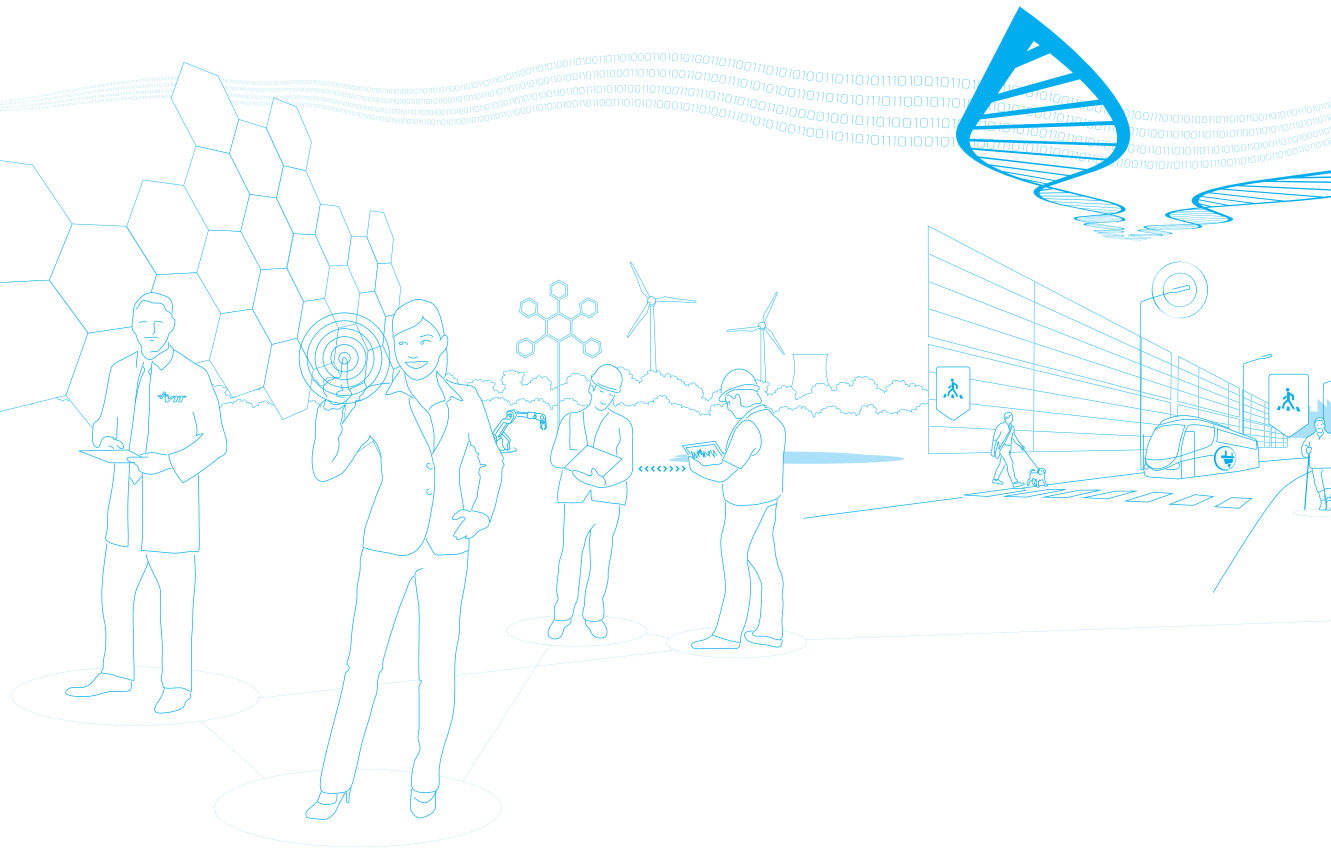




Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus

Biohiili ja tisle

Leena Fagernäs | Eeva Kuoppala | Jussi Ranta |
Vesa Arpiainen | Kari Tiilikkala | Riitta Kempainen |
Marleena Hagner | Heikki Setälä



Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus

Biohiili ja tisle

Leena Fagernäs, Eeva Kuoppala, Jussi Ranta &
Vesa Arpiainen
VTT

Kari Tiilikkala & Riitta Kemppainen
MTT

Marleena Hagner & Heikki Setälä
Helsingin yliopisto

ISBN 978-951-38-8276-1 (nid.)
ISBN 978-951-38-8277-8 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

VTT Technology 182

ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-1211 (painettu)
ISSN 2242-122X (verkojulkaisu)

Copyright © VTT 2014

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT
PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)
02044 VTT
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT
PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)
FI-02044 VTT
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)
FI-02044 VTT, Finland
Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus Biohiili ja tisle

Utilization of slow pyrolysis products and feasibility of the production. Biochar and distillate. **Leena Fagernäs, Eeva Kuoppala, Jussi Ranta, Vesa Arpiainen, Kari Tiilikkala, Riitta Kempainen, Marleena Hagner & Heikki Setälä.** Espoo 2014. VTT Technology 182. 74 s.

Tiivistelmä

Tutkimusprojekti ”Hidaspyrolyysin kokonaisratkaisut tuotevirtojen hyödyntämiseksi” (Hidaspyro II) toteutettiin Tekesin ”BioRefine Uudet biomassatuotteet” -teknologia-ohjelmassa vuosina 2011–2014 tutkimusosapuolten VTT:n, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT:n ja Helsingin yliopiston kesken. Projektin päätavoitteena oli hidaspyrolyysiprosessin optimointi kaikkien tuotteiden (hiili, tisleet, terva, kaasut) hyödyntämiseksi ja uusien sovellusten kehittämiseksi. Osatavoitteina oli selvittää hiilen ja tisleiden vaikutus kasveihin, maaperään, maanparannukseen ja viljelyn ympäristöpäästöihin, määrittää hyvän biohiilen laatuksia sekä selvittää tisleen käyttömahdollisuuksia hajuntorjunnassa ja tuotteiden ympäristö- ja ekotoksikologisia vaikutuksia.

Hidaspyrolyysiprosessin kehittämiseksi ja optimoimiseksi suunniteltiin ja rakennettiin VTT:lle hallittu panostoiminen koelaitteisto (6 kg). Pyrolyysilaitteiston mitoittamiseksi ja ajo-olosuhteiden määrittämiseksi tehtiin ensin TGA-määrittämiä ja useita esikoeajoja. Varsinaisissa koeajoissa valmistettiin koivupuuraaka-aineesta hiiltä kolmessa eri hiiltilämpötilassa ja kerättiin nesteet talteen. Lisäksi tehtiin koeajo mädätysjäännöksen lietteellä. Kokeiden massataseet määritettiin ja hiili- ja nestetuotteiden laatua ja koostumusta analysoitiin. Eri lämpötiloissa tuotettua koivupuuhiiltä käytettiin MTT:n ja HY:n käyttökokeissa. Hiilien vaikutusta kasveihin ja maaperään tutkittiin astiakokeilla kasvihuoneissa ja lierojen toksisuuskokeilla laboratoriossa. Biohiilen ja tisleiden vaikutusta kompostointiin tutkittiin kenttäkokeilla yhteistyössä osallistuvien yritysten kanssa. Tutkimustulosten pohjalta laadittiin uusien prosessikonseptien teknistaloudelliset arviot. Lisäksi tehtiin markkinaselvitys puupohjaisen hiilen markkinoista maanparannusaineena ja grillihiilenä.

Pyrolyysilaitteiston suunnittelu ja toteutus erilaisten hiilien ja tisleiden tuottamiseksi ja prosessin optimoimiseksi onnistui. Työssä kehitettiin kaksivaiheinen ajo-ohjelma tervavapaan tisleen, ns. puhdistisleen, saamiseksi ja määrän maksimoimiseksi. Ainoana muuttujana koeajoissa oli hiillon loppulämpötila. Kokeiden perusteella valittiin lämpötilat selkeiden erojen saamiseksi hiilien välille. Matalassa lämpötilassa (300 °C) tuotetun hiilen saanto oli korkea ja kiinteän hiilen pitoisuus matala. Keskilämpötilahiilellä (375 °C) saanto pieneni ja vastaavasti kiinteän hiilen pitoisuus kasvoi. Saatujen hiilien ominaispinta-alat olivat kuitenkin hyvin pieniä. Korkean lämpötilan (475 °C) hiili vastasi hyvälaatuista grillihiiltä. Sen ominaispinta-ala oli 44 m²/g. Kehitetyllä kaksivaiheisella lämpötilaohjelmalla voidaan optimoida hiilen ja nesteiden saantoa ja laatua.

Biohiilen käytön kannalta tärkeätä oli tieto biohiilen tehosta sitoa vettä tehokkaasti heti maahan sekoituksen jälkeen. Käytännössä biohiili kannattaa levittää kasvualuestaan hyvissä ajoin ennen kasvien kylvöä ja aikaan, jolloin on tarve sitoa maassa olevaa vettä. Karkeaan kivennäismaahan lisätty biohiili lisäsi kasvien kasvua ja satoa, mutta ei kaikilla testatuilla viljelykasveilla. Kasvien kasvuun ja ominaisuuksiin vaikuttavat sekä hiilen että kasvin ominaisuudet. Hiililämpötilalla ei ollut ratkaisevaa vaikutusta siihen, miten hiillisiä vaikuttaa maan vesi- ja ravintalouteen tutkitulla aikavälillä. 300 °C:n lämpötilassa valmistetun hiilen vaikutukset kasvien kasvuun olivat pienempiä ja maan ominaisuuksiin erilaisia kuin korkeammissa lämpötiloissa valmistettujen hiilien. Biohiili paransi kompostoitumista sekä vähensi typpioksiduulipäästöjä ja hajuhaittoja. On mahdollista parantaa ravinteiden kierrätystä kompostoinnin avulla ja samalla sitoa hiiltä pois kierrosta. Vaikka biohiilen laatu vaihtelee, puuperäinen biohiili on ympäristöystävällinen tuote, jolla ei havaittu olevan kielteisiä vaikutuksia maaperän hajottajaeliöstöön ja sen toimintaan. Teknis-taloudellisten arvioiden perusteella uudet prosessikonseptit, joissa tisle käytetään kasvinsuojelussa ja hajunpoistossa, hiili grillihiilenä ja maanparannusaineena ja tervat ja kaasut hyödynnetään energiantuotannossa, mahdollistavat merkittävän parannuksen tuotannon kannattavuudessa aikaisempiin konsepteihin verrattuna.

