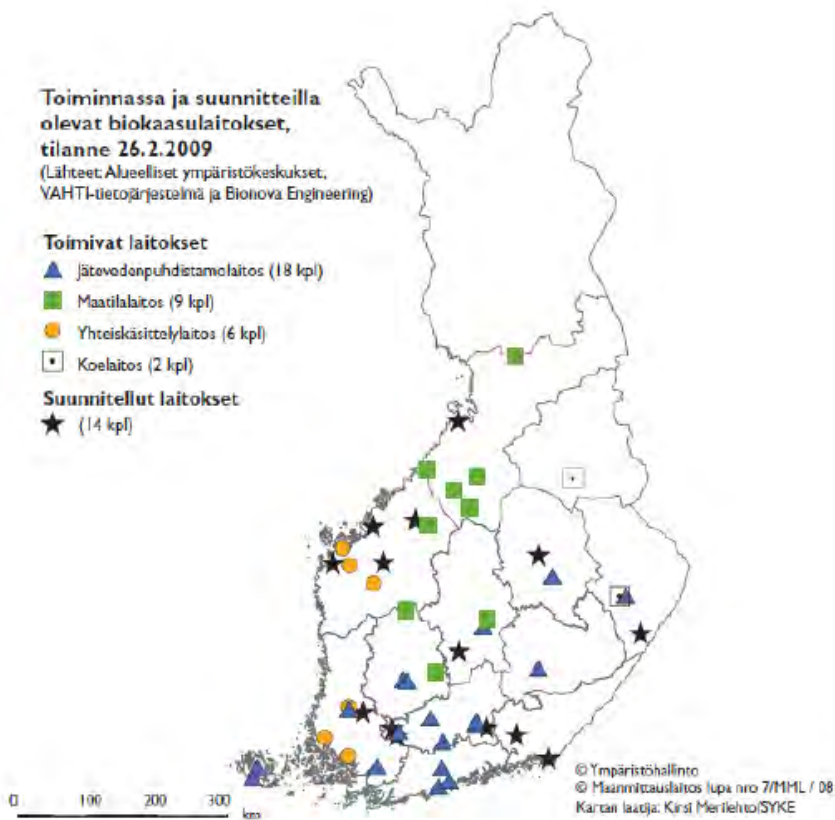
Taulukko 5. Maatilojen biokaasulaitoksia (Latvala, 2009)

Biokaasulaitokset maatiloilla	Rakennus- vuosi	Syöte	Reaktori- kapasi- teetti (m ³)	Biokaasua (m ³ /a)	Biokaasun hyödyntä- minen
Hannula, Kalajoki	1998	Maatalo- us-liete	80	50 000	CHP
Kalmari, Laukaa	1998	Maatalo- us-liete, sokerijäte	150	60 000	Liikenne- kaasu, CHP
Junttila, Ni- vala	2000	Maatalo- us-liete	50	40 000	Lämpö
Kotimäki, Halsua	2003	Maatalo- us-liete, entsyymi- liete	250	100 000	CHP
Koivunen, Virrat	2005	Maatalo- us-liete, biojäte, perunajäte	320	120 000	CHP, mikro- turbiini
Virtala, Haa- pavesi	2006	Maatalo- us-liete	200	-	Lämpö
Salmela, Orivesi	2006	Maatalo- us-liete	280	-	-
Haapajärven ammattioppi- laitos, Haapa- järvi	2007	Maatalo- us-liete	150	-	Lämpö

Taulukko 6. Reaktoreiden tuloksia, jotka ovat käyttäneet naudan lantaa syötteenään (Korhonen, E., 2010)

