

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

# **BIOHIILEN TEKEMINEN JÄTEMATERIAALISTA MAANPARANNUSKÄYTTÖÖN**

**Biochar production from waste  
materials for soil improvement use**

Työn tarkastaja:           Professori, TkT Mika Horttanainen  
Työn ohjaaja:             Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen  
Oviedossa 22.11.2011  
Tuomas Strand

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO .....	2
1 JOHDANTO .....	3
1.1 Työn tavoitteet .....	4
2 BIOHIILEN RAAKA-AINEET JA NIIDEN OMINAISUUDET .....	5
3 BIOHIILEN VALMISTUS .....	8
3.1 Jätteeltä vaadittavat ominaisuudet.....	9
3.2 Valmistusprosessit.....	10
3.2.1 Hidas pyrolyysi .....	11
3.2.2 Nopea pyrolyysi .....	13
3.2.3 Muut menetelmät .....	15
3.2.4 Kokeissa käytettyjä menetelmiä .....	18
4 BIOHIILEN OMINAISUUDET JA RAKENNE .....	20
5 BIOHIILEN KÄYTTÖ .....	22
5.1 Vaikutus maaperässä.....	23
5.2 Käyttömenetelmät .....	26
5.3 Energiakäyttö .....	27
5.4 Kustannukset .....	28
5.5 Biohiilen käyttö maailmalla .....	29
6 BIOHIILI JÄTEMATERIAALEISTA MAANPARANNUSKÄYTTÖÖN .....	30
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	32

## LÄHDELUETTELO

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

RDC	Refuse-derived char, yhdyskuntajätteestä pyrolyysikäsitellyllä saatava hiiltynyt aines.
MSW	Municipal solid waste, yhdyskuntajäte.
ASR	Automobile shredder residue, automurskaamojäte, joka jää jäljelle kun kierrätettävät, myrkylliset ja magneettiset jakeet on poistettu.
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
kJ	Kilojoule, tuhat joulea. Työn ja energian yksikkö.
HTC	Hydrothermal carbonization, nestepyrolyysi.

# 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos ja hiilidioksidin määrä ilmakehässä ovat ongelmia, joiden taltuttamiseksi vaaditaan tehokkaita keinoja. Fossiilisten polttoaineiden käyttö maailmalla ei ennen korvaavien energianlähteiden yleistymistä, tai öljyn loppumista, todennäköisesti tule vähenemään, joten keinot vähentää hiilidioksidipäästöjä ovat tarpeen.

Maapallon ekosysteemin luontainen hiilikierto toimii fotosynteesillä. Kasvit yhteyttävät auringon säteilyenergialla vedestä ja ilmakehän hiilidioksidista happea ja glukoosia kasvuaan varten ja kun kasvi aikanaan kuolee, vapauttaa se sitomansa hiilen maaperään orgaaniseksi hiileksi. Tätä kautta maaperään päätynyt hiili ei kuitenkaan jää maaperään, vaan päätyy takaisin ilmakehään luontaisten hajoamisprosessien kautta. Se pitää saada vakaampaan muotoon jos sen haluaa pysyvän maaperässä, toimien *hiilinieluna*.

Biohiili on runsaasti hiiltä sisältävää orgaanista alkuperää olevaan palamisjäännöstä, jonka erottaa muusta hiilestä sen aiottu käyttötarkoitus maanparannusaineena. Sitä saadaan pyrolyysin kautta, kuumentamalla hapettomassa tilassa. Käsiteltävänä materiaalina voi toimia niin puu, kasvijäte, lanta, tiivistetty liete kuin autonrenkaatkin. Biohiili on hyvin vakaa muoto, joka säilyy jopa tuhansia vuosia hajoamatta maaperässä ja jo Amazonin intiaanit 450 eaa. paransivat viljelysmaitaan kaivamalla hiiltä maaperään. Biohiilet maaperässä muun muassa parantavat vedenpidätyskykyä ja sitovat metalleja itseensä (Beesley et al.2010).

Aikana, jona sekä tuotetun jätteen määrä että vapaan hiilidioksidin määrä ilmakehässä kasvavat jatkuvasti, on pyrolyysi mahdollinen ratkaisu jota ei ole varaa ohittaa. Se voi parhaimmillaan tarjota keinon käsitellä jätteitä ympäristöystävällisesti samalla energiaa tuottaen, ja megaluokkaan korotettuna se on käypä keino välttää orgaanisen jätteen hajoamisessa syntyvän hiilidioksidin vapautuminen ilmakehään ja sitoa se takaisin maahan stabiilissa muodossa jopa tuhansiksi vuosiksi.

Mahdollisista vaikutuksen suuruusluokista kertoo muun muassa Lehmann et al. 2006 tutkimus, jonka mukaan biomassan pyrolyysikäsitteilyllä Yhdysvalloissa voitaisiin sitoa maaperään 10 % vuotuisen fossiilisten polttoaineiden päästöjen hiilidioksidiekvivalentista. Tämä toteutettaisiin niin, että öljy- ja kaasukomponentit otettaisiin talteen biopolttoaineiden valmistusta varten, ja biohiili käytettäisiin maanparannukseen.

## **1.1 Työn tavoitteet**

Tämän työn tavoitteena on perehtyä biohiilen valmistuksen raaka-aineelle asettamiin vaatimuksiin, eri valmistusmenetelmiin, kustannuksiin verrattuna muihin jätteenkäsittelymenetelmiin sekä lopulta sen vaikutuksiin maaperässä maanparannusaineena.

Tähän selvitykseen ei kuulu kokeellista osaa, vaan se suoritetaan kokonaisuudessaan kirjallisuuden pohjalta, Ympäristötekniikan kandidaatintutkinnon opinnäytetyönä. Biohiilen valmistuksen raaka-aineista pyritään keskittymään jätemateriaaleihin.

## 2 BIOHIILEN RAAKA-AINEET JA NIIDEN OMINAISUUDET

Pyrolyysillä valmistetun biohiilen ominaisuudet, ja sitä kautta käyttömahdollisuudet riippuvat aineista, joista hiili on valmistettu. Tässä työssä keskitytään jätteistä valmistettavaan biohiileen. Materiaaleina voivat olla lähes mitkä tahansa hiiltä sisältävät jättemateriaalit, alkaen kotitalouksien biojakeesta ja päättyen automurskaamon silppurijätteeseen. Hwang et al. (2007) tutkivat lukuisista eri jätteistä prolyysillä valmistetun hiilen eroavaisuuksia ja ominaisuuksia. Tutkittavina jättejakeina olivat:

- kotitalouksien palavat jätteet (erikseen niin että yhdestä poistettu ruokajätteet, toisesta muovit, kolmannessa kaikki tallella)
- kookkaat jätteet (jaettuna lisäksi vielä palaviin ja palamattomiin jakeisiin)
- rakennus- ja purkujätteet (jaettuna ensin jakeeseen joka sisältää lähinnä puuta, ja lisäksi eri lajittelulaitoksesta tullessiin palavan ja palamattoman jätteen jakeisiin)
- automurskaamojätteet (kierrätysmetallit poistettuna)
- lietteet (orgaaninen liete jonka kiintoainepitoisuutta nostettu kahvipavun kuorilla, -kuivatettu vedenpuhdistamon liete ja kuivatettu paperitehtaan liete)

Yhdyskuntajätteen (MSW, Municipal solid waste) koostumus vaihtelee useiden eri muuttujien mukaan. Näitä muuttujia ovat muun muassa maat ja kaupungit, joissa jäte syntyy, vuodenajat, sekä sosiaaliset ja ekonomiset (ja ekologiset) asenteet. Kuitenkin selvityksen mukaan 12 Euroopan maan yhdyskuntajätteet jakautuvat keskimäärin seuraavasti: orgaanista materiaalia (33–42 %), paperia ja pahvia (24–28 %), lasia (8-9 %), metalleja (4-5 %), tekstiilejä (3 %) ja muita (15 %) (Hwang et al. 2007). Edelleen tyypillinen yhdyskuntajäte koostuu:

- 65 % selluloosa- tai ligniiniperäisestä materiaalista (paperi, pahvi, puu, luonnonkuidut tekstiileissä, ruoan tähteet, pihajätteet, muut)
- 20 % epäorgaaninen materiaali (keramiikka, metallit, lasi, tuhka, maa-aines, kivenkappaleet)

- 15 % polymeeripohjaiset materiaalit (polyetyleni PE, polypropeeni PP, polystyreeni PS, polyvinyylikloridi PVC, polyetyleeniteraftalaatti PET), sekä kumi, nahka ja synteettiset tekstiilit. (Fonteyne 1995.)

Demirbas (2001) on tutkinut eri biomassoista muodostuvia hiiliä ja niiden ominaisuuksia. Tutkimuksessa käsitellään eri kuorista, puuhakkeista ja maissintähkistä muodostuvaa biohiiltä, lähinnä siinä valossa, että koska puusta saadaan suuret määrät hiiltä, niin mahdollisesti myös muut korkean ligniinipitoisuuden omaavat jakeet voivat olla potentiaalisesti hyviä biohiilen raaka-aineita. (Demirbas 2001.)

McGhee et al. (1995) tarkastelivat tutkimuksissaan yhdyskuntajätteen ominaisuuksia sillä oletuksella, että koska kotitalousjäte koostuu aiemmin mainituissa suhteissa selluloosa- ja ligniinijohdannaisesta materiaalista sekä polymeeripohjaisista materiaaleista, niiden käyttäytymistä pyrolyysissä voidaan ennakoida oljen ja PVC:n yhteispyrolyysin kautta. Kokeissa käytettiin tanskalaista mäntyä, olkea sekä PVC:tä. Lisäksi mukana oli kaupunkialueen yhdyskuntajätettä Bykeristä Englannista sekä maaseudulta Isle of Wightistä Englannista. Taulukko 1 esittää eri jakeiden proximate-analyysin tulokset, ensin siinä tilassa kuin ne vastaanotettiin, seuraavaksi kuivana ja viimeiseksi kuivana ja tuhkattomana. (McGhee et al. 1995.)

Taulukko 1. Jättemateriaalin proximate-analyysi (McGhee et al. 1995).

Proximate analysis (wt%)				
Sample	Moisture	Ash	Volatile	Fixed carbon
<b>As-received</b>				
Wood	8	1	71	20
Straw	6	4	78	12
IOW MW	3	10	73	14
Byker MW	9	14	67	10
PVC	0	0	90	10
<b>Dry</b>				
Wood	–	1	77	22
Straw	–	4	83	13
IOW MW	–	10	75	15
Byker MW	–	15	73	12
<b>Dry, ash free</b>				
Wood	–	–	78	22
Straw	–	–	86	14
IOW MW	–	–	83	17
Byker MW	–	–	85	15

Pyrolyysin tuotoksena saadun tuhkan määrät ja reaktiivisuudet on esitetty taulukossa 2. Tuloksista nähdään, että yhdyskuntajakeiden biohiilituotot ovat melko korkeita, jopa suurempia kuin männyn biohiilituotto. On kuitenkin otettava huomioon taulukossa 1 esitetty korkeahko tuhkan määrä, jonka perusteella Bykerin näytteen biohiilessä tuhkan osuus on 46 %, ja Isle of Wightin biohiilessä 33 %. Tutkimuksessa havaittiin myös PVC:n ja oljen kesken yhteisvaikutus, joka lisäsi hiilen saantoa. (McGhee et al. 1995.)