Asiasanat slow pyrolysis, birch, biochar, charcoal, distillate, aqueous phase, wood vinegar, tar, soil improvement, composting, odour control, carbon sequestration, environmental effects

Utilization of slow pyrolysis products and feasibility of the production

Biochar and distillate

Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus. Biohiili ja tisle.
Leena Fagernäs, Eeva Kuoppala, Jussi Ranta, Vesa Arpiainen, Kari Tiilikkala, Riitta Kempainen, Marleena Hagner & Heikki Setälä. Espoo 2014. VTT Technology 182. 74 p.

Abstract

The research project "Overall concepts for utilisation of slow pyrolysis products" (Hidaspyro II) was carried out within the "BioRefine – New Biomass Products" programme of Tekes – the Finnish Funding Agency for Innovation, during the years 2011–2014 in co-operation between VTT Technical Research Centre of Finland, MTT Agrifood Research Finland and University of Helsinki. The primary objective was optimization of slow pyrolysis process for utilization of all the products (charcoal, distillates, tar, and gases) and development of new applications. The aims were to determine the effect of biochar and distillates on plant growth, soil improvement, and odour prevention; to define the quality criteria of biochar in plant production, and to assess ecotoxicological and environmental impacts of the products.

To develop and optimize the pyrolysis process, a controlled testing facility (batch, 6 kg) was planned and constructed at VTT. TGA tests and several performance tests with the equipment were carried out for dimensioning and determination of the running programs and conditions. Pyrolysis test runs with the equipment were carried out for birch wood at three different carbonization temperatures and the distillates were collected. In addition, a pyrolysis test run was carried out with digested sludge raw material. The mass balances were determined and the quality and composition of biochars and distillates were analysed. Biochars produced from birch wood at different temperatures were provided to efficacy and environmental tests at MTT and the University of Helsinki. The impact of biochars on plants and soil was studied with pot tests in greenhouses and toxicity tests in laboratory. The effect of biochar and distillates on composting process was studied in field tests in collaboration with the companies participated in the project. Based on our results techno-economic assessments of new process concepts were made. In addition, a survey of biochar markets as soil amendment and charcoal was carried out.

The planning and realization of the pyrolysis equipment for production of different biochars and distillates and optimization of the process succeeded. A two-phase running program was developed to produce a tar-free distillate, wood vinegar, and to maximize its yield. The final carbonization temperature was the only variable in the test runs. The temperatures were selected to obtain clear differences between the different biochars. The biochar produced at low temperature (300 °C) had a high yield and low fixed carbon content. For the biochar of 375 °C the yield decreased and respectively the fixed carbon content increased. The BET

surface areas were, however, relatively small. The biochar produced at 475 °C corresponded to charcoal of good quality. The BET surface area was 44 m²/g. With the two-phase temperature program developed, the yield and quality of biochar and distillates can be optimised.

On the grounds of biochar use, knowledge about biochar capability to bind water effectively immediately after mixing with the soil was important. In practice it is profitable to mix biochar in the soil in good time before sowing of plants and when water in the soil is needed to be bound. Biochar added to coarse mineral soil increased the growth and yield of plants, but not for all tested crops. The properties of both the plant and biochar affect the growth and properties of the plant. The carbonization temperature had no decisive effect, how biochar affects the water and nutrient economy during the studied period. The biochar produced at 300 °C affected the plant growth less and soil properties differently than biochars produced at higher temperatures. Biochar improved composting process and decreased nitrous oxide and odour emissions. It is possible to improve recycling of nutrients via composting and at the same time to sequester carbon from the cycle. Though the quality of biochar varies, wood-based biochar is a pro-environmental product, which was not found to have negative effects on the decomposing organisms of the soil. The techno-economic estimates showed that the new process concepts, which produce wood vinegars for plant protection and odour prevention, biochar for soil improvement, charcoal for barbecue coke, and tars and gases for energy, were clearly more profitable than the ones previously estimated.

Keywords slow pyrolysis, birch, biochar, charcoal, distillate, aqueous phase, wood vinegar, tar, soil improvement, composting, odour control, carbon sequestration, environmental effects

Alkusanat

Tutkimusprojekti ”Hidaspyrolyysin kokonaisratkaisut tuotevirtojen hyödyntämiseksi” (Hidaspyro II) toteutettiin Tekesin ”BioRefine Uudet biomassatuotteet” -teknologia-ohjelmassa vuosina 2011–2014. Projekti oli jatkoa aikaisemmalle projektille ”Hidaspyrolyysin liiketoimintojen kehittäminen Suomessa” (Hidaspyro). Projekti Hidaspyro II toteutettiin rinnakkaishankkeina tutkimusosapuolten VTT:n, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen MTT:n ja Helsingin yliopiston ympäristötieteiden laitoksen (HY) kesken. VTT toimi projektin koordinaattorina.

Projektin johtoryhmään kuuluivat Tekesistä Marjatta Aamiala (kesästä 2012 alkaen, aikaisemmin Tuula Savola) sekä osallistuvista yrityksistä Hannamajja Fontell / Biolan Oy, Minna Kaila (kesästä 2012 alkaen, aikaisemmin Jorma Manninen) / Ekokem Oy Ab, Mika Laine / Envor Biotech Oy, Esa Ekholm / Ladec Oy (entinen Lahden tiede- ja yrityspuisto Oy), Mika Muinonen (v. 2014 Jussi Heinimö) / Miktech Oy, Taisto Raussi / Raussin Energia Oy ja Seppo Närhi / Viheraluerakentajat ry. Tutkimusosapuolten edustajina olivat Leena Fagnäs / VTT, Kari Tiilikkala / MTT ja Heikki Setälä /HY.

Projektin tavoitteena oli hidaspyrolyysiprosessin optimointi kaikkien tuotteiden hyödyntämiseksi ja uusien sovellusten kehittämiseksi. Osatavoitteina oli selvittää hiilen ja tisleiden vaikutus kasveihin, maaperään ja maanparannukseen sekä tisleen käyttömahdollisuudet hajuntorjunnassa ja määrittää hyvän biohiilen laatu-kriteerit ja tuotteiden ympäristövaikutukset.

Tutkimusta varten suunniteltiin ja rakennettiin VTT:ssa hidaspyrolyysikoelaitteisto hiilien ja tisleiden tuottamiseksi sekä prosessin optimoimiseksi. Laitteisto valmistui vuoden 2012 alussa ja hiiltokoeajot tehtiin vuoden 2012 aikana. Eri hiiltolämpötiloissa tuotetut koivupuuhiilet toimitettiin MTT:lle kasvukokeisiin ja HY:lle ympäristövaikutustutkimuksiin, jotka toteutettiin vuosina 2012–2013. Ekokem Oy Ab toimitti mädätysjäännösnäytteen lietteellä tehtyyn hiiltokoeajoon ja suoritti koeajon tuotteiden ioni- ja metallianalyysijä. Lisäksi hankkeessa tutkittiin biohiilen ja tisleiden vaikutusta kompostointiin kentäkokeilla Envor Biotech Oy:n alueella. Näihin kokeisiin tarvittavat suuremmat näytemäärät toimitettiin Barbetec OÜ:ltä Virosta ja Charcoal Finland Oy:stä Alavieskasta. Tutkimustulosten pohjalta laadittiin VTT:ssa uusien prosessikonseptien teknistaloudelliset arviot. Ladec Oy teetti markkinaselvityksen puupohjaisen hiilen markkinoista maanparannusaineena ja grillihiilenä. Lisäksi analyysijä tilattiin Nab Labs Oy:ltä (PAH-analyysit) ja Tampereen teknilliseltä yliopistolta (hiilien ominaispinta-alat).

Tämän julkaisun kirjoittamisesta vastasivat VTT (luvut 1–4, 8, 9), MTT (luvut 1, 5–7, 9) ja HY (luvut 1, 5–6, 9).

Hankkeen vastuullisena johtajana toimi Leena Fagernäs VTT:ltä, MTT:n tutkimuksen johtajana Kari Tiilikkala ja HY:n tutkimuksen johtajana Heikki Setälä. Lisäksi tutkimukseen osallistuivat VTT:stä Eeva Kuoppala, Jussi Ranta, Vesa Arpiainen, Sampo Ratinen, Pekka Saarimäki, Jouko Kukkonen, Jarmo Juuti, Jaana Korhonen, Elina Paasonen, ja Sirpa Lehtinen; MTT:stä Riitta Kemppainen, Lauri Jauhiainen, Kaija Hakala, Eeva-Maria Tuhkanen, Ari Eskola, Marja-Liisa Westerlund, Päivi Tuomola ja Sanna Hallman sekä HY:stä Marleena Hagner.

Hidaspyro I ja II-projektien puitteissa valmistui vuonna 2013 Marleena Hagnerin väitöskirja hidaspölyolosuhteiden käyttömahdollisuuksista [28].

Tekijät esittävät kiitokset kaikille projektiin osallistuneille henkilöille sekä johtoryhmälle hyvästä yhteistyöstä ja aktiivisesta osallistumisesta projektiin.