Syöte	Reaktorin koko	Reaktorin tyyppi	T °C	HRT	Syötteen TS %	Syötteen VS %	Metaanituotto m ³ CH ₄ /kg VS
Naudanlanta + biojäte ^a	4,2/5 l	CSTR	35	20	5,1 – 6,8	4,3 – 5,5	0,21 – 0,28
Naudanlanta + biojäte ^a	4,2/5 l	CSTR	55	15	3,5 – 5,1	2,9 – 4,2	0,19 – 0,24
Naudanlanta ^b	10 l	CSTR	35	10	8,0	7,2	0,09
Naudan kuivikelanta, kiinteä jae ^c	53 m ³	hydrolyysi-reaktori	38	22-25	17 – 19	15 – 17	0,05 – 0,07
Naudan kuivikelanta, nestejae ^c	18 m ³	metaani-reaktori	38	15-16	-	3 – 6	0,10 – 0,20
Naudan kuivikelanta ^c	71 m ³	hydr. + met.	38	37-41	-	-	0,09 – 0,10

Paavola ym. 2006^a, Ong ym. 2002^b ja Schäfer ym. 2006^c.



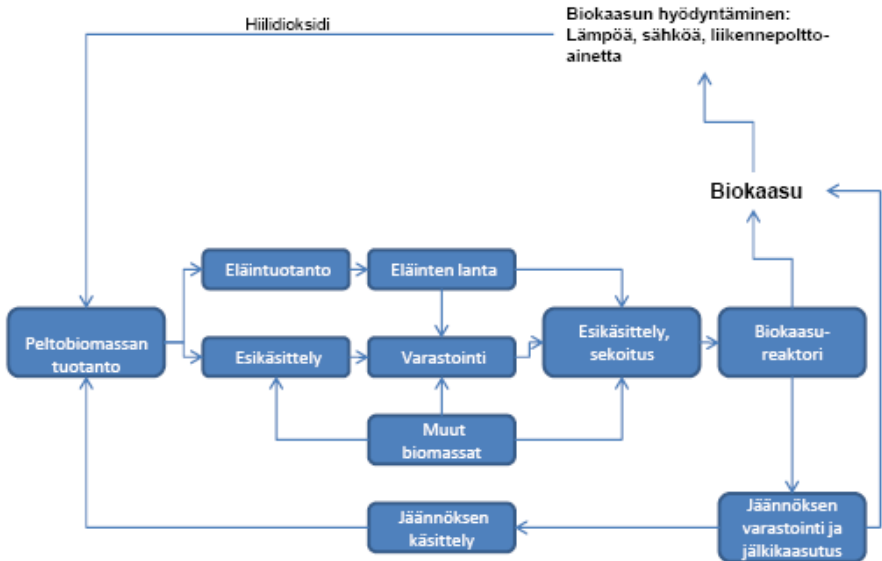
Kuva 5. Toimivat ja suunnitteilla olevat biokaasulaitokset Suomessa. (Latvala, 2009)

Seuraavaksi on esitetty yleistietoja kuivamädätysmenetelmää toiminnassaan käyttävistä biokaasulaitoksista sekä heidän käyttökokemuksiaan. Tiedot on kerätty eri toimittajien sivuilta sekä henkilökohtaisesti haastatellen.

Ammattiopisto Lappia, Loue

Tervolassa, Louella, toimivalla ammattiopisto Lappialla on yksikössään navetassa 158 eläinpaikkaa, joista 70 on tarkoitettu lypsylehmille. Opetusmaatilan hevostalleissa on yhteensä 26 karsinapaikkaa, joista 20 on vuokrauksessa talon sisäisille ja ulkoisille asiakkaille (Virtuaalikylyä). Heidän biokaasulaitokseen käytettävissä oleva syöttökapasiteetti on yhteensä 9,5

tn/vrk, johon sisältyy lietelantaa 8,4 tn/vrk, kuivalantaa 0,2 tn/vrk, vihermassoja 0,1 tn/vrk sekä ruokohelpeä 0,8 tn/vrk (Saariniemi). Kaavio opeusmaatilan pilotti biokaasulaitoksen virroista on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Opetusmaatilan pilotti biokaasulaitos, Ammattiopisto Lappia. (Saariniemi).