Taulukko 2. Jakeista hitaalla pyrolyysillä saatu biohiilimäärä ja sen reaktiivisuus (McGhee et al. 1995).

### Char yields and reactivities

Material	Char yield (wt%)	Reactivity at 390 K ( $10^{-4} \text{ g gs}^{-1}$ )
Straw	24	6.70
Danish pinewood	24	5.50
PVC	10	~0.01
50/50 Straw-PVC	25	1.80
90/10 Straw-PVC	30	3.30
Byker MW	30	1.20 (2.3 <sup>a</sup> )
IOW MW	28	2.30 (3.5 <sup>a</sup> )

<sup>a</sup> Reactivity corrected for presence of ash

## 3 BIOHIILEN VALMISTUS

Biohiilen valmistusmenetelmä on pyrolyysi. Kehitysmaissa on jo pitkään käytetty ruoan valmistukseen puusta valmistettua hiiltä, sillä se on kevyempää kuin puu ja sitä kautta helpompaa kuljettaa käyttöpaikalle, eikä se poltettaessa muodosta palokaasuja niin paljoa kuin puun polttaminen avoliekillä. Myös vanha keksintö on kaivaa hiili maahan rikastamaan maata ja parantamaan satoja.

Perinteisesti hiilen valmistus on tapahtunut maauneissa, puoliympyrän mallisissa keoissa, jotka on vuorattu mudalla ja tiilillä. Näihin uuneihin panostetaan biomassa, joka sytytetään ensin palamaan alkulämmön aikaansaamiseksi. Esimerkki miilusta kuvassa 1. Tämän jälkeen palotilan hapensaantia aletaan säännöstellä niin, että tuloksena on hapeton, kuuma uuni, jossa heikommät sidokset hajoavat ja hiilen osuus jäljelle jäävässä aineessa kasvaa. Tällä menetelmällä valmistetaan vielä tänäkin päivänä suuria määriä hiiltä kehitysmaissa, usein hyvin huonolla hyötysuhteella. Alkeellisimmat versiot koostuvat vain tiuhaan pakatuista kasoista oksia ja lehtiä, joiden annetaan hiiltyä valvomatta pitkiäkin aikoja.



Kuva 1. Miilu (ristijärvi.fi).

Moderni pyrolyysitekniikka koostuu kolmesta yleisestä menetelmästä: hitaasta pyrolyysistä, nopeasta pyrolyysistä ja kaasutuksesta. Näistä erityisesti hidas pyrolyysi soveltuu kiinteän biohiilen valmistukseen muita prosesseja huomattavasti suuremman biohiilisaantonsa vuoksi. Lisäksi on kokeellisempia menetelmiä, kuten mikroaaltopyrolyysi ja nestepyrolyysi, joiden teollinen käyttö on vasta aluillaan, mutta lupaukset ovat suuria.

### 3.1 Jätteeltä vaadittavat ominaisuudet

Pyrolyysissä käytettävä korkea lämpötila neutraloi orgaaniset toksiinit (mm. alfatoksiini) ja patogeenit, joten niiden mahdollinen läsnäolo syötettävässä materiaalissa (esimerkiksi liete) ei vaikuta sen soveltuvuuteen. Koska prosessi on hapeton ja tapahtuu matalassa lämpötilassa, ei myöskään supermyrkkijä kuten dioksiinia juurikaan synny (Granatstein et al. 2009, De Gryze et al. 2010). Sen sijaan tuhka sekä epäorgaaniset ainesosat vaikuttavat saantoon erityisesti nestekomponentin osalta (bioöljy), ja yhdyskuntajätteen (erityisesti

liete) osalta mahdolliset raskasmetallit päätyvät biohiilijakeeseen pyrolyysissä (Hossain et al. 2010). Hiilen määrä on oleellinen prosessin kannattavuudelle.

Nestepyrolyysiprosessia lukuunottamatta tärkeä tekijä pyrolysoinnin kannalta on syötettävän materiaalin riittävä kuivuus. Hitaan pyrolyysin prosesseille taloudellisesti järkevä kosteuspitoisuus vaihtelee alle 15 % aina jopa 70 %, nopea pyrolyysi vaatii selkeästi kuivemman syötteen, noin 10 % vettä syötteessä kuivatuksen jälkeen. (Laird et al. 2009.)

### **3.2 Valmistusprosessit**

Biohiilen valmistus on, kuten jo edellä mainittiin, vanha keksintö. Erilaisilla maauneilla saadaan puusta ja muusta hiilipitoisesta biomassasta valmistettua hiiltä, tosin huonolla syötetyn materiaalin ja tuotetun materiaalin välisellä suhteella (saannolla).

Kun tarkastellaan yhdyskuntajätteitä, niiden palamisominaisuudet ovat usein huomattavasti heikommät kuin puun, joten ne saattavat vaatia erillisen energianlähteen hiiltymisen aikaansaamiseksi. Myös jätteitä kuumennettaessa syntyvät kaasut voivat olla jätteestä riippuen hyvinkin haitallisia, ja siksi ne pitää käsitellä ennen vapauttamista. Moderneissa laitoksissa nämä kaasut kerätään talteen, ja niiden energiasisältö voidaan käyttää hyväksi prosessin vaatiman lämmön tuottamiseen. Näin alkuperäisen energiainvestoinnin jälkeen prosessista tulee usein energiaomavarainen, riippuen lähinnä syötettävän materiaalin kuivauksen vaatimasta energiamäärästä.

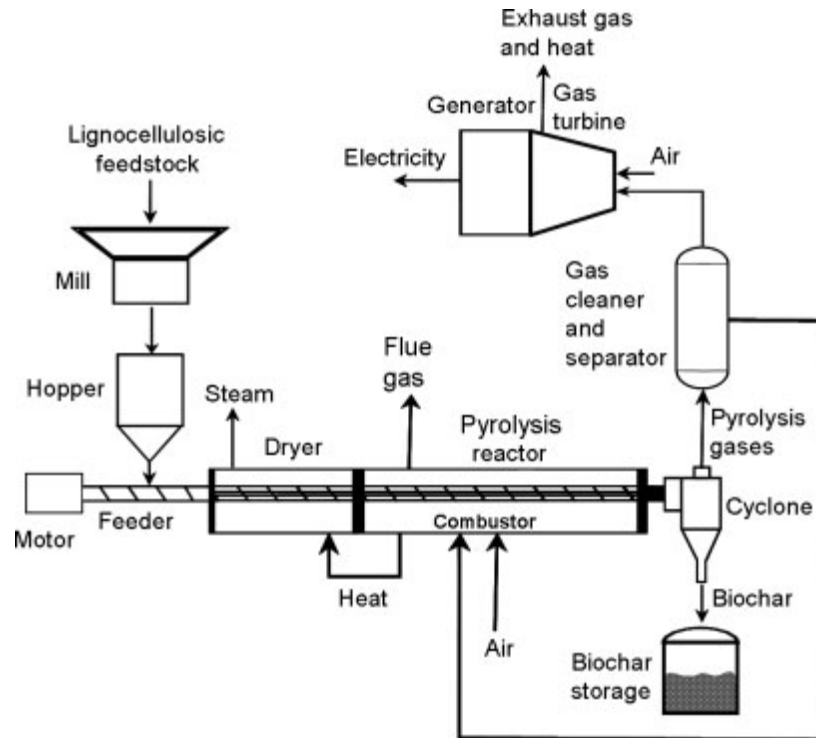
Yhdyskuntajätteen käsittely biohiileksi on vaativaa sen raaka-aineen monimuotoisuuden takia, sillä eri aineet vaativat eri pyrolyysilämpötiloja ja vaikutusaikoja. Useimpien puumateriaalien hajoaminen alkaa lämpötilassa 200 °C, kun taas muoveista polyetyleni PE vaatii 230 °C ja polypropeeni 260 °C. Liika tai liian vähäinen kuumennus heikentävät sekä saantoa, että erityisesti bio-öljyn kohdalla laatua. (Vassilev et al. 1999.)

### 3.2.1 Hidas pyrolyysi

Hitaan pyrolyysin laitteistot ovat joko perinteisiä panostettavia miiluja tai modernimpia jatkuvatoimisia laitteistoja. Hitaassa pyrolyysissä biomassan lämpötila nostetaan hitaasti noin 400 °C hapettomissa olosuhteissa, kunnes hajoaminen on valmis. Lopputuotteen tyypillinen jakauma puumateriaalilla on noin 35 % biohiiltä, 30 % bioöljyä ja 35 % synteetikaasua. Hidas pyrolyysi kestää laitoksessa minuuteista jopa muutamiin tunteihin, riippuen sekä palakoosta että lämmityksestä. Palakoon suhteen hidas pyrolyysi perinteisellä menetelmällä ei ole kriittinen, kuten ei myöskään syötettävän materiaalin kosteuden suhteen, kuitenkin jatkuvatoimiset laitokset asettavat biomassan palakoolle ja kosteudelle tiettyjä rajoja (palakoko jauheesta muutamiin sentteihin, kosteus alle 15 % jopa 70 % asti). Usein lämpötilaa saatetaan nostaa nopeudella 0.01 °C/s – 2 °C/s. (Laird et al. 2009.)

Hitaasta pyrolyysistä saatava nestekomponentti on energia-arvoltaan matalaa, eikä sitä ole järkevää jalostaa polttoaineeksi. Siksi se useimmiten poltetaan synteetikaasun kanssa prosessin lämpötarpeita sekä mahdollisesti energiantuottoa varten, tai joskus vain käsitellään vaarattommaksi polttamalla soihdussa.

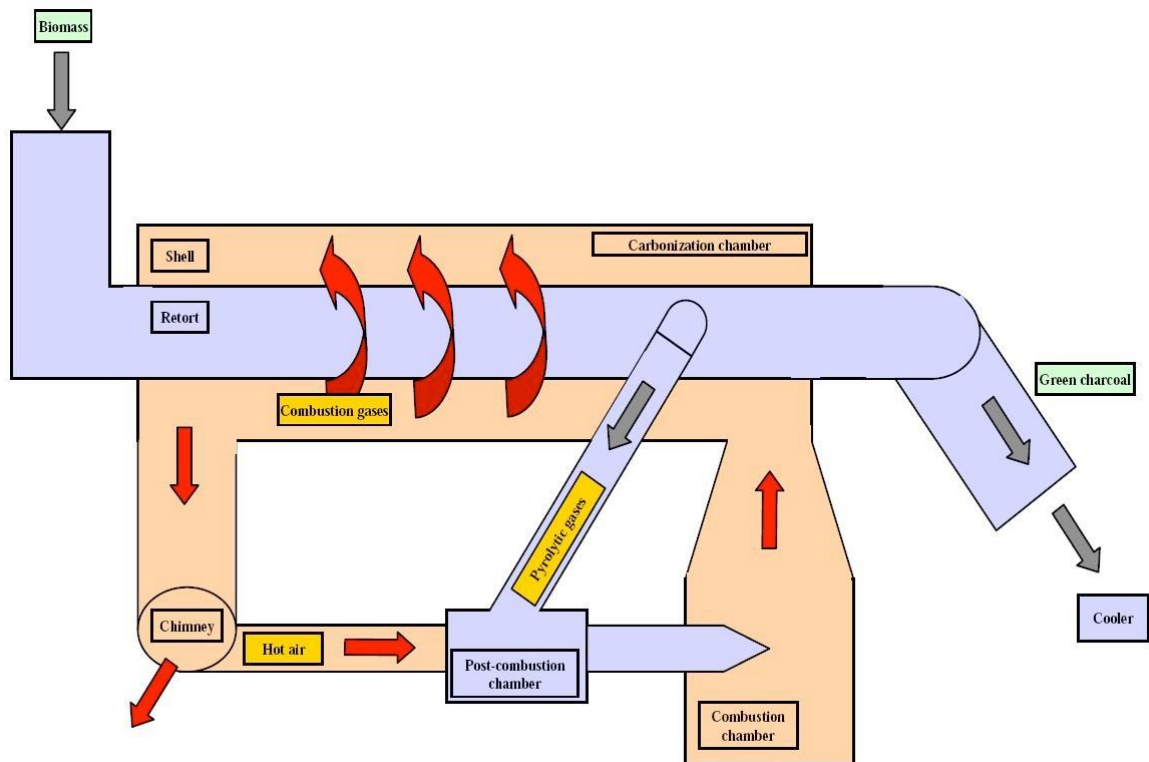
Kuvassa 2 esitellään yksi mahdollinen laitoskokoanpano, josta saataisiin lopputuotteena biohiiltä, sähköä ja lämpöä. Kyseisessä laitoksessa biomassa kulkee kuivauksen jälkeen ruuvikuljettimella reaktorin läpi jatkuvana virtana. Reaktorin jälkeen kiinteä biohiili erotetaan syklonin avulla synteetikaasusta ja höyrynä olevasta bio-öljystä keräysastiaan. Kaasut poltetaan puhdistuksen jälkeen turbiinissa, jolla tuotetaan sähköä. Pyrolyysikaasuista osa ohjataan polttimeen, jolla lämmitetään epäsuorasti reaktoria, jolloin ulkoista energiaa ei tarvita prosessin käynnistämisen jälkeen. (Laird et al. 2009.)