Espoo, kesäkuu 2014

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Alkusanat.....	7
1. Johdanto	11
2. Tutkimuksen kuvaus.....	13
3. Hidaspyrolyysikoelaitteiston suunnittelu, toteutus ja esikokeet	14
3.1 Koelaitteiston suunnittelu ja toteutus.....	14
3.2 Esikokeet ja koereaktorin sisäänajo.....	17
4. Koivupuun hiiltoajot koelaitteistolla	20
4.1 Tausta.....	20
4.2 Puuraaka-aine.....	20
4.3 Koivupuun hiiltokoeajot.....	21
4.4 Tuotteiden analysointi.....	23
4.5 Tulokset	23
4.5.1 Koeajojen massataseet.....	23
4.5.2 Tuotehiilien ominaisuudet.....	24
4.5.3 Tisleiden koostumus	26
4.6 Johtopäätökset.....	28
5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä.....	30
5.1 Johdanto	30
5.2 Aineisto ja menetelmät.....	31
5.2.1 Kasvihuonekokeen koemaa ja hiilet.....	31
5.2.2 Sekoitukset ja koeasetelma kasvihuoneessa	31
5.2.3 Toksisuuskoelaitteistolla	33
5.2.4 Mittaukset poteista.....	34
5.2.5 Mikrobitoiminnan ja sukkulamatojen analysointi	34
5.2.6 Lierokokeet.....	35
5.3 Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	35
5.3.1 Vesi imeytyi biohiileen heti sekoituksen jälkeen.....	35

5.3.2	Maan happamuus ei pienistä hiilimääristä muutu	38
5.3.3	Hiilet vaikuttivat lehtisalaatin itämiseen, kasvuun ja typpipitoisuuteen.....	39
5.3.4	Erilaiset hiilet vaikuttivat eri tavoin maan mikrobitoimintaan	40
5.3.5	Hiilten vaikutus lierojen käyttäytymiseen ja kuolleisuuteen.....	42
5.4	Yhteenveto.....	42
6.	Koivupuuhiilen vaikutus kasveihin.....	44
6.1	Taustaa.....	44
6.2	Aineisto ja menetelmät.....	44
6.2.1	Biohiilen ja maan käsittely ennen kokeen aloittamista.....	44
6.2.2	Retiisikoe	45
6.2.3	Ohrakoe	45
6.2.4	Raiheinäkoe	46
6.3	Tulokset ja tulosten tarkastelu	46
6.3.1	Biohiilet lisäsivät retiisin kasvua ja satoa.....	46
6.3.2	Biohiili ei vaikuttanut ohran satoon.....	50
6.3.3	Raiheinäkoe	50
6.4	Yhteenveto.....	51
7.	Biohiilen ja tisleiden vaikutus kompostointiin.....	52
7.1	Johdanto	52
7.2	Aineisto ja menetelmät.....	53
7.2.1	Kenttäkokeet Envor Biotech Oy:n alueella	53
7.2.2	Mittaukset.....	55
7.3	Tulokset ja tulosten tarkastelu	57
7.4	Yhteenveto.....	59
8.	Teknis-taloudelliset laskelmat	60
8.1	Taustaa.....	60
8.2	Tarkasteltavat tapaukset ja kannattavuuslaskennan perusteet	61
8.3	Laskennan tulokset.....	63
8.4	Johtopäätökset.....	69
9.	Johtopäätökset	70
	Lähdeluettelo.....	72

1. Johdanto

Tutkimusta edeltävän Tekesin BioRefine-ohjelmaan kuuluvan projektin ”Hidaspyrolyysin liiketoimintojen kehittäminen Suomessa” (Hidaspyro) [1–3] lupaavien tulosten ja taloudellisten tarkasteluiden perusteella todettiin tarvetta prosessin kehittämiseen sekä uusien sovellusten ja kaupallisten hankkeiden synnyttämiseen. Projektin jatkotutkimuksena käynnistyi ohjelmassa projekti ”Hidaspyrolyysin kokonaisratkaisut tuotevirtojen hyödyntämiseksi” (Hidaspyro II) kesällä 2011 [4–5].

Hidaspyrolyysissä (hiilto, kuivatislaus) puu kuumennetaan ilmattomassa tilassa hitaasti noin 500 °C:seen. Nykyisin hiiltoon käytetään lähinnä panos- tai jatkuva-toimisia retortteja [6–8]. Perinteisesti lehtipuuta käytettäessä päätuotteena syntyy hiiltä ja sivutuotteina nesteitä (tisleettä ja tervaa) sekä kaasuja. Puuhiiltä on käytetty esimerkiksi lämmityksessä, ruuanlaitossa ja metallurgiassa. Kehittyvissä maissa puuhiilen käyttö on laajamittaista sekä teollisuudessa että kotitalouksissa.

Suomessa puuhiiltä valmistetaan pienimuotoisesti panosretorteilla ja hiili käytetään lähes yksinomaan grillihiilenä. Liiketoiminnan kannattavuuden parantamiseksi tulisi hyödyntää myös tisleet, tervat ja kaasut sekä lisätä prosessin vuotuista käyttöaika. Edellisessä projektissa todettiin mm., että tervavapaa tisle on lupaava ja markkinointikelpoinen tuote erilaisiin kaupallisiin tarkoituksiin, kuten kasvinsuojelussa esimerkiksi karkotteena nilviäisten torjunnassa sekä rikkakasvihävitteenä. Tisle on biohajoava eikä sisällä polyaromaattisia hiilivetyjä, jotka puolestaan rikastuvat tervaosaan ja kaasuihin, mikä on huomioitava niiden hyödyntämisessä. Tisleen tuottaminen ja hyödyntäminen parantaa selkeästi grillihiilen tuotannon vuositulosta.

Grillihiilen lisäksi tuotehiilen vaihtoehtoisista käyttömuodoista suurin kasvupotentiaali liittyy maanparannusaineena käytettävään biohiileen. Biohiilellä ja tisleellä on todettu olevan merkittävää potentiaalia maanparannuskäytössä. Aasian maat ovat edelläkävijöitä valmistaessaan biohiiltä ja tisleitä paikallisille markkinoille. Koska biohiilen tuotannossa käytetty biomassa ja hiilto-olosuhteet vaihtelevat, eri hiilten aiheuttamat vasteet kasveissa ja maaperässä voivat olla erilaisia. Tieteellinen näyttö tehosta on, mutta käytäntöön viedyt tuotteet ja teknologiat sekä tiedot tuotteiden vaikutuksista mm. ekosysteemien toimintaan puuttuvat lähes kokonaan. Tärkeätä on saada tieteellisiä tuloksia lähtöaineiden ja tuotantoprosessien vaikutuksista tisleiden laatuun sekä selvittää ympäristölle riskittömän tisleen ja hiilen käyttömäärä ja laatu. Biohiilen eurooppalaiset laatustandardit ovat vasta luonnosvaiheessa, joten hankkeen tuloksilla on heti myös kansainvälisiä vaikutuksia.

Lähtökohdaksi jatkotutkimukselle asetettiin hidaspYROLYYSIKOELAITTEISTON suunnittelu ja rakentaminen VTT:lle. Laitteiston tuli olla helposti ja hallitusti muunneltavissa mm. lämpötilaprofiilien osalta. Edellisessä projektissa oli tehty koeajoja yritysten hiiltoretorteilla, joissa pyrolyysiolosuhteiden muuttaminen on hankala toteuttaa. Lisäksi koeajot ovat pitkäkestoisia, ja tarvittava mittaus- ja tutkimuslaitteisto on rakennettava paikan päällä.

Tutkimuksen päätavoitteena oli hidaspYROLYYSIPROSESSIN optimointi kaikkien tuotteiden (hiili, tisleet, terva, kaasut) hyödyntämiseksi ja uusien sovellusten kehittämiseksi. Osatavoitteina oli selvittää hiilen ja tisleiden vaikutus kasveihin, maaperään, maanparannukseen ja viljelyn ympäristöpäästöihin, määrittää hyvän biohiilen laatuksia sekä selvittää tisleen käyttömahdollisuudet hajun torjunnassa ja selvittää tuotteiden ympäristö- ja ekotoksikologisia vaikutuksia.

Suunnittelun pyrolyysilaitteiston tavoitteena oli hiilien ja tisleiden tuottaminen käyttökokeisiin ja prosessin kehittäminen. Tarkoituksena oli valmistaa pyrolyysituotteita hallitusti eri olosuhteissa, määrittää massataseet ja analysoida tuotteiden laatua ja koostumusta. Koeajojen tuotteita käytettiin MTT:ssa asiakokeissa, joilla voidaan tutkia erilaatuisten biohiilten vaikutusta kasvien kasvuun, veden ja ravinteiden käyttöön, huuhtoutumisen estoon sekä maan biologisen aktiivisuuden lisääntymiseen, ja HY:ssä ympäristö- ja ekotoksikologisten vaikutusten määrittämisessä. Tisleen ja hiilen vaikutusta kompostointiin kokeiltiin yhteistyössä yritysten kanssa. Koeajoissa ja sovellustesteissä saatuja tuloksia käytettiin eri konseptien teknis-taloudellisissa tarkasteluissa. Tutkituissa konsepteissa tisleet käytetään kasvinsuojelu- ja maanparannusaineena, hiili käytetään grillihiilenä, energiahiilenä ja maanparannusaineena, ja tervat ja kaasut hyödynnetään energiantuotannossa, esimerkiksi pienkohteissa lämmöntuotannossa tai itse prosessissa.

2. Tutkimuksen kuvaus

Tutkimuksessa kehitettiin ja optimoitiin hidaspYROLYYSIPROSESSIA uusien tuotteiden kehittämiseksi. Koelaitteeksi suunniteltiin ja rakennettiin panostoiminen pyrolyysilaitteisto (6 kg) VTT:lle. Laitteiston mitoittamiseksi ja ajo-olosuhteiden löytämiseksi tehtiin ensin kokeita TGA-laitteella. Laitteiston sisäänajossa tehtiin useita esikoeajoja reaktorin toimivuuden selvittämiseksi sekä ajo-ohjelmien valitsemiseksi. Varsinaisissa koeajoissa valmistettiin koivupuuraaka-aineesta hiiltä kolmessa eri hiiltolämpötilassa ja kerättiin nesteet talteen. Kokeiden massataseet määritettiin ja hiili- ja nestetuotteiden laatua ja koostumusta analysoitiin.

Eri hiiltolämpötiloissa tuotettuja koivupuuhiiliä käytettiin MTT:n ja HY:n käyttökokeisiin. Hiilien vaikutusta maaperään ja kasveihin tutkittiin astiakokeilla kasvihuoneissa ja lierojen toksisuuskokeilla laboratoriossa. Biohiilen ja tisleiden vaikutusta kompostointiin tutkittiin Envor Biotech Oy:n alueella kenttäkokeilla, joihin tarvittavat suuremmat näytemäärät toimitettiin Barbetec OÜ:ltä Virosta ja Charcoal Finland Oy:ltä Alavieskasta.

Tutkimustulosten pohjalta laadittiin uusien prosessikonseptien teknistaloudelliset arviot. Lisäksi Ladec Oy teetti markkinaselvityksen puupohjaisen hiilen markkinoista maanparannusaineena ja grillihiilenä.