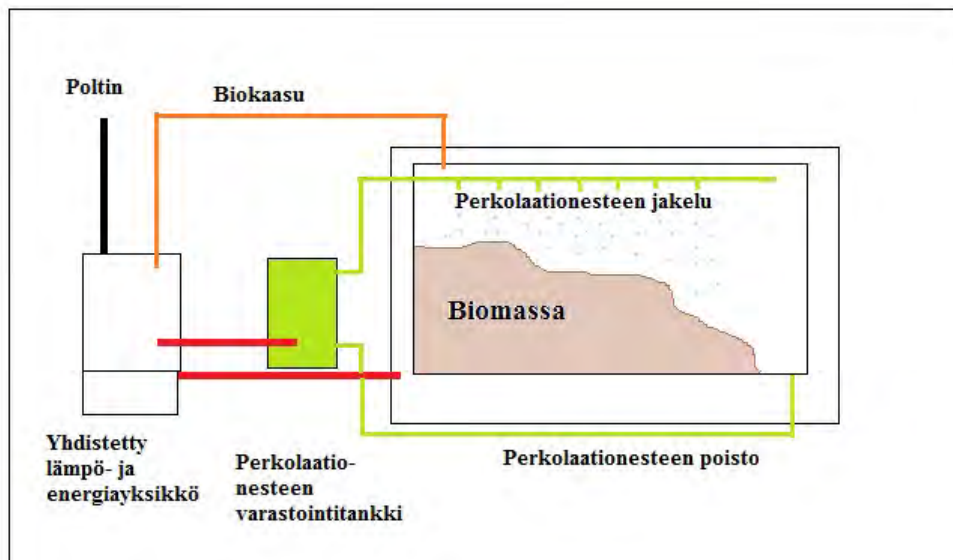
Ammattiopistolla on termofiilisen 190 m³ märkäreaktorin ohelle rakennettu 110 m³ mesofiilinen kuivareaktori. Näiden avulla he tuottavat 182 000 kWh lämpöenergiaa ja 219 000 kWh sähköenergiaa (Saariniemi).

Biokaasulaitoksen hinnaksi on arvioitu 320 000 € ja tarvittavan lisäsyötteiden hygienisointiyksikön hinnaksi lisäksi 40 000 €.

Louen toimipisteen biokaasulaitoksen rakentamisen laite-, sähkö- ja automaatioasennukset ovat olleet käynnissä talven 2011-2012 aikana. Koko laitos on rakennettu oppilastyönä ja prosessisuunnittelun on tehnyt suunnittelija amk:sta, jonka lisäksi biokaasutiimissä toimii kolme muuta henkilöä. Kuivamädätysreaktorin käynnistäminen on siirtynyt hieman eteenpäin, märkäreaktorin valmistustyöt ovat edenneet suunnitellusti.

Bekon

Bekonin toimittama kuivamädätykseen perustuva biokaasureaktori toimii mesofiilisella lämpötila-alueella 37 – 43 °C:ssa, jossa lämpöä pidetään yllä lämmittämällä lattiaa ja seiniä. Laitteistoon kuuluu erillinen suodatin ja suodos ohjataan erilliseen jälkimädätystankkiin, josta kerätään myös muodostunut biokaasu. Biokaasuprosessin toimintaperiaatteita on havainnollistettu kuvissa 7. Laitteisto kuluttaa 10 – 15 % tuottamastaan energiasta.



Kuva 7. Kuivamädätysreaktorin toimintaperiaate. Panostoisessa reaktorissa biomassaa kastellaan ympyviedellä, joka saadaan kierrätettyä reaktorin pohjalla olevan viemäroinnin avulla. (Bekon 2011, mukailten).