Kuva 2. Kaira-tyyppinen hitaan pyrolyysin laitos (Laird et al. 2009).

Kaupallista hitaan pyrolyysin laitteistoa valmistaa muun muassa Ranskalainen Green Charcoal International. Yritys myy Pyro-6F jatkuvatoimista hitaan pyrolyysin laitteistoon (Kuva 3) noin 250 000 euron hintaan, ja niitä on käytössä useita kappaleita muun muassa Senegalissa. Niiden lopputuotteen aiottu käyttötarkoitus on lähinnä (briketöitynä) polttoaineena ruoanvalmistuksessa. Senegalissa laitosta rahoitetaan muun muassa Air Francen asiakkailleen tarjoaman hiilidioksidikompensointiohjelman avulla. (Green Charcoal International.)

Pyro-6F koostuu putkimaisesta retortista, jota ympäröi teräksestä ja tiilistä rakennettu ulkokuori. Ulkokuoren ja retortin välissä on ilmanava, johon palokaasut ohjataan polttokammioista, josta ne luovutettuaan lämpönsä retortille kulkevat edelleen lämmöntalteenoton kautta savupiippuun, ja päästetään ulos. Talteenotettu lämpö käytetään sisääntulevan ilman kuumentamiseen ennen vientiä jälkipolttokammioon, jossa se sekoitetaan pyrolyysikaasuihin ennen johdatusta polttokammioon. Retortin sisällä biomassaa kuljettaa eteenpäin ruuvikuljetin. Syötettävän materiaalin on oltava palakooltaan alle  $5 \text{ cm}^2$  ja kosteudeltaan alle 10-15 %. Prosessi on alkulämmityksen jälkeen energiaomavarainen, poislukien retortin ruuvikuljettimien sähköntarve. (Green Charcoal International.)



Kuva 3. Pyro-6F jatkuvatoiminen hitaan pyrolyysin laitos (Green Charcoal International).

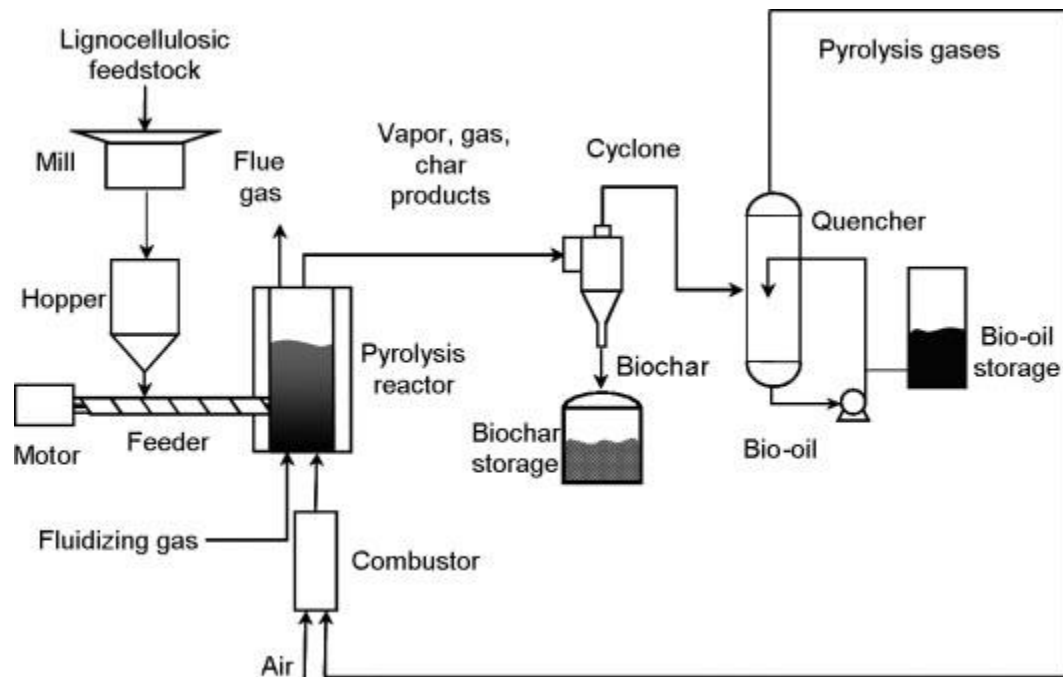
### 3.2.2 Nopea pyrolyysi

Nopea pyrolyysi ja sen eri muodot ovat sekä teknisesti kehittyneempiä että myös vaativampia kuin hitaan pyrolyysin menetelmät. Sen tärkein tuotos on nestekomponentti, bio-öljy, jonka saanto voi olla 50-70 % (jopa 80 %). Nopealla pyrolyysillä biohiilen osuus vaihtelee 10-30 % välillä, ja synteesikaasun 15-20 %. Nopean pyrolyysin perustoiminta on biomassan lämmitys yli 400-500 °C lämpötilaan alle sekunnissa, hapettomassa tilassa. Tämä voidaan toteuttaa erilaisilla menetelmillä, joista yleisimmät ovat leijukerroskattiloita joko kuplivalla tai kiertävällä pedillä.

Syötettävä materiaali on palakooltaan pientä, joskin tarkka koko riippuu ennen kaikkea käytetystä reaktorityypistä, vaihdellen kiertävän kartioreaktorin jopa alle 200 mikrometristä alle 2 millimetriin leijukerrosreaktoreissa ja 6 millimetriin kiertävissä leijukerrosreaktoreissa. Kuivatus ennen syöttöä on tarpeellinen, sillä reaktoriin menevä vesi päätyy pyrolyysiöljyyn. Yleisesti noin 10 % syötteen painosta voi olla vettä reaktoriin

mennessä kuivatuksen jälkeen. Kuivatukseen on helppo käyttää toissijaista prosessihukkalämpöä savukaasuista tai synteetikaasun poltosta. (Bridgewater & Peacocke, 2000.)

Kuvassa 4 esitetyn kaltaisessa laitoksessa kuivattu ja hienoksi jauhettu syöttömateriaali ohjataan leijukerrosreaktoriin, jossa se yhdistyy kuumaan hiekkavirtaan. Kuumeneminen 400-500 °C:en tapahtuu jopa alle sekunnissa, jonka jälkeen höyry, kaasu ja hiilituotteet ohjataan syklonierotukseen, jossa erotetaan kiinteä biohiili. Erotuksen jälkeen kaasut jäähdytetään nopeasti hajoamisen pysäyttämiseksi, jolloin saadaan lopputuotteeksi tummanruskeaa bio-öljyä. Lauhdutuksen jälkeen kaasut poltetaan lämmöntuottamiseksi prosessia varten. (Laird et al. 2009.)



Kuva 4. Nopean pyrolyysin laitos (Laird et al. 2009).

Tämäntyyppisessä nopean pyrolyysin laitoksessa ongelmaksi voi muodostua kiinteän hiilen pääsy syklonin läpi bio-öljyyn, jossa se katalyyttisesti jatkaa öljyn hajottamista heikentäen sen laatua ja säilyvyyttä. Mahdollisia keinoja erottaa hienojakoinen hiili ja tuhka höyryistä on kuumahöyrysuodatus, tai suodatus vasta lauhdutuksen jälkeen esimerkiksi panos- tai kiertosuodattimella. Ongelmia aiheuttaa kuumahöyrysuodatuksessa höyryvaiheen pidentyminen, ja nesteestä suodatuksessa pyrolyyttisen ligniinin geelimäinen koostumus, joka nopeasti tukkii perinteiset suodattimet. (Bridgewater & Peacocke, 2000.)

Aika höyrymuodostuksen ja lauhdituksen välissä on kriittinen muodostuvan bio-öljyn laadulle. Krakkautuminen jatkuu nopeana aina 350 °C saakka, ja toisasteisena jossain määrin vielä huoneenlämpöisenäkin. Polttoainetuotantoa varten höyryfaasi saa kestää vain noin 2 sekuntia, tätä pidemmistä ajoista seuraa saannon huomattava lasku.(Bridgewater & Peacocke, 2000.)

Lauhdutus on myös ongelmallista, koska leijukerrosreaktoreista höyrystyvä aines on osin aerosolimuodossa eikä todellisena höyrynä. Koska höyrynpaine on matala, muodostuu ongelmaksi alhainen höyryn/aerosolien konsentraatio. Lauhdutus jäädytetyn nesteen avulla on tehokas keino, joka kuitenkin vaatii tarkkaa suunnittelua ja lämpötilanhallintaa. Myös elektrostaattinen saostus on hyväksi havaittu keino. (Bridgewater & Peacocke, 2000.)