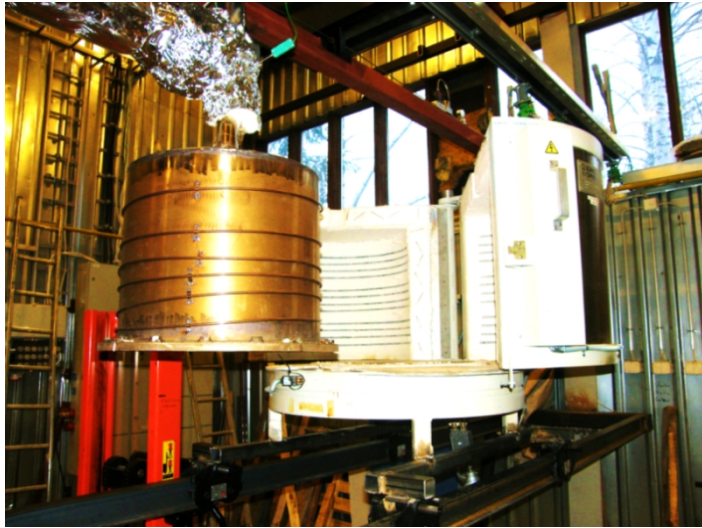
3. Hidaspyrolyysikoelaitteiston suunnittelu, toteutus ja esikokeet

3.1 Koelaitteiston suunnittelu ja toteutus

Tutkimuksen aluksi VTT:ssa suunniteltiin ja rakennettiin hidaspyrolyysikoelaitteisto hiilien ja tisleiden tuottamiseksi sovelluskokeisiin ja prosessin optimoimiseksi. Koelaitteiston suunnittelu, toteutus, esikokeet ja toimivuus eri lämpötiloissa ja erilaisilla raaka-aineilla esitetään yksityiskohtaisemmin artikkelissa [9].

Hidaspyrolyysireaktorissa lähtömateriaalia (tavallisesti puumateriaali) kuumentetaan typpikehässä enintään 500 °C:n lämpötilaan, jolloin muodostuu hiiltä, tislauustuotteita (tislettä ja tervaa) sekä kaasuja (lähinnä hiilidioksidia, hiilimonoksidia, vetyä ja hiilivetyjä). Kooreaktori suunniteltiin hallituksi epäsuorasti uunissa lämmitettäväksi panosretortiksi (kuva 3.1). Lämmitykseen valittiin lämmitysvastuksilla varustettu keraaminen uuni (Scandia Ovnin AS), jonka sisäosan halkaisija on 500 mm ja korkeus 500 mm. Uunin teho on 15 kW ja maksimilämpötila 1100 °C. Uunissa on kolme itsenäisesti säädettävää vastusvyöhykettä. Neljäs lämmitysvastus lisättiin pohjaosan lämmitykseen. Uunin kokonaisteho on 18 kW. Uuniosa suunniteltiin liikkuvaksi ja reaktori kiinteäksi. Uuni nostettiin noin 2 m:n korkeuteen ja asetettiin kiskoilla liikuteltavaksi. Retortin vaipassa esilämmitetty typpi toimii laitteessa kantokaasuna ja osin suorana lämmityskaasuna. Raaka-ainenäytteet asetetaan reaktoriin näyteritilälle, joka käsittää neljä ritilätasoa (kuva 3.2). Käytetyt materiaalit ovat tulenkestävää terästä ja niiden materiaalivahvuudet 5 mm. Reaktorin maksimilämpötila on 1000 °C. Reaktori ja näytetasot tilattiin alihankintana Helsingin Painesäilö Oy:stä.

Laitteistoon liitettiin uunin ohjelmointiyksikkö lämpötilan nostolle, tiedonkeruuyksikkö ja typpivirtauksen säätöyksikkö (massavirtasäädin). Lämpötilaa seurataan termoelementeillä 12 eri pisteessä. Tulokset tiedonkeruuyksiköltä siirretään Excel-tiedostoiksi. Koska laitteen lämpökapasiteetti on alhainen, ei lämpötilassa tapahdu ohjelmoinnin ylittymistä, mutta toisaalta tarvittavat viiveajat näytteen tavoitelämpötilan saavuttamiseksi muodostuvat pitkiksi.



Kuva 3.1. Reaktori ja lämmitysuni.



Kuva 3.2. Näyteritilä.

Reaktorista ulostuleva retorttikaasu johdetaan lämpösaattuna jäähdyttimelle, kondensoituneet nestemäiset tuotteet (tisleet ja tervat) otetaan talteen (kuvat 3.3 ja 3.4) ja kaasut (tuotekaasujen ja typen seos) johdetaan puhdistukseen, joka käsittää kylmäloukun, aktiivihiilisudattimen ja pumpulisudattimen, mitataan mahdollisesti jatkuvatoimisella kaasuanalysaattorilla ja johdetaan ulos. Laitteisto

3. Hidaspyrolyysikoelaitteiston suunnittelu, toteutus ja esikokeet

on varustettu kohdepoistoilla hajukaasujen poistamiseksi. Laitteessa on kaksi manometria (vesitäytteiset U-putket), jotka toimivat tarvittaessa varoventtiileinä.



Kuva 3.3. Retorttikaasujen johtaminen jäähdyttimelle.



Kuva 3.4. Retorttikaasun jäähdytys, tisleen talteenotto ja kaasujen puhdistus.

Jäähdytys koeajon jälkeen tapahtuu kytkemällä lämmitysvastukset pois ja jatkamalla kantokaasuhuuhdelua. Noin 300 °C:n lämpötilassa voidaan lämmitysuunin ovet avata raolleen, jolloin jäähtyminen tapahtuu nopeasti alle 100 °C:n lämpötilaan,

ja reaktori voidaan jättää jäähtymään. Typpivirtaus pidetään koko ajan päällä. Reaktori avataan seuraavana päivänä.

Koeajo laitteistolla kestää tavallisesti yhden päivän. Näytteen panostus tehdään edellisenä päivänä. Laitteistolle tehtiin käyttöohje sekä vaarojen tunnistaminen ja riskien arviointitarkastelu.

3.2 Esikokeet ja kooreaktorin sisäänajo

Koelaitteiston mitoittamiseksi ja ajo-olosuhteiden löytämiseksi tehtiin ensin kokeita laboratoriomittakaavassa termogravimetria (TGA) -laitteella (Leco Corp., TGA-601) (kuva 3.5). Laitteella seurataan massan muutosta lämpötilan funktiona. Tarkoituksena oli selvittää puumateriaalin käyttäytymistä lämpökäsittelyssä: tapahtuvia reaktioita, reaktioaikoja ja reaktionopeuksia. Raaka-aineena (1–2 g/upokas) käytettiin projektin koetoiminnan pääraaka-aineeksi valittua koivua (kuorimaton ranka, halkaisijaltaan noin 50–150 mm). Lämpötila nostettiin ohjelmoidusti typpikaasukehässä. Koivupuun käyttäytymistä seurattiin, kun lämpötilan nosto oli lineaarinen tai toisaalta vaiheittainen. TGA:n avulla arvioitiin koelaitteelle sopiva lämpötilaohjelmointi ja määritettiin reaktorille sopiva raaka-aineen kappalekoko. Lisäksi selvitetiin puun fysikaalisten ominaisuuksien muutoksia hiiltoprosessissa ja kappaleiden dimensioiden vaikutusta reaktionopeuksiin ja siten tarvittaviin viiveaikoihin.

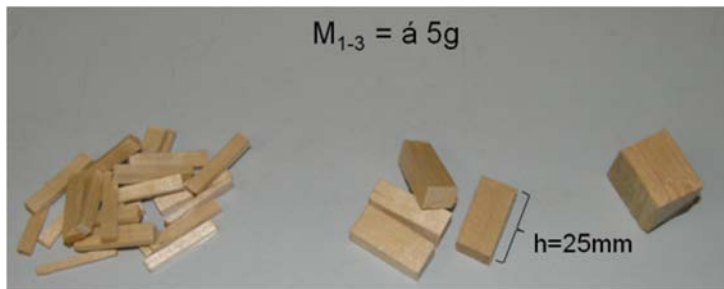
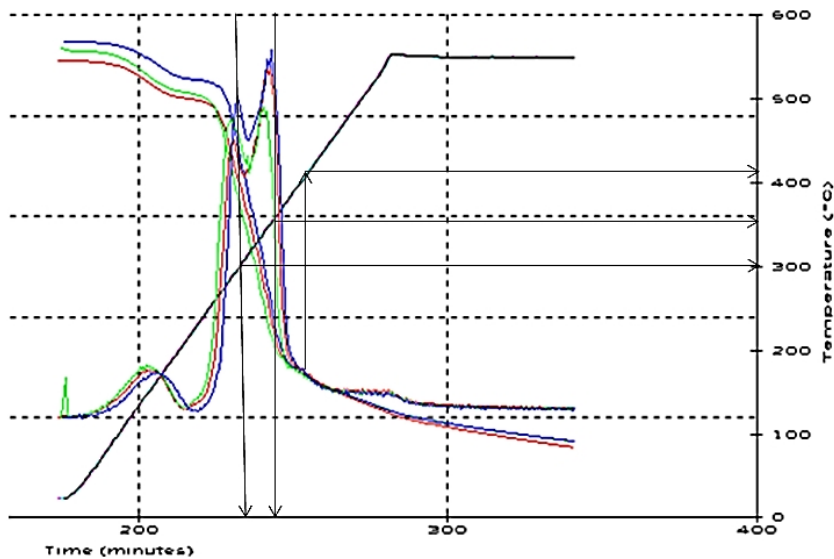


Kuva 3.5. Termogravimetria (TGA) -laite, jossa on 20 kpl näyteupokkaita, joihin mahtuu 5 g näytettä.

Kappalekoon vaikutusta selvitetiin punnitsemalla TGA-laitteeseen sama määrä (5 g) erikokoisia puukappaleita. Kappaleiden kuitusuunnan pituus pidettiin vakiona (25 mm),

3. Hidaspyrolyysikoelaitteiston suunnittelu, toteutus ja esikokeet

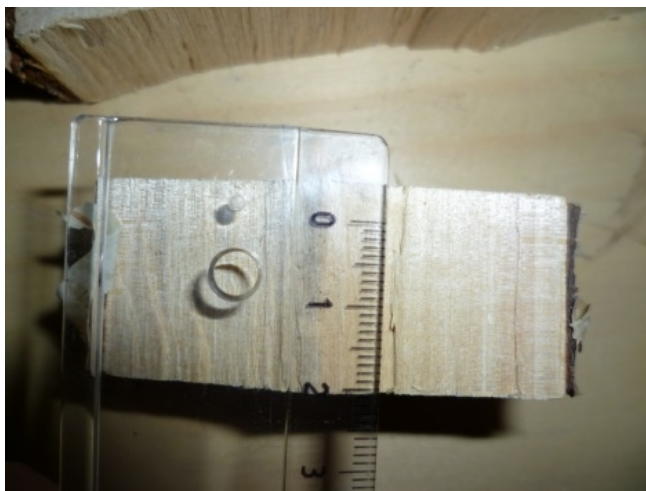
koska kuitusuunnan pituus määrää reaktionopeuden. Tuloksena saatiin, että reaktionopeudet olivat lähes samoja kappaleiden leveysuunnasta huolimatta sekä lineaarisessa että vaihteellisessa lämmityksessä (kuva 3.6). Siten todettiin, että koeajoissa riittää kappaleen kuitusuunnassa olevan pituuden vakiointi, jotta hiiltä tapahtuisi mahdollisimman tasaisesti. TGA-tulosten perusteella valittiin puuraaka-aineen palakoko koeajoihin.