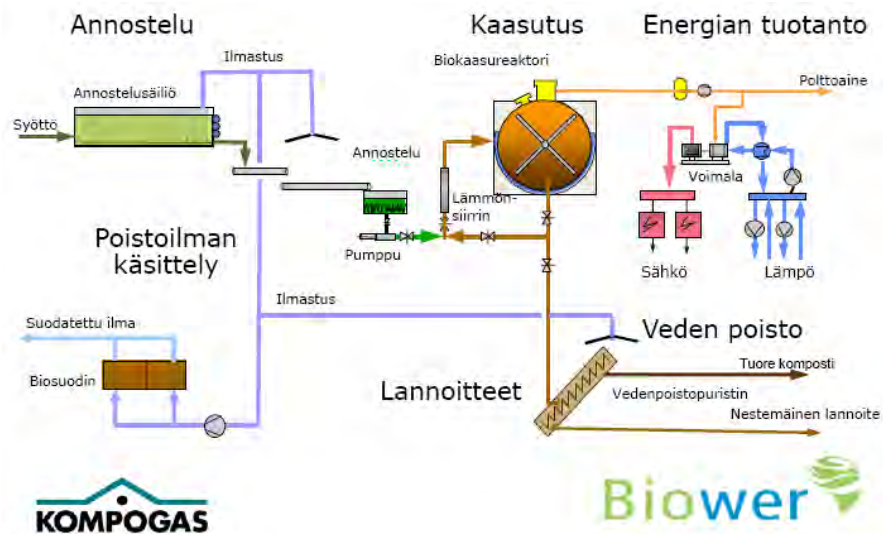
Biower

Biowerin toimittama biokaasujärjestelmä perustuu sveitsiläisen Kompogasin kuivamädätysteknologiaan. Reaktorissa (kuva 8) voidaan käsitellä maatalous-, puu-, puutarha-, keittiöjätettä sekä yhdyskuntajätteen orgaaninen osa. Mädätysprosessi toimii noin 15 vrk kestäväällä tulppavirtausperiaatteella, jolloin kaikki biojäte käy läpi koko mädätyksen 55 °C lämpötilassa. Tuon ajan kuluessa materiaali hygienisoituu ja rikkaruohon siemenet menettävät tutkimusten mukaan itävyytensä. Kompogasin prosessin toimintaa on esitetty kuvassa 9. Kompogas reaktori tuottaa 100 –

130 m³ biokaasua / tonni biojätettä. Laitoksen energiankulutus on pieni, noin 10 – 15 % omasta energiantuotannosta.



Kuva 8. Kompogas (Biower 2009).



Kuva 9. Kompogas prosessin toiminta (Biower 2009).

Biowerin toimittamat laitokset ovat kohtalaisen isoja, noin 20 000 t/a kapasiteetiltaan. Laitoksen suurella kokoluokalla on saavutettu paras kannattavuus. Saksassa on tehty maataloilille myös pienempiä reaktoreita ja Biower on mukana edullisemmän reaktorin suunnittelussa. (Aellig, 2011).

Hinnan arvioiminen vaatisi toimijalta paikalla käyntiä sekä tarkemmat paikkakohtaiset tiedot.

FLINGA Biogas AB

FLINGA Biogas AB toimittaa kuivamädätykseen tarkoitettuja reaktoreita (kaksivaiheinen reaktori), jonka hinta kahdella säiliöllä on noin 150 000 €. Säiliöiden koko on 60 – 320 m³. Tuottamastaan biokaasusta laitos kuluttaa omaan käyttöön 2 – 10 % lämpönä. Sähköä laitos kuluttaa vähemmän kuin 2 kW.

FLINGA Biogas AB:n kuivamädätysreaktorissa tai oikeammin kaksi-faasimädätysreaktorissa metaaninmuodostaja on pystytankki, jossa HRT on kuusi tuntia mesofiilisella lämpötila-alueella. HRT on säädettävissä kahdesta 18 tuntiin riippuen huuhtoutumisnopeudesta sekä ylläpidetystä lämpötilasta. Substraattisäiliöissä huuhtouma suodatetaan mädätettävän materiaalin läpi, valutetaan säiliöstä ja johdetaan metaaninmuodostajalle. Täältä se palautetaan substraattisäiliöön takaisin ja näin saadaan suljettu systeemi aikaiseksi. Substraattisäiliöiden sisältöä mädätetään 8 – 45 vuorokautta eräkohtaisesti riippuen mädätettävästä raaka-aineesta.