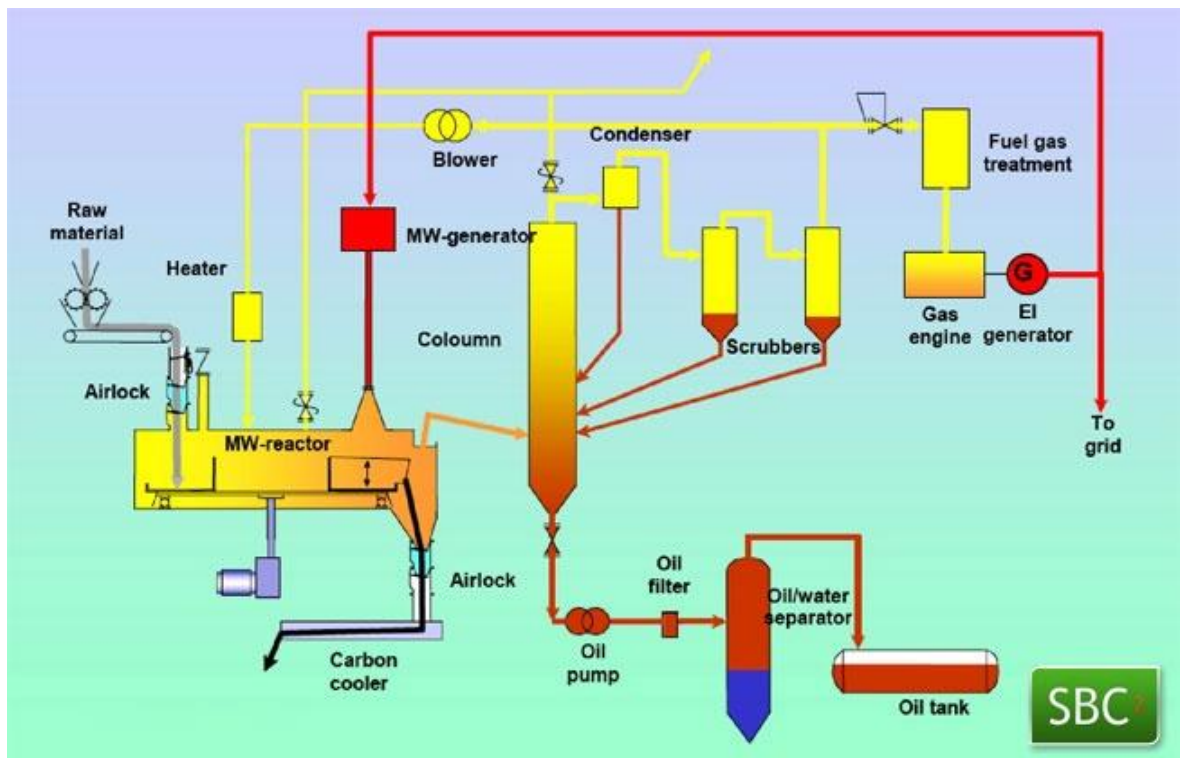
### **3.2.3 Muut menetelmät**

Hapen määrän ohella yksi pyrolyysin tärkeimmistä edellytyksistä on lämmönhallinta prosessissa, sillä hajoamisen on oltava tasaista hyvälaatuisen lopputuotteen ja saannon varmistamiseksi. Yksi keino jakaa lämpö tasaisesti eri materiaalista koostuvaan syöttöaineeseen on mikroaaltosäteily. Mikroaaltosäteilyn avulla vältytään raskaalta esikäsitteilyltä, sillä kappaleiden lämmönsiirto-ominaisuuksilla eikä palakoolla ole niin suurta merkitystä. Erityisesti orgaaninen aines on huonoa siirtämään lämpöä, ja sen takia muilla pyrolyysimenetelmillä palakoon onkin oltava hyvin pientä. Mikroaaltopyrolyysiä voidaan myös säätää hyvin joustavasti juuri halutun lopputuotekoostumuksen aikaansaamiseksi. CarbonScape on valmistanut koelaitteiston, jossa mikroaaltogeneraattorin jäädytysveden hukkalämpö käytetään syötettävän materiaalin esikuivatukseen, parantaen jo muutenkin hyvää prosessin energiataloutta. (CarbonScape)

Kuvassa 6 on esitetty Scandinavian Biofuelin mikroaaltopyrolyysiprosessi. Syöttömateriaali tuodaan prosessiin inertillä kaasulla täytettyjen ilmalukkojen kautta, jotta happea ei pääse mukana. Seuraavaksi sitä kuumennetaan reaktoritilassa



mikroaaltosäteilyllä lämpötilaan, jossa haihtuvat ainesosat irtoavat kiinteästä materiaalista. Syntynyt hiili poistetaan reaktorista ilmalukon kautta jäädytykseen, ja haihtuva osa johdetaan lauhduttimeen, josta öljy kerätään suodattimen ja vedenerottimen jälkeen säiliöön. Kaasufraktio poltetaan puhdistuksen jälkeen suoraan moottorissa, joka pyörittää generaattoria. Prosessi tuottaa kaiken tarvitsemansa sähkötehon itse käynnistyksen jälkeen. (Scandinavian Biofuel.)



Kuva 6. Scandinavian Biofuelin mikroaaltopyrolyysiprosessi (Scandinavian Biofuel).

Taulukossa 3 on Scandinavian Biofuelin suunniteltuja prosessituottoja eri syötemateriaaleilla.

Taulukko 3. Suunniteltuja prosessituottoja mikroaaltopyrolyysillä (Scandinavian Biofuel).

Feedstock	Rice straw	Bagasse	Coconut	Plastic	Car tires
Capacity/yr	27 778 tons	28 409 tons	25 000 tons	25 000 tons	25 000 tons
Water content	20 %	20 %	15 %	5 %	1 %
Net capacity/yr	25 000 tons	25 000 tons	25 000 tons	25 000 tons	20 000 tons
Output Oil	13 250 tons	16 250 tons	17 500 tons	12 500 tons	5 600 tons
Output Gas	3 500 tons	3 250 tons	3 250 tons	10 000 tons	3 000 tons
Output Carbon	8 250 tons	5 500 tons	4 250 tons	1 240 tons	11 000 tons
Electricity output	32,4 GWh	39 GWh	38,5 GWh	103,4 GWh	44,5 GWh
Electricity use	3,79 GWh	3,79 GWh	3,79 GWh	3,79 GWh	4,57 GWh
Electricity sales	28,66 GWh	35,17 GWh	34,74 GWh	99,65 GWh	39,89 GWh

Esitetyt prosessit ovat vain suunnitelmia, valmiita laitoksia ei vielä ole. Filippiineillä Scandinavian Biofuel on aloittanut projektin kookosviljelijöiden kanssa mikroaaltopyrolyysilaitoksen rakentamiseksi ja Norjassa EU-rahoitteisen projektin hakkuujätteen pyrolysoimiseksi.

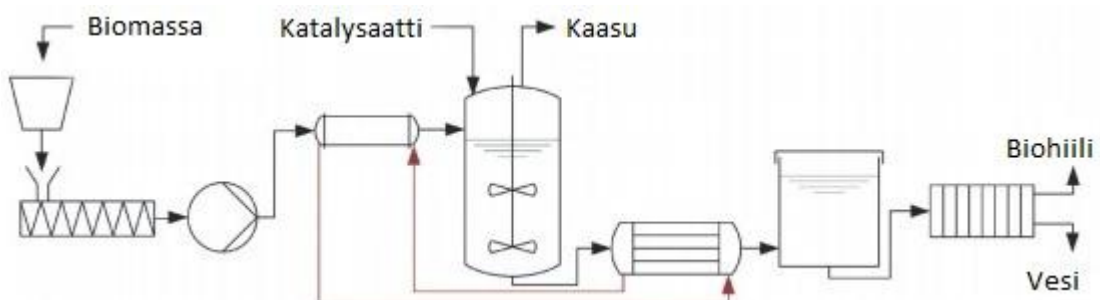
Erityisen mielenkiintoinen menetelmä kiinteän biohiilen saannon maksimointiin on nestepyrolyysi (hydrothermal carbonization, HTC). Nestepyrolyysin avulla voidaan saada jopa 80 % saanto kiinteää hiiltä. HTC-prosessissa pyrolysoitava aine on happamaan nesteeseen upotettuna paineastiassa. Nesteen lämpötila nostetaan 180-250 °C antaen samalla paineen kasvaa noin 20 bar saakka, jossa hajoaminen tapahtuu. Lopputuotteena saadaan vain hyvin vähän kaasua, ja nestekomponenttiakin 5-20 %. Nestepyrolyysin suurin etu on sen kyky käsitellä kosteita syöttömateriaaleja suoraan, ilman aikaa vievää ja energiaa tuhlaavaa kuivatusvaihetta. (Libra et al. 2011.)

Mahdollisia syöttömateriaaleja, jotka ovat muille pyrolyysimenetelmille liian kosteita käsittelemättä ovat muun muassa vedenpuhdistamon lietteet, eläinten märkä lanta, kotitalouksien biojätteet, ihmisten ulosteet sekä erilaiset levät ja vesikasvit. Lämpötila riittää tuhoamaan jätteistä taudinaiheuttajat, jolloin jätteen käsittely helpottuu ja nopeutuu huomattavasti, samalla kun prosessista saadaan kaupallisesti ja ympäristöllisesti arvokasta biohiiltä. Energiataloudellista jätteen käsittelyä kuivilla pyrolyysimenetelmillä on arvioiden mukaan kosteuden ollessa 50-70 % ja alle, kun taas nestepyrolyysillä syöttömateriaalin kosteus on usein 75-90 % tai enemmänkin. (Libra et al. 2011.)

Vaikeuksia HTC-prosessille aiheuttaa jatkuvatoimisuusvaatimus, sillä syötettävä materiaali pitää kuljettaa painetta vasten reaktoriin. Lisäksi lopputuote on prosessista poistuessaan märkää, ja se pitää käyttötarkoituksesta riippuen kuivata. Reaktorissa oleva vesi pitää myös puhdistaa ennen poistoa. Kuvissa 7 ja 8 esitellään Saksalaisen TerraNova Energyn HTC-prosessi. Kyseinen prosessi on toteutettu jo pilottilaitoksena Saksassa, ja sitä syötetään vedenpuhdistuslaitoksen lietteellä (TerraNova Energy). (Libra et al. 2011.)



Kuva 7. TerraNova Energyn HTC-prosessi (TerraNova Energy).

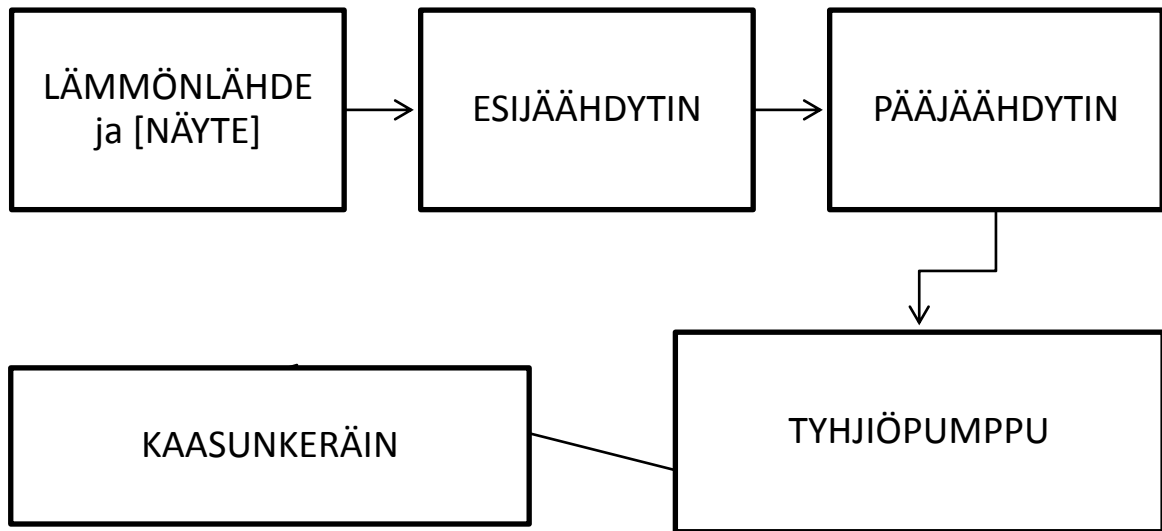


Kuva 8. TerraNova Energyn HTC-prosessikaavio (TerraNova Energy).