Kuva 3.6. TGA-tulokset kappalekoon vaikutuksesta reaktionopeuteen, kun lämpötila nousee lineaarisesti. Sininen käyrä vastaa suurta kappaleita, vihreä käyrä keskikokoisia kappaleita ja punainen käyrä pieniä kappaleita. Alla erikokoiset kappaleet, M = palikoiden massa ja h = kuitusuunnan pituus.

Koelaitteiston sisäänajossa tehtiin useita esikoeajoja reaktorin toimivuuden selvittämiseksi sekä ajo-ohjelmien, asetusten ja raaka-aineen kosteuden valitsemiseksi. Ajoparametrejä haettiin varioimalla mm. reaktorin lämpötilan nostonopeutta ja pitoaikoja ajon eri vaiheissa. Ensimmäinen lämmitysajo oli ns. vesipannuajo, jossa

vesi imeytettiin hiekkaan. Lämmitysajon tuloksena saatiin tietoa reaktorin toimivuudesta, lämpötilan ohjautumisesta, vesijakeen kondensoitumisesta, laitteiston jäähtymisestä ja retortin lämpötiloista. Lämmitysajon jälkeen tehtiin esikoeajoja koivupuumateriaalilla. Koivurangoista sahattiin 25 mm:n paksuisia kiekkoja, joiden leveys oli 50–150 mm (kuva 3.7). Koeajoja tehtiin kosteammilla (kosteus 22–24 %) kiekkoilla sekä lähelle tasapainokosteutta vakioituilla kiekkoilla (kosteus 10–12 %). Koeajoissa tutkittiin vaiheistettua prosessia, jossa tisleet kerättiin talteen kahdessa vaiheessa. Kokeissa muunneltiin eri vaiheiden lämpötiloja ja pitoaikoja. Kaksivaiheinen ajo pystyttiin tekemään yhden työpäivän aikana. Siten viikossa voitiin tehdä kaksi ajoa.



Kuva 3.7. Koeajoissa käytettyjä koivupuukiekköjä (kiekon leveys $d = 50\text{--}150$ mm ja paksuus 25 mm).

4. Koivupuun hiiltoajot koelaitteistolla

4.1 Tausta

Hidaspyrolyysikoelaitteistolla tehtiin koivupuuraaka-aineella koeajoja hiilen ja nesteiden tuottamiseksi ja prosessin kehittämiseksi. Laitteistolla oli tarkoitus valmistaa pyrolyysituotteita hallitusti eri olosuhteissa, määrittää massataseet ja analysoida tuotteiden laatua ja koostumusta. Koeajoissa saatuja tuloksia käytetään eri konseptien teknis-taloudellisissa tarkasteluissa. Tuloksia verrataan käytännön retorteilla aikaisemmin saatuihin tuloksiin.

Eri hiiltolämpötiloissa saaduilla hiillillä oli tarkoitus tehdä MTT:ssa sovellustestejä astiakokein, joilla voidaan tutkia tarkasti tunnetulla prosessilla tuotetun biohiilen ja tisleen vaikutusta kasvien kasvuun, veden ja ravinteiden käyttöön, huuhtoutumisen estoon sekä maan biologisen aktiivisuuden lisääntymiseen. Tuotteiden ympäristö- ja ekotoksikologiset vaikutukset määritetään HY:ssä.

Seuraavassa käsitellään lyhyesti koeajojen suoritusta, kulkua ja massataseita sekä saatujen hiilien ominaisuuksia ja nestetuotteiden laatua ja koostumusta. Pyrolyysikoelaitteella koivupuulle samoin kuin muille biomassaraaka-aineille tehtyjä koeajoja tullaan esittämään artikkeleissa [9, 10].

4.2 Puuraaka-aine

Pääraaka-aineeksi koeajoihin valittiin kuorimaton koivuranka (kuva 4.1). Koivuran-goista sahattiin 25 mm:n paksuisia ja leveydeltään 50–150 mm kiekkoja. Kiekkojen kosteus oli vakioitu 10–12 %:iin. Kiekot (4–6 kg) asetettiin kooreaktorin ritilätasolle kuvan 4.1 mukaisesti.



Kuva 4.1. Koivurankaa ja sahattuja koivukiekköjä (leveys 50–150 mm ja paksuus 25 mm) asetettuna pyrolyysilaitteiston näyteritilöille koeajoa varten.

Raaka-aineelle määritettiin polttoaineominaisuuksista kosteus (SFS-EN 14774), tuhka (SFS-EN 14775), haihtuvat aineet (SFS-EN 15148), hiili-, vety- ja typi(CHN)-pitoisuudet (SFS-EN 15104), rikki(S)-pitoisuus (SFS-EN 15289) ja lämpöarvo (DIN 51900) standardimenetelmien mukaisesti. Happipitoisuus laskettiin erotuksena [100 % – (CHNS- ja tuhkapitoisuudet)]. Analyysitulokset on esitetty taulukossa 4.1. Lisäksi raaka-aineelle tehtiin mikroskooppitarkastelu.

Taulukko 4.1. Koeajoissa käytetyn koivupuuraaka-aineen ominaisuudet.

Näyte	Koivupuuraaka-aine
Kosteuspitoisuus, p-%	10–12
Tuhkapitoisuus, p-% kuiva-aineessa (ka.)	0,4
Haihtuvat aineet, p-% (ka.)	84,6
Hiilipitoisuus (C), p-% (ka.)	49,9
Vetyypitoisuus (H), p-% (ka.)	5,9
Typpipitoisuus (N), p-% (ka.)	0,1
Rikkipitoisuus (S), p-% (ka.)	0,01
Happipitoisuus (O), p-% (ka.) ¹⁾	44
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg (ka.)	20,1
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (ka.)	18,8
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (saapumistilassa)	17,3

1) Erotuksena: 100 % – (CHNS + tuhka).

4.3 Koivupuun hiiltokoeajot

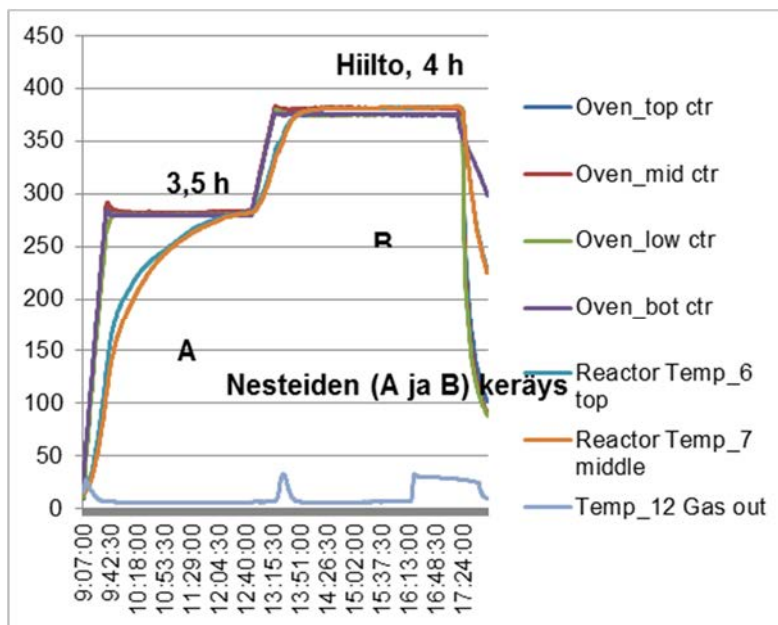
Varsinaisiin koeajoihin, joissa hiiltä tuotettiin MTT:n ja HY:n sovellustestejä varten, valittiin kaksivaiheinen lämmitysprofiili. Ensimmäisessä vaiheessa tarkoituksena oli kerätä tervavapaa tisle, ns. ”puhdastisle” (tisle A), jonka määrä pyrittiin maksimoimaan. Tämä vaihe oli sama ja vakioitu kaikissa ajoissa. Ajoissa pyrittiin muut-

4. Koivupuun hiiltoajat koelaitteistolla

tujien minimointiin ja ainoana muuttujana oli toisessa vaiheessa tapahtuvan hiillon loppulämpötila. Tällöin saatiin eri lämpötiloissa tuotettuja hiiliä. Lisäksi kerättiin toisen vaiheen aikana muodostuneet tisleet (tisleet B).

Kuvassa 4.2 on esimerkki ajoissa käytetystä kaksivaiheisesta lämmitysprofiilista. Reaktorin lämpötila saavuttaa hitaasti ohjauslämpötilan (tavoitelämpötila). Lämpötilana reaktorissa seurattiin toisen ja kolmannen ritilätason välillä olevan termoelementin (termoelementti 7) osoittamaa lämpötilaa. Eri ajo-ohjelmia muuttamalla löydettiin sopiva ohjelma lämpötilan nostolle ja pidolle. Vasta kun ohjelmoitu lämpötilataso oli ensimmäisessä vaiheessa saavutettu reaktorissa, nostettiin lämpötila toisen vaiheen tasolle ja pidettiin siinä, kunnes hiilto oli kokonaan tapahtunut.

Ensimmäisen vaiheen saavuttaminen reaktorissa kesti 3,5 h. Hiillon (toisen vaiheen) loppulämpötiloiksi valittiin 300 °C (matala lämpötila), 375 °C (keskilämpötila) ja 475 °C (korkea lämpötila), joissa pitoaika oli 4 tuntia. Ensimmäisen vaiheen lopussa kerättiin tisle A ja toisen vaiheen lopussa hiillon päättyessä tisle B. Tisleet punnittiin ja analysoitiin. Reaktorin jäähtyttyä määritettiin hiilisaannot kultakin ritilätasolta ja eri tasojen hiilet yhdistettiin. Hiilen määrä eri koeajoissa oli 1–2 kg. Hiilet murskattiin ja seulottiin <10 mm:n raekokoon Weima-murskaimella. Eri lämpötiloissa tuotettuja hiiliä toimitettiin käyttökokeisiin MTT:lle (4 kg kutakin) ja HY:lle (1 kg kutakin). Suunniteltu hiilikapasiteetti sovelluskokeita varten saavutettiin kaikissa kolmessa loppuhiiltoämpötilassa.