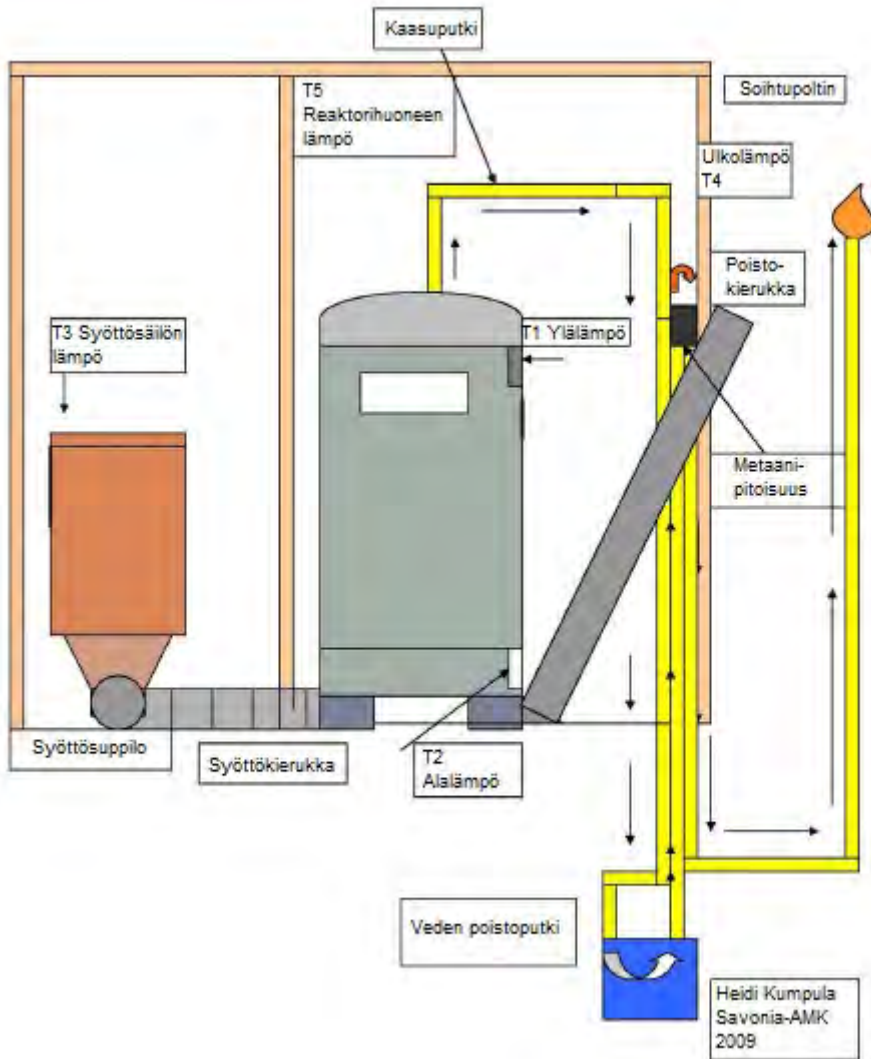
MetaEnergia Oy

MetaEnergian toimesta on Heikki Junttilan tilalle Nivalassa valmistettu biokaasureaktori. (Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 12). MetaEnergian toimesta on lisäksi rakennettu maatilamittakaavan biokaasulaitos ja jälkimädätysalla Haapajärven ammattiopisto koulutilalle vuonna 2007. (Suomen biokaasurekisteri n:o 13). MetaEnergia on aloittanut koeajot kuivamädätysreaktorilla, mutta tuloksia ei vielä käytettävissä.

MTT Sotkamon tutkimuslaitos

Sotkamon toimipaikalle on rakennettu tutkimusmittakaavan kuivamädätyslaitteisto, joka on laboratoriomittakaavaa suurempi, mutta selvästi tilamittakaavaa pienempi. Rakennettu 4,5 m³ pystyasentoinen sylinteri reaktori on puolijatkuvatoiminen ja täyssekoitteinen. Nestetilavuus on 3 m³. Koetoiminta on aloitettu elokuussa 2008. Reaktoriin massa on syötetty sekä se on poistettu ruuvikuljettimella ja sisältöä on sekoitettu telakuljettimella.

Reaktori (kuva 10) on sijoitettu puolilämpimään tilaan, jossa lämpötila on pidetty nollan yläpuolella syöttösuppiloa lukuun ottamatta, joka on kylmässä tilassa. Reaktoria ja syöttösuppiloa lämmitetään pakkasnesteellä. Aluksi lämmitys on hoidettu vedellä, joka myöhemmin on vaihdettu. Reaktorin syötteenä on käytetty lihanautatilan kuivikelantaa, johon on imeytetty myös virtsa. Tilalla on käytetty kuivikkeena turvetta, olkea ja/tai ruokohelpeä (Virkkunen et al, 2010).