### 3.2.4 Kokeissa käytettyjä menetelmiä

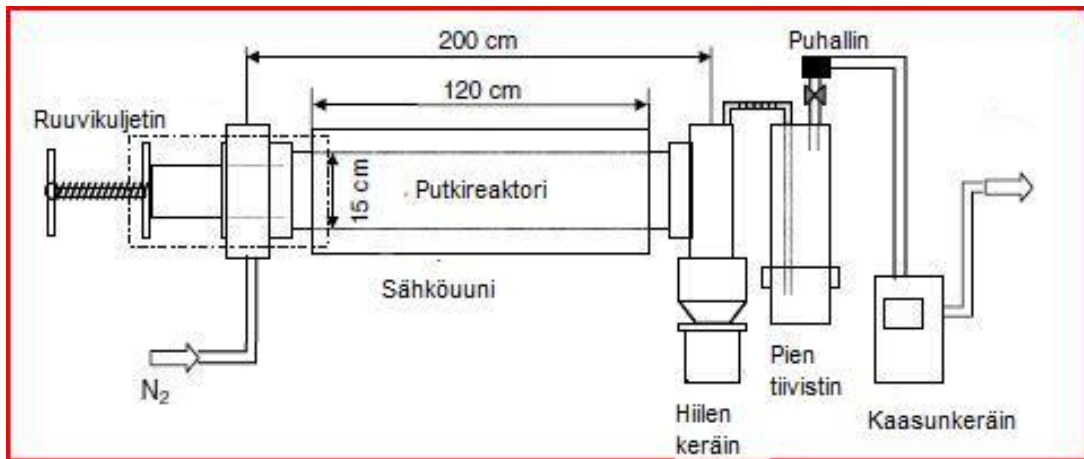
Demirbas (2000) käytti kokeissaan pyrolyysiä biomassaan eri lämpötiloissa. Laitteistona oli kuvan 9 mukainen järjestely, jossa lämmönlähteenä toimi sähköuuni. Laitteisto toimi niin, että astiaan suljettu näyte yhdistettiin tyhjiöpumppuun, jolla ilma poistettiin säiliöstä. Tämän jälkeen näyte siirrettiin uuniin, jossa sitä kuumennettiin nopeudella 10 K/s,

lämpötiloihin 550, 650, 750, 850, 950, 1050 ja 1150 K. Kolmen minuutin välein astiasta poistettiin kertyneet kaasut lämmönvaihtimien läpi pumpun kautta erilliseen kaasusäiliöön. (Demirbas 2011.)



Kuva 9. Sähköuunilla lämmitettävä tyhjiöpyrolyysilaitteisto (Demirbas 2011).

Hwang et al. (2007) käyttivät omissa jätteiden pyrolyysianalyseissään kiertävää uunityyppiä, johon syötettiin materiaa jatkuvasti ruuvikuljettimen avulla. Itse uunin lämpötila oli 500 °C, ja viipymä uunissa 1 tunti. Kuvassa 10 esitellään kiertävään uuniin perustuva hiillostusprosessi. Lämmönsiirron tehostamiseksi uunissa kiersi typpikaasua nopeudella 11 l/min, ja uunin kiertonopeus oli 1-2 1/min, jolla saavutettiin asetettu tunnin tavoiteaika viipymälle uunissa. (Hwang et al. 2007.)



Kuva 10. Pyörivään tulipesään perustuva kokeellinen prosessi (Hwang et al. 2007).

Varsinkin jättemateriaaleista valmistettu hiili sisältää raaka-aineen koostumuksesta riippuen suuriakin määriä raskasmetalleja ja klooria, tuhkaa se sisältää aina. Tuhka saadaan poistettua hienontamalla ja seulomalla. Kloori voidaan poistaa hiilestä pesemällä hiili tislattulla vedellä niin että 10 hiiligramman pesuun käytetään 100 ml vettä usealla pesukerralla. (Hwang et al. 2007.)

#### 4 BIOHIILEN OMINAISUUDET JA RAKENNE



Kuva 11. Hitaalla pyrolyysillä valmistettua biohiiltä (earthandindustry.com).

Biohiilen tarkat ominaisuudet sekä koostumus riippuvat sekä valmistusmenetelmästä että raaka-aineesta. Yhteisiä tärkeitä ominaisuuksia kaikille biohiilille ovat kuitenkin suuri aktiivinen pinta-ala, vakaa koostumus sekä yli seitsemän oleva pH. Se kykenee pidättämään vettä maakerroksessa tehokkaasti, eikä hajoa biologisten prosessien kautta pitkälläkään aikavälillä tietyissä muodoissaan.

Itse biohiilen ulkonäkö riippuu suuresti sekä valmistusprosessin vaatimasta hienonnuksesta (raekoko santeista mikrometreihin) että raaka-aineesta, ja erityisesti yhdyskuntajätteestä valmistettu biohiili on erittäin heterogeenistä koostumukseltaan, sisältäen kiteitä, rakeita, hiukkasia, kasaumia sekä aggregaatteja. Se on hyvin huokoista, erityisesti biomassosta peräisin olevana, sillä alkuperäiset biologiset rakenteet (mm. kasvien ohuet tiehyet) säilyvät, kun haihtuvat osat ovat poistuneet aineesta. Mesohuokoisista biohiilistä puhutaan, kun huokosten koko on luokkaa 2-50 nm, ja muun muassa HTC-menetelmällä on mitattu kyseisiä huokoskokoja. (Lehmann et al. 2009, Titirici et al. 2007.)

Yleisiä arvoja yhdyskuntajätteestä valmistetulle biohiilelle on: 53-57 % orgaanisia ainesosia, 39-45 % epäorgaanisia ainesosia ja 3 % nesteitä paino-osuuksina mitattuna. Näistä epäorgaaninen aines jakautuu mineraaliainekseen 19-22 % ja amorfiseen epäorgaaniseen aineeseen 20-23 %. Hiilen mineraaliosuudet laskevassa määräjärjestyksessä ovat: silikaatit> karbonaatit> oksihydroksidit> sulfaatit> kloridit> fosfaatit> alkuaineet. Amorfinen epäorgaaninen aines on yhdyskuntajätteessä lähes yksinomaan lasia. Nestekomponentti on bio-öljyä (tervaa), joka olisi parasta erottaa mahdollisimmat tehokkaasti kiintoaineesta, jotta vältetään polysyklisen aromaattisten hiilivetyjen (PAH) muodostuminen. Pyrolyysilämpötilan pitäminen alle 750 °C ehkäisee tehokkaasti PAH:ien muodostumista. (Bridgewater & Peacocke 2000, De Gryze et al. 2010).

Taulukossa 4 on esitetty yhdyskuntajätteestä valmistetun biohiilen koostumus proximate-analyysinä, ja taulukossa 5 kuivattuna ja tuhkattomana ultimate-analyysinä. Korkea tuhkan osuus selittyy ainakin osin jätteen vähäisellä esikäsitteilyllä. (Vassilev et al. 1999).

Taulukko 4. RDC:n proximate analyysi (Vassilev et al. 1999).

Vesi	3,4 %
Haihtuva aines	19,8 %
Kiinteä hiili	35,7 %
Tuhka	41,1 %

Taulukko 5. RDC:n ultimate analyysi (Vassilev et al. 1999).

C	80,2 %
H	1,7 %
N	2,0 %
O	15,9 %
S	0,2 %

## 5 BIOHIILEN KÄYTTÖ

Biohiiltä, kuten tavallista puu- ja kivihiiltäkin, voidaan haluttaessa käyttää polttoaineena. Polttoainekäytössä se kuitenkin vapauttaa sitomansa hiilen takaisin luonnon kiertoon, erityisesti ilmakehään, johon sitä ei haluta. Maahan kaivettuna sen sijaan hiili ei hajoa pitkässäkään ajassa, ja se on potentiaalisesti tehokas keino sitoa hiiltä ilmakehästä.

Sillä on myös lukuisia muita etuja maanparannuskäytössä, ja se onkin ollut maanparannuskäytössä vaihtelevissa määrin jo Etelä-Amerikan Amazonin intiaaneista vuodesta 450 eaa. alkaen. Kuvassa 12 nähdään ero kuivan rautapitoisen oxisol-maan, ja biohiilellä rikastetun maan välillä. Amazonin alueella maahan aikoinaan kaivettu hiili on luonut otollisen kasvualustan sienien ja mikrobien ravintokiertoon, jolloin humusta on alkanut kertyä maaperään tehden siitä hedelmällisen. Tätä *Terra pretaa*, eli mustaa maata paikalliset viljelijät etsivät ja kaivavat kuljettaakseen sitä omille pelloilleen arvokkaana lisäravinteena.



Kuva 12. Vasemmalla pitkäaikaisen hiilen lisäämisen muovaamaa ravinteikasta maata, oikealla kuivaa rautapitoista maata (carbon-negative.us).

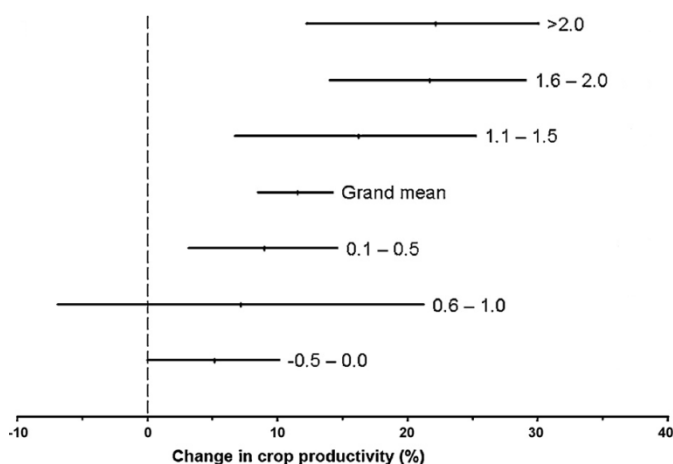
## 5.1 Vaikutus maaperässä

Useat tutkimukset vahvistavat, että biohiilen lisääminen maaperään kasvattaa satoja lisäämällä maaperän hedelmällisyyttä, mutta yksittäisen vaikutusmenetelmän määrittäminen on osoittautunut vaikeaksi. Eri kokeissa biohiiltä on lisätty maahan eri lähteistä muodostettuna, eri tavoin muodostettuna sekä eri esikäsitelymenetelmin. Havainnot kokeista vaihtelevat merkittävästi olosuhteiden ja muiden moninaisten syiden takia. Seuraavaksi esitettynä on havaitut selvät muutokset lukuisista eri kokeista kootun meta-analyysin pohjalta. Tutkimustulokset on kerätty ja niiden tuloksia on tarkasteltu tilastotieteellisesti niin, että muutos on merkittävä kun  $P \leq 0,05$  (P-arvo on pienin riskitaso, jolla nollahypoteesi tulee hylätyksi tällä otoksella. Nollahypoteesi kuvaa vallitsevaa tilannetta tai väittää ettei todellista vaikutusta, eroa tai muutosta ole.). (Jeffery et al. 2011.)

Maaperän vaikutus biohiilen tuomaan etuun on suuri. Biohiilet ovat emäksisiä, ja ehkä tämän takia parhaat sadon kasvut tapahtuivat happamissa ja neutraaleissa maaperissä, kuitenkin erittäin happamiin maaperiin lisäys ei tuonut merkittävää parannusta. Biohiilen



vaikutus oli havaittavissa, kun maaperän pH kasvoi enemmän kuin 1 yksikön verran. Kuvassa 13 on kuvattu maaperän happamuuden muutoksen vaikutusta satoon. Kuvasta nähdään että parhaimmillaan kokeissa on saavutettu jopa 30 % kasvua satoihin. (Jeffery et al. 2011.)