Kuva 4.2. Koeajon kaksivaiheinen lämmitysprofiili. Sininen (termoelementti 6) ja oranssi (termoelementti 7) käyrä kuvaavat lämpötiloja (°C) reaktorissa ajan funktiona. Reaktorin lämpötilana koeajoissa seurattiin termoelementin 7 lämpötilaa. Ylimmät käyrät esittävät lämpötiloja uunissa (tavoitelämpötila).

4.4 Tuotteiden analysointi

Koivupuuhiilille määritettiin polttoaineanalyseistä kosteus (SFS-EN 14774), tuhka (SFS-EN 14775), haihtuvat aineet (SFS-EN 15148), CHN (SFS-EN 15104), rikki (SFS-EN 15289) ja jäännöshiili (laskennallinen) (ASTM D 3172) standardimenetelmien mukaisesti. Lisäksi tuotehiilille määritettiin lämpöarvo laskennallisesti [11]. Hiilien sisältämät polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet) määritettiin Nab Labs Oy:ssä. Ominaispinta-alamääritykset tehtiin Tampereen teknillisessä yliopistossa. Lisäksi tuotehiiliä tarkasteltiin mikroskooppisesti.

Kaikkien koeajojen ensimmäisen vaiheen tisleet, jotka oli kerätty samoissa vakioituissa olosuhteissa, yhdistettiin (kokoomatisle A). Tisleestä analysoitiin pH, vesipitoisuus, kokonaisorgaaninen hiili (TOC), kemiallinen hapenkulutus (COD_{Cr}), happoluku (TAN) ja orgaanista koostumusta aikaisemmin esitettyjen menetelmien mukaisesti [2]. Toisen vaiheen tisleistä (tisleet B) analysoitiin pH, vesipitoisuus (K-F-titraus), CHN (ASTM D 5291) ja lämpöarvo (DIN 51900) sekä määritettiin haihdutusjäännös ja liukoinen terva [2]. Tisleiden orgaanisen aineksen kokonaismäärä (%) saatiin vähentämällä 100 %:sta vesipitoisuus. Lisäksi tisleille määritettiin PAH-yhdisteet.

4.5 Tulokset

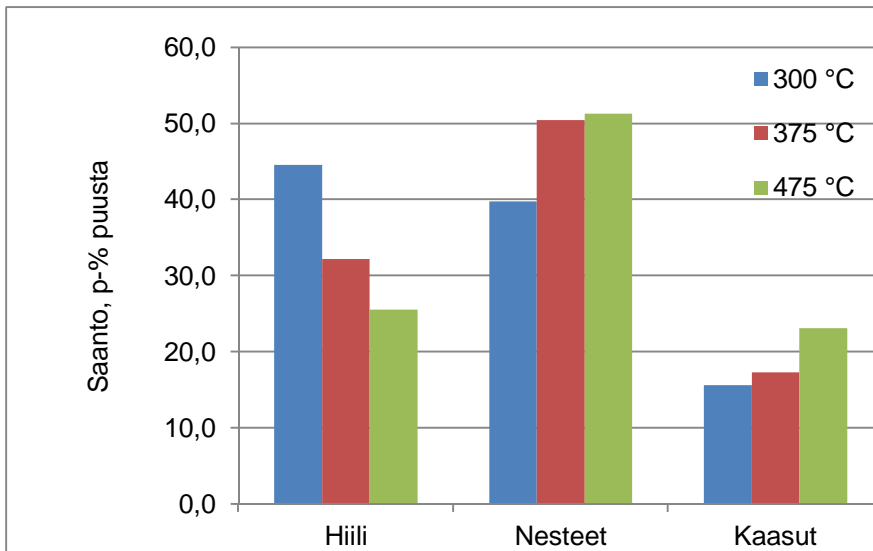
4.5.1 Koeajojen massataseet

Koeajojen ensimmäisessä vaiheessa (noin $< 300\text{ °C}$) kerätyn tisleen (tisle A) määrä koeajoissa oli keskimäärin 21 p-% lähtöraaka-aineesta. Matalalämpötilakoeajossa uunin ohjauslämpötila nostettiin ensimmäisen vaiheen jälkeen 300 °C :seen, jossa pitoaika oli 4 tuntia. Tisleen B määrä oli keskimäärin 19 p-%, hiilen määrä 45 p-% ja kaasujen osuus erotuksena 16 p-% laskettuna lähtöraaka-aineesta. Tisleen B osuus koko koeajon tisleestä oli 52 p-%.

Keskilämpötilakoeajossa uunin ohjauslämpötila nostettiin ensimmäisen vaiheen jälkeen 375 °C :seen, jossa pitoaika oli 4 tuntia. Tisleen B määrä oli keskimäärin 30 p-%, hiilen määrä 32 p-% ja kaasujen osuus 17 p-% lähtöraaka-aineesta. Tisleen B määrä oli huomattavasti suurempi kuin 300 °C :n koeajossa, ja osuus koko tisleestä oli 59 p-%. Puuaineksen hitaassa pyrolyysissä 270 °C :n lämpötilassa alkaa voimakas hemiselluloosien ja selluloosan hajoaminen, ja tislettä muodostuu enemmän.

Korkealämpötilakoeajossa uunin ohjauslämpötila nostettiin ensimmäisen vaiheen jälkeen 475 °C :seen, jossa pitoaika oli 4 tuntia. Tisleen B määrä oli keskimäärin 31 p-%, hiilen määrä 26 p-% ja kaasujen osuus 23 p-% lähtöraaka-aineesta. Tisleen määrä ja osuus koeajon koko tisleestä eivät merkittävästi eronneet 375 °C :n ajon B-tisleen vastaavista arvoista.

Koeajoissa eri lämpötiloissa saatujen hiilien, tisleiden ja kaasujen massa-annot on yhteenvetona esitetty kuvassa 4.3. Ajojen hiilisaannot pienuivat merkittävästi hiiltymisen edetessä.



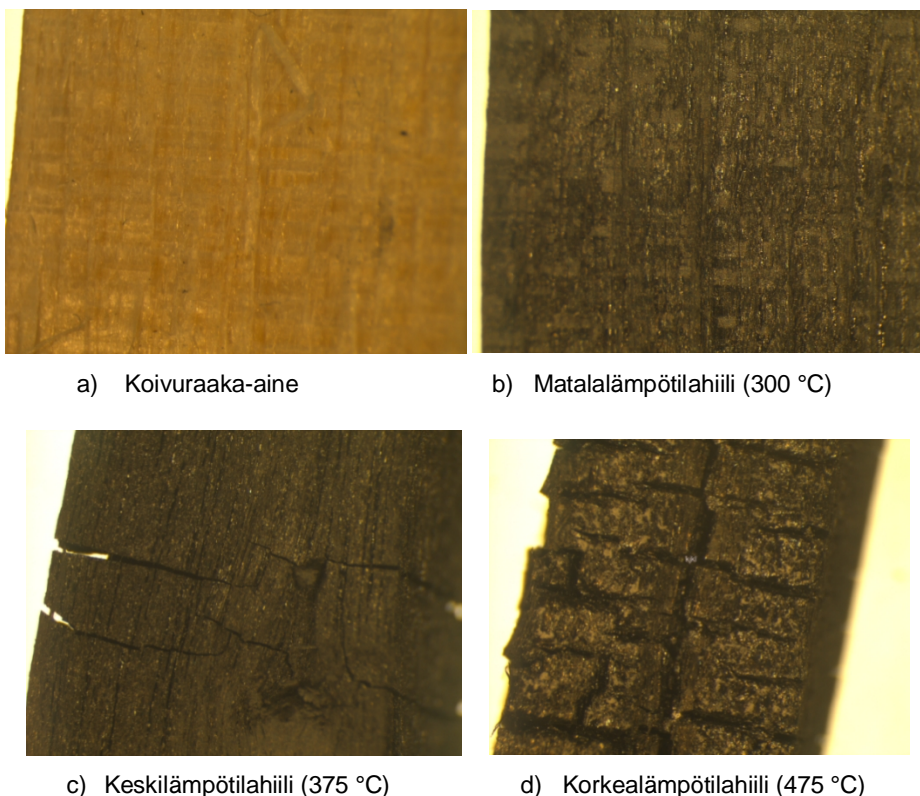
Kuva 4.3. Hiilen, nesteiden ja kaasujen saannot eri hiiltolämpötiloissa hidaspYROLYYSIKOEajoissa. Nesteet sisältävät ensimmäisen vaiheen tisleen (A) saannot (keskiarvo 21 p-% puusta) ja toisen vaiheen tisleen (B) saannot (19–31 p-% puusta).

4.5.2 Tuotehiilien ominaisuudet

Hiilien hiiltoaste ja ulkonäkö muuttuivat ajojen loppulämpötilan noustessa. 300 °C:n lämpötilassa saatu hiili oli vaaleinta ja osittain puunväristä ja 475 °C:n hiili oli grillihiilen kaltaista. Kuvassa 4.4 on esitetty 375 °C:ssa ja 475 °C:ssa saatuja hiiliä. Raaka-aineen ja eri lämpötiloissa saatujen hiilien sivuilta otetut mikroskooppikuvat osoittavat, miten sivun ulkonäkö muuttui hiiltolämpötilan noustessa (kuva 4.5). Hiiltyminen näkyi lämpötilan noustessa.



Kuva 4.4. Keskilämpötila-ajossa (375 °C) (vasemmalla) ja korkealämpötila-ajossa (475 °C) (oikealla) tuotettuja hiiliä.



Kuva 4.5. Koivuraaka-aineen ja eri hiiltolämpötiloissa saatujen hiilien sivulta otetut mikroskooppikuvat.

Hiilien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.2. Hiiltymisen edetessä hiilipitoisuudet kasvoivat ja haihtuvien aineiden pitoisuudet pienenevät hiilissä. Hiiltolämpötilan 475 °C hiili oli laadultaan hyvää grillihiiltä, sillä sen tuhkapitoisuus oli pieni ja kiinteän hiilen pitoisuus oli huomattavasti yli vaaditun 75 %:n pitoisuuden eurooppalaisen standardin (EN 1860-2) mukaan. Ominaispinta-ala jäi pieneksi matalammissa lämpötiloissa valmistetuissa hiilissä ja nousi merkittävästi vasta korkealämpötilahiilellä.