Kuva 10. Syöttösuppilo, reaktori ja soihtupoltin. (Virkkunen et al., 2010) Korhonen, E. (2010) mukaan mittasuhteet kuvassa poikkeavat hieman todellisista. Esimerkiksi reaktorin ja soihtun välinen etäisyys on todellisuudessa kuvassa esitettyä pidempi. Samoin ylälämpö on mitattu kuvaan merkittyä alemmaa.

Ytterenebyn tila, Järnassa Ruotsissa

Tilalle on rakennettu biokaasulaitos, joka on suunniteltu käsittelemään 65 eläinpaikkaisesta navetasta saatavaa kuivalantaa, olkea, kaura-akanoita sekä läheisen elintarvikeyrityksen orgaanista jätettä. Biokaasulaitos on uudenlainen kaksivaiheinen jatkuvatoiminen tilatason biokaasulaitos, jossa kuivalanta siirretään hydraulisella raapalla hydrolyysireaktorin syöttökanaavaan, josta se puristetaan hydrolyysireaktorin yläosaan. Reaktorin tehollinen tilavuus on 53 m³ ja se on vinossa 30° kulmassa, jolloin tuore materiaali sekoittuu reaktorissa olevaan materiaaliin painovoiman avulla. Materiaalin viipymäaika 38 °C reaktorissa on 22 – 25 päivää, jonka jälkeen se poistetaan reaktorin alaosasta laatikon avulla. Kuljetinruuvista pudonnut materiaali ohjautuu puristimeen, jossa erotetaan toisistaan kiinteä ja nestemäinen jae, joka kerätään ja pumpataan 17 m³ metaanireaktoriin.

Biokaasulaitoksen reaktorit on valmistettu COR-TEN-terässylinteristä, jota on aikaisemmin käytetty savupiippuna. Terässylinterin seinän paksuus on 10 mm ja sisähalkaisija 2,85 m. Tämä on päällystetty 20 cm paksulla selluvillaeristeellä sekä poimulevyllä.

Biokaasulaitoksessa saavutettu suurin hyötysuhde oli noin 49 %, keskimääräisen hyötysuhteen ollessa 24 % tuotetusta energiasta. Kokonaislämmön kulutus biokaasureaktorissa oli 206 kWh/d ja sähköenergian kulutus 32 kWh/d. Enimmillään 56 % tuotetusta energiasta jäi tilalla olevan kartanon lämmittämiseen (Schäfer et al., 2006).

Tämä Järnassa toimiva kaksivaiheinen biokaasulaitos on koettu toimivaksi ratkaisuksi maatilan ja läheisen elintarvikeyrityksen orgaanisen jätteen käsittelyyn. Uusia teknisiä ratkaisuja on kuitenkin vielä tarpeen miettiä orgaanisen materiaalin korkean kuiva-ainepitoisuuden vuoksi sekä prosessin optimoimiseksi. Reaktorissa käytetty lannan syöttö- ja poistotekniikka ei ole paras mahdollinen suurille olkimäärille eikä viherjätteelle. Lisäksi tilalla tarvittaisiin parempaa mittaustekniikkaa hydraulisen viipymääjan ja kuormituksen optimoimiseksi (Schäfer et al., 2006).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuivamädätys nousee aiheena esiin lähes päivittäin niin uutisissa kuin yleisissä keskusteluissakin vaihtoehtona jo olemassa oleville mädätysvaihtoehtoille. Sen mahdollisia etuja on vaikea kiistää ja menetelmä vaikuttaa kokeilemisen arvoiselta. Saatavilla olevat tulokset poikkeavat kuitenkin toisistaan ja erilaiset ongelmat mm. raaka-aineen sekoituksen yhteydessä ovat hidastaneet kuivamädätysprosessien suosion nousua.