Kuva 13. Maaperän happamuuden muutoksen vaikutus satoon. Luvut palkkien päissä muutoksia maaperän pH:ssa, alhaalla muutos sadossa (Jeffery et al. 2011).

Maaperän laatu vaikuttaa myös biohiilen lisäyksen vaikutukseen. Tutkimusten mukaan suurimmat vaikutukset satoon ovat syntyneet kun maa-aines on karkeaa tai puolikarkeaa. Hienolla maa-aineksella merkittävää eroa ei ole syntynyt, myöskään negatiiviseen suuntaan. Syy tähän on todennäköisesti maaperän vedenpidätyskyvyssä, jota biohiilet huokoisen rakenteensa avulla parantavat. Hienojakoisessa maaperässä vedenpidätys on hyvää jo muutenkin, eikä merkittävää parannusta sen takia pääse syntymään. (Jeffery et al. 2011.)

Useissa tutkimuksissa on selvitetty lannoitteen sekä biohiilen keskinäistä vuorovaikutusta maaperään lisättyinä, ja sen vaikutusta satoon. Meta-analyysin tulokset osoittavat, että merkittävä kasvu sadossa syntyi, kun biohiiltä lisättiin yhdessä epäorgaanisen lannoitteen kanssa verrattuna pelkän epäorgaanisen lannoitteen käyttöön. Myös pelkän biohiilen lisäys kasvatti satoa merkittävästi verrattuna pelkän epäorgaanisen lannoitteen lisäykseen. Merkittäviä eroja ei syntynyt kun verrattiin biohiilen ja orgaanisen lannoitteen lisäystä pelkän orgaanisen lannoitteen lisäykseen, tai orgaanisen, epäorgaanisen ja biohiilen lisäykseen yhdessä. (Jeffery et al. 2011.)

Biohiilen valmistusmateriaalin vaikutus satoon on suuri. Merkittäviä parannuksia satoon saatiin biohiilillä, jotka on valmistettu puusta, paperista, kuitumassasta, puuhakkeesta sekä siipikarjan lannasta. Merkittävä negatiivinen vaikutus havaittiin käsitellystä lietteestä valmistetulla biohiilellä. Tässä kokeessa kuitenkin käytettiin kasvina rairuohoa, jota muissa kokeissa ei ole käytetty. Täten tutkimuksen pohjalta ei voi vetää johtopäätöksiä siitä, onko negatiivinen vaikutus biohiilen alkuperän syytä, vai ylipäänsä biohiilien ja rairuohon jokin keskinäinen negatiivinen vaikutus. Muilla tutkituilla syöttömateriaaleilla ei havaittu merkittävää parannusta ( $P < 0,05$ ), vaikkakin keskiarvot kokeissa olivat positiivisen vaikutuksen puolella. (Jeffery et al. 2011.)

Tutkimuksissa on havaittu nk. *priming effect* (Kuzyakova et al. 2000), jossa hiilen (tai typen tai fosforin vastaavasti) lisääminen aiheuttaa maaperän orgaanisen hiilen lisääntyneen hajoamisen. Sen vaikutus on nopea hiilen lisäyksen jälkeen, ja vahvin kun maaperässä on jo valmiiksi suuri määrä orgaanista hiiltä. Efekti myös vahvistuu lisätyn hiilen määrän kasvaessa. Steriileissä oloissa oikeaa *priming effectiä* ei kuitenkaan ole saatu toisinnettua, joka kertoo sen olevan maaperän mikrobien aikaansaamaa. Biohiilien lisäys maaperään saattaisi siis lisätä maaperän orgaanisen hiilen hajoamista, ja siten vähentää hyötyä paitsi kasveille, myös ehkäistä sen mahdollisen käytön laajamittaisena globaalina hiilinieluna. Kuitenkin aiheesta on vain vähän tutkittua tietoa, ja esimerkiksi *terra preta-*maidan tiedetään sisältävän sekä orgaanista hiiltä että hiiltynyttä materiaalia, mikä viittaisi siihen että lisääntynyt orgaanisen hiilen hajoaminen on vain lyhytaikainen vaikutus. (Verheijen et al. 2009, Kuzyakova et al. 2000.)

Huokoisen rakenteensa ansiosta biohiilet toimivat maaperässä sekä tehokkaina vedenpidättäjinä että hyvänä kasvualustana maaperän mikrobeille. Tämä on todennäköinen selitys sille, että biohiilellä rikastetuilla mailla on suurempi mikrobinen biomassan kuin rikastamattomilla mailla. Huokoinen rakenne ja suuri aktiivinen pinta-ala myös imevät orgaanisia saasteita (PAH, hyönteis- ja kasvimyrkyt) tehokkaasti, joskaan siitä, onko myrkkujen keskittyminen lopulta hyvä vai huono asia, ei ole vielä riittävästi tutkittua tietoa. Mustafa et al. (2010) tutkimuksissaan totesivat biohiilen metallien siirtyvän kasveihin vain hyvin mitättömissä määrissä. Lyhyellä aikavälillä myrkkujen

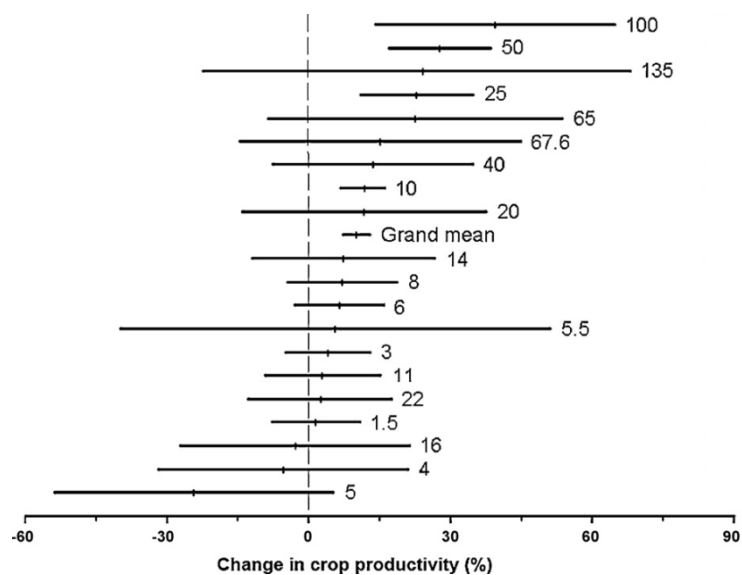
kiinnittyminen biohiileen vapaan liikkuvuuden sijaan on varmasti hyväksi. (Verheijen et al. 2009, Hossain et al. 2010, Beesley et al. 2010, Yu et al. 2009.)

## 5.2 Käyttömenetelmät

Biohiilen maanparannuskäytössä hiili lisätään suoraan maaperään. Useimmilla valmistusmenetelmillä tuotettuna se on hyvin hienojakoista, eikä lisäjauhatukseen ole syytä. Useimmissa kokeissa biohiili lisättiin maahan suoraan ilman esikäsitteilyä, ja maa ainoastaan kasteltiin lisäyksen jälkeen. (Hossain et al. 2010, Jeffery et al. 2011.)

*Organic GARDENER* käsitteli biohiiliä kotipuutarhurin maanparannuskeinona lehdessään syys-lokakuussa 2008. Lehti ohjeistaa biohiilen käyttöä seuraavasti: ”Kun hiilet on valmistettu, jäähdytetty ja hienonnettu, lisätään hienonnettuun hiilimassaan puolet hiekkaa ja puolet multaa, kaksinkertaistaen massan määrä. Mikäli kasvatetaan lehdekkäitä tai runsaasti typpeä vaativia kasveja, lisätään ravinnetta hieman. Lisätään vettä, kunnes seos muistuttaa paksua lietettä. Se voidaan käyttää joko pintamaana, tai kaivaa 20 cm syvyyteen, 5 cm paksuksi kerrokseksi, joka peitetään maalla.” Parhaat tulokset artikkelissa mainitaan saavutetun kun istutettavat siemenet asetetaan juuri hiilikerroksen päälle. Maissilla on saavutettu jopa kaksinkertainen sato kontrollikasveihin verraten. (Cundall, 2008.)

Jeffery et al. (2011) meta-analyysissään selvittivät eri tutkimusten tuloksia biohiilten lisäysmäärien suhteesta satoon. Tuloksista (kuva 14) käy ilmi, että lisäyksen määrällä on havaittava vaikutus satoon, mutta tilastollisesti merkittävää eroa eri lisäysmäärien välillä ei synny, kuten ei myöskään korrelaatiota lisäyksen ja sadon välille. Erot sadoissa todennäköisesti johtuivat laajalti muista syistä kuin vain lisätyn biohiilen määrästä. Kuitenkin parhaat tulokset on saatu lisäyksellä 100 t/ha, ja keskiarvo sadon paranemiselle kaikista kokeista oli 10 %. Kotimainen tutkimus peltokäytössä havaitsi, että jo 20 t/ha aiheuttaa sadon laskua rehevässä maaperässä, huonokuntoisessa se paransi satoa (Brandstaka et al. 2010). (Jeffery et al. 2011.)



Kuva 14. Biohiilen lisäysmäärän vaikutus satoon. Palkit kuvaavat 95 % luottamusvälejä, ja luvut palkkien päissä lisäysmäärää yksikkönä t/ha (Jeffery et al. 2011).

### 5.3 Energiakäyttö

Vaikka tämän työn tarkoituksena on perehtyä jätteistä valmistetun biohiilen maanparannuskäyttöön, voidaan energiakäyttöä tarkastella myös hieman. Hwang et al. (2008) tutkivat yhdyskuntajätteestä (MSW) sekä automurskaamojätteestä (ASR) valmistetun hiilen käsittelymenetelmiä polttoainekäyttöä varten. Tavoitearvoiksi käsitellyille hiilille asetettiin alle 30 % tuhkasisältö ja 20 000 kJ/kg lämpöarvo.

Jättemateriaalien polttoainekäyttöä haittaa niiden usein korkea kloorin ja tuhkan määrä, jotka poltettaessa aiheuttavat korroosiota, foulaantumista, kertymistä, kuonaamista, sintraantumista ja agglomeroitumista. Kloorin poiston on todettu onnistuvan pesemällä (Hwang et al. 2008), ja hiilen puhdistukseen on olemassa useita menetelmiä. Useimmat näistä perustuvat ominaispainoeroihin, ja toteutetaan kelluttamalla eri nesteissä. Tässä kokeessa hiilet ensin eroteltiin alle 5,6 mm paloihin (isommat hylättiin), jonka jälkeen nämä jauhettiin, ja taas eroteltiin alle 125 µm (isommat hylättiin). Tälle jakeelle suoritettiin kellutus-upotus-erottelu, vaahdotus sekä öljyagglomerointi. (Hwang et al. 2008.)

MSW-peräiselle jakeelle tavoitearvot saavutettiin sekä vaahdotuksella että öljyagglomeroinnilla, mutta ASR-jakeelle puhdistuskeinot eivät olleet riittäviä. Käsittelyn

jälkeen sen tuhkapitoisuus oli 55-67 %, ja lämpöarvo 8630-12 500 kJ/kg, eikä se siten täyttänyt kriteerien vaatimuksia energiahyötykäytölle. Polttokelpoista materiaali silti oli. (Hwang et al. 2008.)