Hiiltolämpötilan 300 °C hiili sisälsi PAH-yhdisteitä vain yhteensä 194 µg/kg, joista EPA 16-luokitukseen (EPA:n ympäristölle haitallisiksi määrittelemät PAH-yhdisteet) kuuluvia 89 µg/kg. PAH-yhdisteitä muodostui 375 °C:n hiileen merkittävästi enemmän (4100 µg/kg), ja ne koostuivat lähinnä naftaleeneista ja kolmirenkaisista yhdisteistä, joista monet, esim. fenantreeni, on todettu haitallisiksi toksisiksi yhdisteiksi. Korkeassa 475 °C:n hiiltolämpötilassa PAH-yhdisteiden määrä hiilessä väheni yhdisteiden osittain hiiltyessä.

4. Koivupuun hiiltoajot koelaitteistolla

Taulukko 4.2. Eri hiiltolämpötiloissa tuotettujen hiilien ominaisuudet.

Hiiltolämpötila	Matala lämpötila 300 °C	Keskilämpötila 375 °C	Korkea lämpötila 475 °C
Kosteuspitoisuus, p-%	0,2	0,5	0,0
Tuhkapitoisuus, p-% (ka.)	0,5	0,7	1,0
Haihtuvat aineet, p-% (ka.)	48,0	30,0	17,2
Kiinteä hiili, p-% (ka.)	51,5	69,3	81,8
Hiilipitoisuus (C), p-% (ka.)	71,6	80,3	88,5
Vetytuloisuus (H), p-% (ka.)	4,9	3,9	3,1
Typpipitoisuus (N), p-% (ka.)	0,2	0,3	0,3
Rikkipitoisuus (S), p-% (ka.)	0,01	0,01	0,01
Happipitoisuus (O), p-% (ka.) ¹⁾	23	15	7
Lämpöarvo HHV, MJ/kg	27,2	30,1	33,1
Ominaispinta-ala, m ² /g	2,2	6,4	43,5

1) Erotuksena: 100 % – (CHNS ja tuhka)

4.5.3 Tisleiden koostumus

Tisleen muodostumista koeajon ensimmäisen vaiheen aikana tutkittiin mittaamalla tisleen määrä 0,5 tunnin välein. Tislettä alkoi muodostua ensimmäisen tunnin jälkeen, jolloin lämpötila reaktorissa oli noin 150 °C. Koska lämmönsiirto reaktorissa on hidasta, alkoi raaka-aineen sisältämä vesi vasta tällöin vapautua. Tisleen määrä kasvoi lähes lineaarisesti. Koeajon kahden ensimmäisen tunnin jälkeen (lämpötilaväliltä 150–225 °C) kerätty tisle oli kirkasta, vaaleankeltaista ja puunhajuista vettä. Vaiheen lopussa kerätty tisle oli punaruskeaa ja pistävänhajuista.

Koeajojen yhdistetty ensimmäisen vaiheen tisle (kokoomatisle A) oli kirkasta oranssinpunaista vesimäistä nestettä ja siinä oli voimakas, pistävä ja etikkainen haju (kuva 4.6). Tisle ei sisältänyt erottuvaa eikä liukoista tervaa. Tisleen pH oli 2,6 ja vesipitoisuus 77 p-%. Orgaanisen aineksen määrä oli 23 p-%, TOC 90 g/L, COD 300 g/L ja TAN-luku 135 mg KOH/g. Kvantitoitujen vesiliukoisten yhdisteiden määrä oli 19 p-%, joka koostui pääosin etikkahaposta (80 %), metanolista (8 %) ja furfuraalista (7 %). Tisleen haihdutusjäännös oli 5 p-%, joka koostui pääosiltaan sokeriaineksesta. Tisle ei sisältänyt PAH-yhdisteitä (< 0,1 mg/kg).

Kuvassa 4.6 on esitetty ensimmäisen vaiheen tisleen lisäksi eri lämpötiloissa saadut toisen vaiheen tisleet.



Kuva 4.6. Ensimmäisen vaiheen tisle (kokoomatisle A) ja 300, 375 ja 475 °C:n hiiltokoeajojen tisleet B (vasemmalta oikealle).

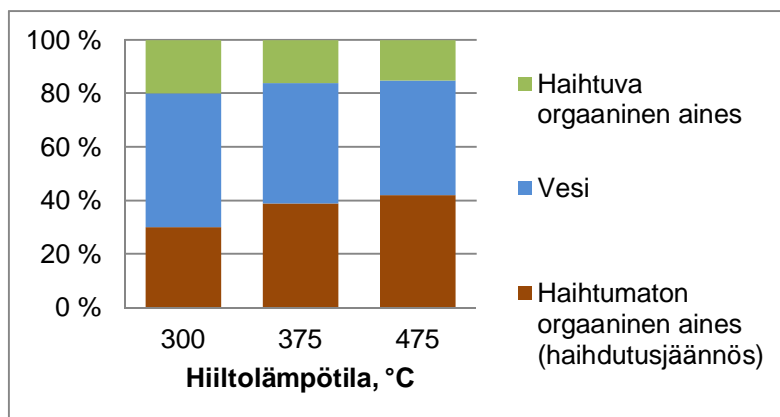
Matalalämpötila-ajon (300 °C) tisle B oli väriltään mustan ruskeaa, homogeenista eikä siinä ollut erottuvaa tervafaasia. Se sisälsi orgaanista ainesta 50 p-% (pH 2,6), haihdutusjäännöstä 30 p-% ja myös liukoista tervaa 3,3 p-%. Tisle ei sisältänyt haitallisia määriä PAH-yhdisteitä, joiden määrä 3,9 mg/kg koostui lähinnä naftaleeneista. Tisleen lämpöarvo (HHV) oli 10,6 MJ/kg.

Keskilämpötila-ajon (375 °C) tisle B oli lähes mustaa epähomogeenista ja tervanhajuista. Siinä oli tervaklönttejä ja astian pohjalle muodostui vähän lietemäistä juoksevaa tervaa. Tisleessä oli selvästi enemmän orgaanista ainesta (55 p-%), haihdutusjäännöstä (39 p-%) ja liukoista tervaa (10 p-%) kuin vastaavassa 300 °C:n ajon tisleessä. PAH-yhdisteiden määrä oli 29 mg/kg, josta naftaleenien osuus oli noin 60 p-%. Myös tisleelle määritetty lämpöarvo (12,6 MJ/kg, HHV) oli korkeampi.

Korkealämpötila-ajon (475 °C) tisle B oli jo mustaa epähomogeenista ja tervanhajuista. Näyteastian pohjalle oli kerrostunut lietemäistä tervaa. Tisle sisälsi hieman enemmän orgaanista ainesta (57 p-%), haihdutusjäännöstä (42 p-%) ja liukoista tervaa (11 p-%) kuin vastaava 375 °C:n koeajon tisle. Tisleen lämpöarvo (HHV) oli 12,9 MJ/kg. PAH-yhdisteiden määrä oli lisääntynyt (74 mg/kg). PAH-yhdisteet sisälsivät naftaleeneja (noin 60 p-%) sekä pieniä määriä haitallisia suurempimolekyylisiä yhdisteitä.

Matalalämpötila-ajon toisen vaiheen tisle erosi sekä määrällisesti (kuva 4.3) että koostumuksellisesti (kuva 4.7, taulukko 4.3) muiden ajojen vastaavista tisleistä. Toisen vaiheen tisleet erosivat selvästi ensimmäisen vaiheen tisleestä, joka oli tervavapaata, kirkasta ja oranssinpunaista (kuva 4.6).

4. Koivupuun hiiltoajot koelaitteistolla



Kuva 4.7. Toisen vaiheen tisleiden (tisleet B) pääaineskoostumus.

Taulukko 4.3. Toisen vaiheen tisleiden (tisleet B) alkuainekoostumus.

Hiiltoajon lämpötila	Matala lämpötila 300 °C	Keskilämpötila 375 °C	Korkea lämpötila 475 °C
Hiilipitoisuus (C), p-%	24,7	29,2	30,2
Vetyypitoisuus (H), p-%	9,2	8,8	8,8
Typpipitoisuus (N), p-%	0,1	< 0,1	< 0,1
Happipitoisuus (O) ¹⁾ p-%	66	62	61

1) Erotuksena: 100 % – (CHN)

4.6 Johtopäätökset

- Hidaspyrolyysireaktorin suunnittelu ja toteutus erilaisten hiilien ja tisleiden tuottamiseksi ja prosessin optimoimiseksi onnistui. Tavoitteet erilaisten hiilien tuottamiseksi sovellustesteihin saavutettiin.
- Optimoitiin kaksivaiheinen ajo-ohjelma tervavapaan tisleen ("puhdastisle") saamiseksi ja sen määrän maksimoimiseksi. Ainoana muuttujana koeajoissa oli hiillon loppulämpötila.
- Kokeiden perusteella löydettiin lämpötilat (matala lämpötila 300 °C, keskilämpötila 375 °C ja korkea lämpötila 475 °C) selkeiden erojen saamiseksi eri hiilien välille. Matalassa lämpötilassa saadun hiilen saanto oli korkea ja kiinteän hiilen pitoisuus hiilessä matala (52 %). Keskilämpötilassa hiilen saanto pieneni ja vastaavasti kiinteän hiilen pitoisuus kasvoi. Hiilen ominaispinta-ala oli kuitenkin edelleen hyvin pieni. Korkean lämpötilan hiili vastasi hyvälaatuista grillihiiltä. Sen ominaispinta-alkin oli 44 m²/g.

- Ensimmäisessä vaiheessa saatu "puhdastisle" on hyödynnettävissä esim. karkotteena ja rikkakasvien torjunta-aineena. Hiiltoämpötiloissa 375 ja 475 °C saadut toisen vaiheen tisleet erosivat määrällisesti ja koostumuksellisesti matalan lämpötilan ajon vastaavasta tisleestä. Koska ne sisälsivät tervaa, voidaan ne hyödyntää prosessissa energiana.
- Kehitetyllä kaksivaiheisella lämpötilaohjelmalla voidaan optimoida hiilen ja nesteiden saantoa ja laatua.