Kuivamädätysprosessin testaus tulisi suorittaa olemassa olevilla raaka-aineilla pienessä mittakaavassa, jolloin optimaalisia raaka-aineyhdistelmiä voitaisiin kokeilla sekä laitteistoa suunnitella tarkemmin.

Optimaalinen lämpötila kuivamädätysreaktorille tulee hakea kokeilujen kautta. Termofiilinen lämpötila tuottaa biokaasua nopeammin, mutta tulee miettiä onko reaktorin lämmittämisessä menetetty energia tätä hyötyä suurempi. Aikaisemmin on kuitenkin havaittu termofiilisten mikrobin selviävän myös reaktoreissa, joiden lämpötila on optimaalinen mesofiilille mikrobeille (Lepistö ja Rintala 1995) ja mahdollisesti sama voi toimia myös toisin päin (Angelidaki et al., 2006).

LÄHTEET

- Aellig, J., **2011**. Biower. Tiedonanto sähköpostitse 11.11.2011.
- Ahonen, S., **2010**, Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu – esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta. Pro Gradu, Ympäristötiede ja – teknologia, Bio- ja ympäristötieteiden tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Alakangas, E., **2000**, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Tiedotteita 2045, VTT.
- Angelidaki, I., Chen, X., Cui, J., Kaparaju, P., & Ellegaard, L., **2006**, Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactor, *Water Research*, **40**, 2621-2628.
- Anonyymi, **2005**. Lantatilastot. Viljavuuspalvelu Oy.
- Bekon, **2011**. Bekon DCF Brochure in English. Viitattu 7.11.2011.
- Biower, **2009**. Puhdasta energiaa ja vettä. Viitattu 4.11.2011. http://www.biower.com/esitteet/Biower_esittely_4_2009_Fin.pdf
- Demirer, G. ja Chen S., **2008**, Anaerobic biogasification of undiluted dairy manure in leaching bed reactors, *Waste Management*, **28**, 112-119.
- Erkkilä, Kostilainen, **2011**, Tarkastelu BIO-Studio tutkimuskentän laajentamiseksi, Pyhäjoen ja Kaljoen valuma-alueiden vedenlaatuun ja vesiluontoon vaikuttavia tekijöitä sekä tutkimustarpeet, Oulun Eteläisen instituutti.
- FLINGA Biogas AB, Sähköinen tiedonanto 2.11.2011, Fredrik Lundberg fredrik.lundberg@flinga-biogas.se

-
- Heiskanen, H. ja Leppälä, H., **2011**, BioE – Liiketoimintasuunnitelma, 12.10.2011.
- Korhonen, M., Elina, **2010**, Biokaasutuotanto naudan kuivikelannasta, Pro gradu, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Ympäristötiede ja –teknologia, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Kuokkanen, P., **2010**, Kananlannan ominaisuudet mädätyksen ja polton kannalta, Kandidatkielma, Teknillinen tiedekunta, Ympäristötieteiden koulutusohjelma, Lappeenrannan Teknillinen yliopisto.
- Latvala, M., **2009**, Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristö 24.
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=106756&lan=fi>
- Lehtomäki, A. ja Rintala, J., **2006**. Biokaasun mahdollisuudet ja tuotannon potentiaali Suomen maataloudessa. PTT-katsaus 2/2006, s. 29-35.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S., Lehtinen, T. & Rintala, J., **2008**. Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processor for methane production. *Bioresource Technology*, **99**, 3267 – 3278.
- Lehtomäki, A., **2006**, Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues, Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 163, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Leinonen, Simo, **1998**, Biokaasun tuotanto maatalousjätteistä, Biokaasuseminaari, Innopoli, Espoo, 21.1.1998.
- Malinen, Steve, **2011**. Haapajärven ammattiopisto, suullinen tiedonanto 18.10.2011
- Metener Oy, **2009**. Ruokohelven biokaasutuskokeet. Loppuraportti 4.11.2009. Viitattu 19.10.2011.
<http://www.oulunkaari.com/tiedostot/Uusiutuvaenergia/raportit/Metenerin%20ruokohelpikoe.pdf>
- Moller, H., Sommer, S. & Ahring, B. **2004**, Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, **26**, 485 – 495.
- Rico, J., Garcíá, H., Rico, C & Tejero, I, **2007**. Characterisation of solid and liquid fractions of dairy manure with regard to their component distribution and methane production. *Bioresource Technology*, **98**, 971-989.
- Saariniemi, Ammattiopisto Lappia, tiedonanto sähköpostin välityksellä 16.11.2011.