## 5.4 Kustannukset

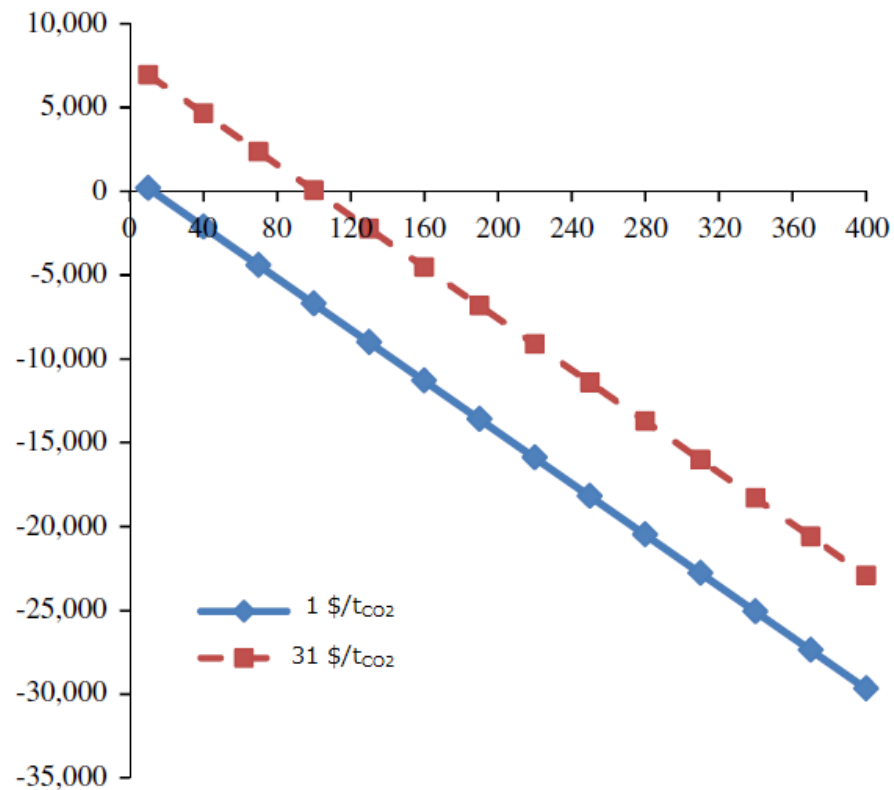
Biohiilen käyttöön liittyy useita huomioitavia seikkoja kustannusten suhteen. Galinato et al. (2011) tarkastelivat biohiilen käyttöön liittyviä kustannuksia ja hyötyjä. Tarkastelun aluksi tehtiin oletus, että lisäämällä biohiiltä happamaan maaperään saadaan viljeltävää satoa enemmän. Tutkimusten nojalla tämä on realistinen oletus happamalle maalle. Seuraavaksi arvioitiin vältetyt päästöt ja sidottu hiilidioksidi, kun biohiilellä korvataan kalkin käyttö. Tämän jälkeen laskettiin hiilidioksidikompensaation arvo olettaen että biohiilen maanparannuskäytölle on päästömarkkinat, käyttäen hintaväliä 1-31 dollaria/t CO<sub>2</sub>.

Esimerkin maatyypille tarvittava kalkin määrä vaihteli välillä 2,28-6,8 t/ha. Arvion mukaan tonni kalkkia maanparannusaineena vaatii valmistusvaiheessa 0,059 t hiiltä, eli 0,22 t CO<sub>2</sub>. Annetulla hintavaihtelulla päästön arvoksi tulee 0,22-6,28 dollaria/t kalkkia. Tämä saadaan vältettyä kun käytetään biohiiltä maanparannukseen. Arvioksi biohiilen hiilisisällölle käytettiin 80 % hiiltä, jolloin samalla hintavaihtelulla tonni biohiiltä on arvoltaan maaperään sitoutettuna päästökaupassa 2,93-90,83 dollaria/t biohiiltä.

Laskenta tapahtui kahdessa vaiheessa, ensin laskien vältettyjen päästöjen arvo ja sidotun hiilidioksidin määrä. Ne muodostavat päästömarkkinoilla myytävän osuuden. Seuraavaksi laskettiin arviot kasvaneen sadon aikaansaamalle tuoton kasvulle, erikseen kalkin lisäyksellä sekä biohiilen lisäyksellä. Viimeinen vertailun osanen on maanparannusaineen hankintahinta (osa arvoista ja laskennasta jätetty esittämättä luettavuuden parantamiseksi).

Laskennan lopputuloksena saatiin viljelyn kannalta kokonaiskustannuksiltaan kannattavaksi biohiilen hinnaksi jopa 100,73 dollaria/t, kun hiilidioksidipäästön hinta on 31 dollaria/t CO<sub>2</sub>. Arvioidun päästökauppahinnan alarajalla 1 dollaria/t CO<sub>2</sub> alin

kannattava biohiilen hinta oli 12,14 dollaria/t. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 15. (Galinato et al.2011.)



Kuva 15. Kalkin korvaamisen biohiilellä kannattavuus, kun hiilidioksiditonnin hinta päästökaupassa on 1 ja 31 dollaria tonnilta. Pystyakselilla tuotto, vaaka-akselilla biohiilen hinta. (Galinato et al. 2011.)

## 5.5 Biohiilen käyttö maailmalla

Bioenergylists.org listaa verkkosivuillaan Yhdysvaltalaisia sekä Kanadalaisia biohiilen valmistajia ja myyjiä, joita esitellään toistakymmentä. Useat listan valmistajat kuitenkin lähemmin tarkasteltuna eivät ole vielä aloittaneet toimintaansa, tai sitten myyvät tuotettaan vain pieniä määriä tutkimuskäyttöön. Sama sivusto listaa myös biohiilen valmistuslaitteiston myyjiä maailmalta, sekä eri projekteja biohiileen liittyen. (Bioenergylists.org)

Biohiilen käyttö viljelymaan parannusaineena ei ole yleistä, vaikka pienimuotoisempaa biomassan polttoa ja tuhkan ja hiilen levitystä pelloille onkin harrastettu pitkiä aikoja.

Vuonna 2006 tehdyn tutkimuksen mukaan maailmanlaajuisesti valmistetaan 0,05-0,3 Gt biohiiltä vuosittain (De Gryze et al. 2010).

Kasvava trendi on kotipuutarhurien biohiilen käyttö, ja edellä mainittu bioenergylists.org löytääkin muutamia puutarhamyymälöitä Yhdysvalloissa ja Kanadassa, joiden kautta biohiiltä voi ostaa omiin tarpeisiinsa. (Bioenergylists.org.)

Suomessa Preseco on suunnitellut ja rakentanut Lempäälään karbonisaattori-koelaitoksen, joka kykenee valmistamaan biohiiliä lukuisista eri syöttömateriaaleista. Presecon biohiiltä on käytetty tutkimuskäyttöön (Brandstaka et al. 2010), yksityisille myyntiä ei ole.

## **6 BIOHIILI JÄTEMATERIAALEISTA MAANPARANNUSKÄYTTÖÖN**

Houkuttelevin vaihtoehto biohiilten valmistusmateriaaliksi ovat jättemateriaalit, sillä pyrolyysi toimii samalla sekä jätteenkäsittelyvaiheena, energiantuotantona että maanparannusaineen tuotantona. Lisäksi hiiltä saadaan sidottua maahan kestävässä muodossa, auttaen taistelussa ilmastonlämpenemistä vastaan.

Valtaosa tutkimuksesta keskittyy viherjätteiden käsittelyyn pyrolyysillä, ja vain muutamat yhdyskuntajätteisiin ja muihin ihmisen aikaansaamiin jätteisiin. Hossain et al. (2010) tutkivat vedenpuhdistuslaitoksen lietteestä valmistetun biohiilen käyttöä maanparannusaineena. Lietteen käsittely pyrolyysillä on houkuttelevaa, sillä prosessin korkea lämpötila steriloi lietteen sisältämät patogeenit. Liete sisältää kuitenkin metalleja, jotka voivat kulkeutua maaperästä kasvien kautta ravintoketjuun. Tämän tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 6, ja niistä käy ilmi että kasveihin siirtyy metalleja maaperään lisätystä biohiilestä, mutta määrät ovat merkityksettömän pieniä, eivätkä siten estä lietteestä valmistetun biohiilen laajaakaan käyttöä maanparannusaineena. Lietteiden käsittelyyn vielä parempi keino perinteisen korkean lämpötilan hitaan pyrolyysin sijaan on nestepyrolyysi, jolloin märkää lietettä ei tarvitse erikseen kuivata ennen pyrolyysiä, ja käsittelystä tulee energiaa tuottava (Titirici et al. 2007). Myös HTC-pyrolyysin n. 200 °C riittää steriloimaan lietteen. (Hossain et al. 2010, Titirici et al. 2007.)

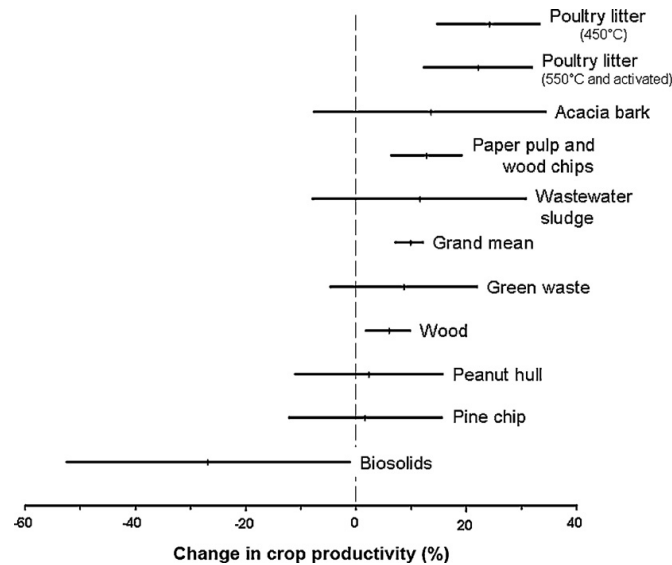
Taulukko 6. Lietteestä valmistetun biohiilen lisäyksen maaperään vaikutus kasvien metallimääriin. CP=kontrolli, SB=biohiilellä rikastettu, SBF=hiilellä sekä lannoitteella rikastettu, SF=lannoitteella rikastettu, BLD=alle mittauskyvyn. Oikealla Australian suurimmat sallitut pitoisuudet. Yksiköt mg/kg. (Hossain et al. 2010.)

Elements	Biochar	Treatments				Present Australian MPC <sup>a</sup>
		CP	SB	SBF	SF	
Arsenic	8.8	0.02	0.02	BDL	0.01	1.0
Cadmium	4.7	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05–2.0
Chromium	230	BDL	BDL	BDL	0.06	–
Copper	2100	5.9	6.2	4.6	6.2	10–70
Lead	160	BDL	BDL	BDL	BDL	1.5–2.5
Nickel	740	8.2	1.2	0.61	0.55	–
Selenium	7	BDL	BDL	BDL	BDL	1.0
Zinc	3300	18	22	18	22	150
Antimony	8	BDL	0.01	BDL	BDL	1.5
Boron	20	15	15	9.6	15	–
Silver	29	BDL	BDL	0.01	0.01	–
Barium	750	3.6	0.91	0.35	2.9	–
Beryllium	1	BDL	BDL	BDL	BDL	–
Cobalt	21	0.06	0.03	0.3	0.27	–
Tin	310	BDL	BDL	BDL	BDL	50
Strontium	390	5	3.1	2.6	4.6	–

Kuva 16 esittää eri tutkimuksista koostetut tulokset biohiilen alkuperän vaikutuksesta sadon lisäykseen. Hossain et al. (2010) havaitsivat omassa kokeessaan 20 % kasvun lietebiohiilellä verrattuna pelkän lannoitteen lisäämiseen. Parhaat tulokset on saatu siipikarjan lannasta valmistetulla biohiilellä, ja keskiarvo sadon kasvulle on tutkimuksessa 10 % (Jeffery et al. 2011).

Eniten tutkittua tietoa on puutarhajätteen ja muun viherjätteen käyttämisestä biohiilen raaka-aineena. Tätä viherjätettä syntyykin valtavia määriä jatkuvasti, eikä se maatuessaan sido hiiltä pitkäaikaisesti niin kuin biohiili. Ongelma näiden materiaalien kanssa on keruu, sillä kustannukset ylittävät arvioidut tuotot jo suhteellisen lyhyillä matkoilla (de Gryze et al.2010).





Kuva 16. Eri materiaaleista valmistetun biohiilen vaikutus satoon. Tulokset laskettu tilastotieteen keinoin eri tutkimuksista, kuvassa viivat ovat 95% luottamusvälin arvoja. (Jeffery et al. 2011.)

Yhdyskuntajäte biohiilen raaka-aineena on haastava sen monimuotoisuuden vuoksi, eikä sitä kannata käsitellä pyrolyysillä ennen kuin sitä on esikäsitelty erottaen erikseen kierrätettävät ja maanparannukseen sopimattomat aineet. Kuitenkin, suuri osa yhdyskuntajätteestä on orgaanista jätettä ja paperia/pahvia (n. 60 %), jonka on todettu muodostavan maanparannukseen hyvin sopivaa biohiiltä.

Van Zwieten et al. (2010) tutkivat paperitehtaan jätemassojen käsittelyä hitaan pyrolyysin keinoin, ja totesivat sen houkuttelevaksi keinoksi välttää kostean massan siirrosta ja loppusijoituksesta koituvat kustannukset. Biohiilen vaikutukset maaperään riippuivat maaperätyypistä, sillä kuten aiemmin on todettu, biohiilten positiivinen vaikutus tulee esiin vahvasti maaperän happamuuden muutoksen kautta. Happamissa maissa se nosti pH:ta ja lisäsi kationivaihtoa, parantaen sekä maan laatua että satoja. Tässäkin tapauksessa HTC-prosessi olisi epäilemättä ollut paremmin sopiva. (Van Zwieten et al. 2010.)

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Biohiiliä tarkasteltiin niiden maanparannusvaikutusten kautta, keskittyen erityisesti jätemateriaaleista valmistettuihin biohiiliin. Valmistuskeinoista hidas pyrolyysi sekä nestepyrolyysi ovat hyviä vaihtoehtoja kiinteän biohiilen valmistukseen, kaasutuksen ja

nopean pyrolyysin tuottaessa vain vähäisissä määrin kiinteää hiiltä. Parhaimmillaan nestepyrolyysi voi säilyttää lähes kaiken syötteen hiilestä biohiileen, ja se vaikuttaakin lupaavimmalta menetelmältä erityisesti kosteiden jätteiden käsittelyyn. Mikroaaltopyrolyysistä on vasta vähän tutkimuksia.

Eri materiaalista valmistettujen biohiilten ominaisuudet poikkeavat toisistaan, mutta kaikilla on positiivinen vaikutus kasvien satoihin oikeanlaisessa maaperässä. Parhaan tuloksen saavuttamiseksi maa, johon biohiiltä lisätään tulee olla hapanta tai neutraalia, sillä biohiilten happamuus on yleisesti yli seitsemän. Merkittävä vaikutus on myös maan hienojakoisuudella, sillä biohiilten huokoinen rakenne ja suuri pinta-ala auttavat karkeiden ja keski-karkeiden maalaatujen vedenpidätyksessä. Emäksisyyden lisääminen (kalkkeamisvaikutus) ja vedenpidätys ovatkin biohiilten merkittävimmät lyhyen ajan vaikutukset maaperään. Suuri aktiivinen pinta-ala auttaa myös metallien ja myrkkujen sitoutumisessa hiileen.

Biohiilen kustannuksia on vaikea arvoida, sillä toistaiseksi myyntiä on vain hyvin vähän, tuotantolaitokset kokeellisia ja kalliita eikä päästökauppa tunnista jätteidenkäsittelyn kompensoituja päästövähennyksiä. Voidaan olettaa, että kun tilanne päästökaupan suhteen muuttuu, alkaa voimakas biohiiliteollisuuden kasvu. Myös ilmastonmuutoksen vastainen taistelu voi saada saman aikaan kannustamalla megaluokan biomassan pyrolysointihankkeita.

Jättemateriaaleista valmistetut biohiilet kokonaisuudessaan soveltuvat hyvin maanparannuskäyttöön, sillä koetulokset antavat olettaa, että esimerkiksi vedenpuhdistamolietteestä valmistetun biohiilen korkeat metallipitoisuudet eivät merkittävästi kulkeudu kasveihin ja ravintoketjuun. Myös rahallisia säästöjä on odotettavissa pyrolyysikäsitellyn suhteellisesta edullisuudesta verrattuna muihin menetelmiin, kun oletetaan, että lopputuote on myytävissä edelleen.

Biohiilten vaikutusmekanismeissa on kuitenkin vielä paljon tuntemattomia, ja lisätutkimusta kaivataankin useilla alueilla. Muutamia aiheita, jotka vaativat lisää tutkimusta ovat esimerkiksi *priming*-efekti, eli lisääntynyt maaperän orgaanisen hiilen hajoaminen, liikkuvuus maaperässä ja lopullinen kohtalo, suoran kosketuksen vaikutus

suurempiin eliöihin (kuten kastematoihin, ja eliöihin jotka syövät kastematoja joilla on hiiltä sisällään) ja mahdollinen pysyvä maaperän muokkausvaikutus, jonka seurauksena tietyt kasvityypit saattavat hävitä alueelta pysyvästi.

## LÄHTEET

- Beesley L., Moreno-Jiménez E., Gomez-Eyles J., Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil, *Environmental Pollution* **xxx** (2010), 1-6
- Bridgwater A.V., G.V.C. Peacocke, Fast pyrolysis processes for biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **4** (2000), 1-73
- Buy Biochar: Manufactured Biochar and Biochar Products, [Verkköjulkaisu], Saatavilla: [http://biochar.bioenergylists.org/buy\\_biochar](http://biochar.bioenergylists.org/buy_biochar), viitattu : 22.11.2011
- Brandstaka et al., Biochar filter: use of biochar in agriculture as soil conditioner, Report for BSAS Commitment 2010, 22
- Combustion, Gasification and Propulsion Laboratory (CGPL), [Verkköjulkaisu], Saatavilla: <http://cgpl.iisc.ernet.in/site/Portals/0/Technologies/Gasification%20Technology.pdf>, Viitattu: 17.11.2011
- CarbonScape™, [Verkköjulkaisu], Saatavilla: <http://carbonscape.com/microwave-technology/overview/>, Viitattu: 17.11.2011
- Cundall Peter, Slow-burning, *organic GARDENER SEPT/OCT* (2008), 38-44
- De Gryze S., Cullen M., Durschinger L., Evaluation of the Opportunities for Generating Carbon Offsets from Soil Sequestration of Biochar, Terra Global Capital LLC 2010, 108
- Demirbas A, Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous form, *Energy Conversion and Management* **42** (2001), 1229-1238
- Fonteyne J, Recovery and recycling in Europe, *Waste Management and Recycling International* (1995), 13–18
- Galinato Suzette P., Jonathan K.Yoder, David Granatstein, The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration, *Energy Policy* **39** (2011), 6344–6350
- Granatstein et al, Use of Biochar from the Pyrolysis of Waste Organic Material as a Soil Amendment, Centre for Sustainig Agriculture and Natural Resources Washington State University, 2009, 181 sivua
- Green Charcoal International, [Verkköjulkaisu], Saatavilla: <http://www.green-charcoal.com/pyrolyser>, Viitattu: 1.2.2012
- Hossain Mustafa K., Vladimir Strezov, K. Yin Chan, Peter F. Nelson, Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*), *Chemosphere* **78** (2010), 1167–1171

Hwang I, T. Matsuto , N. Tanaka, Y. Sasaki, K. Tanaami, Characterization of char derived from various types of solid wastes from the standpoint of fuel recovery and pretreatment before landfilling, *Waste Management* **27** (2007), 1155-1166

Hwang I. et al., Improving the quality of waste-derived char by removing ash, *Waste Management* **28** (2008), 424–434

Jeffery S, F.G.A. Verheijen, M. van der Velde, A.C. Bastos, A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems & Environment* **144** (2011), 175-187

Jätelaitosyhdistys (JLY), [Verkköjulkaisu], Saatavilla:

<http://www.jly.fi/energia35.php?treeviewid=tree3&nodeid=35>, Viitattu: 17.11.2011

Kuzyakova Y., J.K. Friedelb, K. Stahr, Review of mechanisms and quantification of priming effects, *Soil Biology & Biochemistry* **32** (2000), 1485-1498

Laird David A., Robert C. Brown, James E. Amonette, Johannes Lehmann, Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar, *Biofuels, Bioprod. Bioref.* **3** (2009), 547–562

Libra Judy A, Kyoung S Ro, Claudia Kammann, Axel Funke, Nicole D Berge, York Neubauer, Maria-Magdalena Titirici, Christoph Fühner, Oliver Bens, Jürgen Kern, Karl-Heinz Emmerich, Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis, *Biofuels* **2(1)** (2011), 89–124

Lehmann Johannes, Stephen Joseph ,Biochar for Environmental Management, 2009, 448 sivua

McGhee Barry, Norton Fraser, Snape Colin E., Hall Peter J., The copyrolysis of poly(vinylchloride) with cellulose derived materials as a model for municipal waste derived chars, *Fuel* **74**, (1995)

Scandinavian Biofuel, [Verkköjulkaisu], Saatavilla:

<http://www.sbiofuel.com/pyrolysis.html>, Viitattu: 17.11.2011

TerraNova Energy, [Verkköjulkaisu], Saatavilla: <http://www.terranova-energy.com/>, Viitattu: 18.1.12

Titirici Maria M., Arne Thomas, Shu-Hong Yu, Jens-O. Müller, Markus Antonietti, A Direct Synthesis of Mesoporous Carbons with Bicontinuous Pore Morphology from Crude Plant Material by Hydrothermal Carbonization, *Chem. Mater.* **19** (2007), 4205-4212

Titirici Maria-Magdalena, Arne Thomas and Markus Antonietti, Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO<sub>2</sub> problem?, *New Journal of Chemistry* 2007, 3

Verheijen F., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, I. Diafas, Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions, 2009, EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149 sivua

Van Zwieten L, et al., Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility, *Plant Soil* **327** (2010), 235–246

Vassilev Stanislav V., Colette Braekman-Danheux, Philippe Laurent, Characterization of refuse-derived char from municipal solid waste 1. Phase-mineral and chemical composition, *Fuel Processing technology* **59** (1999), 95-134

Yu Xiang-Yang et al., Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil, *Chemosphere* **76** (2009), 665–671