- Saariniemi, Ammattiopisto Lappia, Muut uusiutuvat energialähteet bioenergiaohjelmassa. Energia-alan kehittämisen viitekehys Lapissa. Viitattu 10.11.2011. http://www.lapinbiotie.fi/static/content_files/Saariniemi_Muut_uusiutuvat_energiälähteet_bioenergiaohjelmassa.pdf
- Saariniemi, WABIO- biokaasuesitteen mukaiset metaanintuottopotentiaalit eri raaka-ainevaihtoehdoilla.
- Sakar, S., Yetilmesoy, K. & Kocak E., 2009. Biogas production technology in poultry and livestock waste treatment – aliterature review. *Waste Management & Research*, **27**, 3 -18.
- Schäfer, W. ja Lehto, M. MTT, Koetoiminta ja käytäntö, 62. Vuosikerta, Liite 21.3.2005.
- Schäfer, W., Evers, L., Lehto, M., Sorvali, S., Teye, F. & Granstedt., A, Maataloustieteen Päivät 2006, Kuivalannan kaksivaiheinen jatkuvatoiminen mädätys maatilalla: Reaktorin rakenne sekä aine-, ravinne- ja energiataseet.
- Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 12. Tiedot vuodelta 2008. http://joy-pub.joensuu.fi/publications/other_publications/kuittinen_biokaasulaitosrekisteri12/kuittinen.pdf
- Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 13. Tiedot vuodelta 2009. <http://www.biokaasuyhdistys.net/images/stories/pdf/biokaasulaitosrekisteri13.pdf>
- Turpeinen Jarkko, 2010. Selvitys mädätetyn biojätteen kompostoinnista. Insinööriyö 26.5.2010. Kemiantekniikka. Metropolia ammattikorkeakoulu, Helsinki.
- Virkkunen, E., Jaakola, M. ja Korhonen E., Kuivamädätysbiokaasureaktorin toiminnan käynnistys, Maataloustieteenpäivät 2010.
- Virtuaalikyliä, Opetusmaatilat, Viitattu 14.11.2011. http://www.virtuaali.info/opetusmaatilat/index.php?tila_id=15&ohjemappi&kategoria_id=156&kortti=634

TOIMIPAikkojen YHTEYSTIEDOT

Ammattiopisto Lappia, Loue

Louen toimipaikka

Kätkävaarantie 69
95340 Loue
Puh. 010 383 4465

Koulutusjohtaja, Jarmo Saariniemi
jarmo.saariniemi@lappia.fi
010 383 4469

Bekon

BEKON Energy Technologies GmbH
& Co. KG
Feringastraße 9
D-85774 Unterföhring
Phone: (+49) 089/ 90 77 959-0
Fax: (+49) 089/ 90 77 959-29
contact@bekon.eu

Biower

Tuotepäällikkö, biokaasutuotteet
Jussi Aellig
Puh. 040 485 9430
jussi.aellig@biower.com

FLINGA Biogas AB

Fredrik Lundberg
fredrik.lundberg@flinga-biogas.se
044-2533520

FLINGA Biogas AB
Postadress:
Box 28 29821 Tollarp
Besöksadress:
Polgatan 8 29832 Tollarp

Nätadress:

info@flinga-biogas.se
www.flinga-biogas.se

MetaEnergia Oy

Pekka Vinkki, koordinaattori
pekka.vinkki@metaenergia.fi

MTT Sotkamon tutkimuslaitos

MTT Sotkamo, Kipinäntie 16, 88600
Sotkamo
Elina Virkkunen
elina.virkkunen@mtt.fi

Ytterenebyn tila, Järnassa Ruotsissa

Bionynamic Research Institute,
Skilleby gård, S-15391, Järna
sbfi@jdb.se