5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä

5.1 Johdanto

Biohiili on kiinteä aine, joka on valmistettu orgaanisesta aineesta kuumentamalla sitä hapettomassa tilassa. Maahan lisättynä biohiili voi vaikuttaa maan toimintaan. Ensimmäisenä näkyvät suorat vaikutukset maan happamuuteen sekä kasveille käyttökelpoisen veden ja ravinteiden määrään. Tämän jälkeen alkavat muutokset mikrobitasolla ja maan biokemiallisissa prosesseissa. Maaperän eliöt ovat osa kokonaisuutta, jossa yhden osan häiriintyminen voi vaikuttaa lukuisiin muihin eliöihin ja prosesseihin. Muutosten takia kasvien juuriston kehitys ja ravinnetalous sekä aineenvaihdunta voivat häiriintyä ja johtaa muutoksiin kasvin kasvussa ja maan kasvihuonekaasupäästöissä [12]. Biohiilen aiheuttamat muutokset ovat suurempia vähän orgaanista ainesta sisältävissä maissa kuin hyvän vedenpidätyskyvyn, korkean ravinnetason ja biologisen aktiivisuuden omaavissa maissa [13]. Koska biohiilen tuotannossa käytetty biomassa ja hiilto-olosuhteet vaihtelevat, eri hiilten vasteet maaperässä voivat olla erilaisia. Biohiiltä maahan lisättäessä on pyrittävä siihen, että maaperän eliöt ja kasvit kykenevät jatkossakin huolehtimaan maan toiminnasta. Lisättävän biohiilen laatu ja sen aiheuttamat vasteet maaperässä on siis tunnettava tarkasti.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, vaikuttaako biohiilen tuotantolämpötila (hiiltoaste) sen aiheuttamiin fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin muutoksiin maaperässä. Kasvihuoneessa toteutetussa ruukku/pottikokeessa pellolta otettu maa ja tutkittavat hiilet sekoitettiin tasalaatuisiksi kasvualustaksi. Pellolta otetun maan mukana tulivat maan luontaiset mikrobit. Juuristovyöhykkeen ekosysteemi toimii kokonaisuutena, jossa mikään tekijä ei vaikuta yksinään kasvien veden ja ravinteiden ottoon tai kehitykseen [14]. Kokeissa käytetyt hiilimäärät olivat suuria, koska tavoitteena oli selvittää hiililaatujen keskinäisiä eroja sekä mahdollisia haittavaikutuksia. Mittauksilla osoitettiin kolmen eri lämpötilassa tuotetun hiilen vaikutukset: a) kasveille käyttökelpoisen veden määrään, b) maan happamuuteen, c) johtokykyyn, d) mikrobitoimintaan sekä e) sukkulamatoihin.

International Biochar Initiative (IBI) julkaisi vuonna 2012 biohiilistandardin, jonka mukaan maahan levitettävän biohiilen laadun varmistamiseksi myös hiilen vaikutukset lierojen käyttäytymiseen ja lehtisalaatin itävyyteen on testattava [15]. Eri lämpötiloissa tuotettujen hiilten vaikutusta lierojen käyttäytymiseen tutkittiin labora-

torikokeessa ja lehtisalaatin itämiseen selvitettiin em. pottikokeen yhteydessä. Standardin vaatimien testien lisäksi tutkittiin hiilten vaikutusta lierojen kuolleisuuteen sekä lehtisalaatin kasvuun ja typpipitoisuuteen.

5.2 Aineisto ja menetelmät

5.2.1 Kasvihuonekokeen koemaa ja hiilet

Kasvihuonekokeissa käytetyt hiilet oli tuotettu VTT:n hidaspYROLYYSIKOELAITTEISTOLLA kolmessa eri hiiltölämpötilassa: 300 °C (matalalämpötilahiili), 375 °C (keskilämpötilahiili) ja 475 °C (korkealämpötilahiili). VTT:llä murskatut ja < 10 mm:n raekokoon seulotut hiilet murskattiin edelleen manuaalisesti ja seulottiin < 2 mm:n raekokoon.

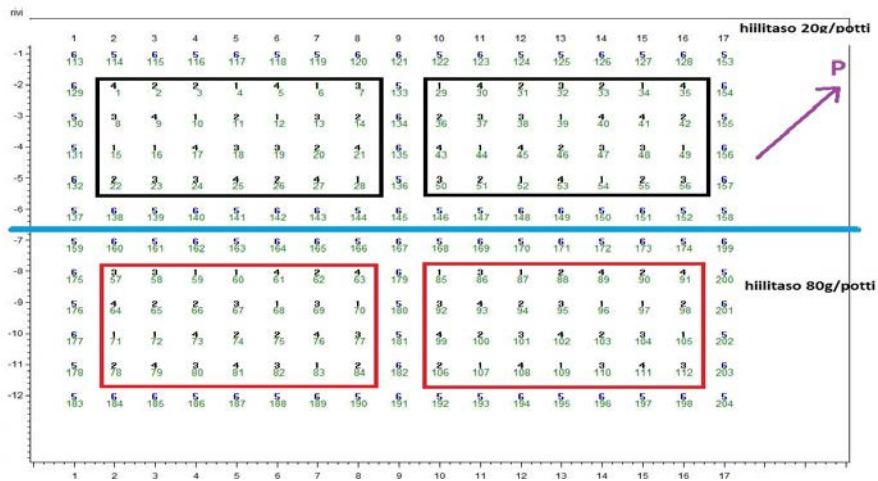
Koemaaksi valittiin niukkaravinteinen ja hiekkapitoinen peltomaata. Tavoitteena oli saada mahdollisimman vähän orgaanista ainesta ja ravinteita sisältävää maata, jossa oli luonnonmukainen peltomaan mikrobisto. Maat säilytettiin muovisäkeissä kylmässä varastossa (+10 °C). Säkeistä otettiin maanäytteet viljavuusanalyysiä ja mekaanista maalajimäärittystä varten. Määritykset tehtiin MTT:n yleisiä analyysimenetelmiä käyttäen. Koetta varten maata hienonnettiin ja kasteltiin hanavedellä (500 ml/10 L) sekä siitä poistettiin lierot.

Mekaanisen maalajimäärityksen mukaan koemaa oli pääosin karkeaa hietaa (56 %), joka on viljelyominaisuuksiltaan kuohkeaa, lievästi poutivaa maata. Viljavuusanalyysin mukaan maan pH 6,0 oli tyydyttävä, kalsiumpitoisuus (1004 mg/L maata) välttävä, kaliumpitoisuus (123 mg/L) tyydyttävä, magnesiumpitoisuus (46 mg/L) huono ja fosforipitoisuus (31 mg/L) korkea. Maata oli lähes tyyppiä (typpipitoisuus 0,06 % ilmakeivässä maassa) ja maan hiilipitoisuus oli 2,14 %. Maan vedenpidätyskyky oli 11,1 % ja johtoluku $0,68 \cdot 10^{-4}$ (S/cm). Murskatun hiilen partikkelikokojakauma oli 25 % (2–1,2 mm), 25 % (1,2–0,6 mm), 20 % (0,6–0,4 mm), 22 % (0,4–0,2 mm) ja 17 % (0–0,2 mm).

5.2.2 Sekoitukset ja koeasetelma kasvihuoneessa

Koe toteutettiin kasvihuoneessa samanaikaisesti kahtena rinnakkaisena kokeena. Koeasetelmaa esittävän kuvan 5.1 ensimmäisessä pöydässä koemaiden biohiilipitoisuus oli 20 g/potti, joka vastaa laskennallisesti lisäyhtäsoa 20 t/ha (kokeet a ja b) ja toisen koepöydän 80 g/potti (80 t/ha, kokeet c ja d). Hiilen määrän laskennassa oletuksena oli hiilen tasainen sekoittuminen 10 cm:n kerrokseen. Myös pottien korkeus oli 10 cm. Jokaista koepottia varten maata ja hiiliä punnittiin erikseen, yhdistettiin ja sekoitettiin. Maata punnittiin 1320 g ja hiiliä 20 g tai 80 g.

5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä



Kuva 5.1. Astiakokeen koeariutus kasvihuoneen pöydillä. Kaaviossa varsinaisten koepottien paikat on satunnaistettu suorakaiteiden rajaaman alueen sisällä. Niitä ympäröivissä suojarivien poteissa kasvatettiin raiheinää. Ensimmäisen pöydän biohiilitaso 20 g/potti (kokeet a ja b) ja toisen 80 g/potti (kokeet c ja d). Käsittelet: 1) kontrolli = hieletön, 2) hiili, 300 °C, 3) hiili, 375 °C ja 4) hiili, 475 °C.

Hiililisyksen jälkeen maasta otettiin näytteet tilavuuspainon määrittämistä varten. Potteihin laitettujen maiden ominaispainot olivat 1103 g/L (hieletön), 1058 g/L (hiiltä 20 g/potti) ja 1037 g/L (hiiltä 80 g/potti). Koemaat lannoitettiin Yara Combi 1 (14-11-25) -lannoitteella 1,8-prosenttisena liuksena. Tavoitteena oli saada lannoitus-taso 250 ml tyyppiä/litra maata. Lannoitteenestein lisäys laski maan pinnan niin, että tarvittava määrä maata saatiin yhden litran pottiin.

Koepottien täytön yhteydessä (kuva 5.2) suoritettiin ensimmäinen lannoitus (25 ml/potti). Täytön jälkeen potit siirrettiin kasvihuoneeseen ja peitettiin muovilla. Kokeen aikana kasvihuoneiden lämpötila säädettiin kunkin kasvin kasvurytmin edellyttämällä tavalla. Kasvihuoneen kosteutta ja lämpötilaa seurattiin.



Kuva 5.2. Hiilet murskattiin erikoistilassa, jossa on pölyn poisto (vasen kuva). Maat seulottiin ja punnittiin ennen hiilien lisäystä. Potit täytettiin maahiilliseoksella ja tiivistettiin vakioidulla painolla ennen lannoituskastelua. Siitä alkoi kokeen muhitusvaihe ja potit siirrettiin kasvihuoneeseen vakiolämpötilaan (20 °C).

5.2.3 Toksisuuskoje lehtisalaatilla

Ennen varsinaisten kasvikokeiden alkua koeastioita ”muhitettiin” MTT:n kasvihuoneessa viisi viikkoa. Kasvikokeet on kuvattu luvussa 6. Muhitusten aikana toteutettiin salaatin (*Lactuca sativa*) idätyskoje IBI:n standardin [15] mukaisesti. Maiden muhittua 3 vrk jokaiseen astiaan (56 toistoa tasoilla 20 ja 80 g/potti) kylvettiin 10 lehtisalaatin siementä. Siementen itävyys tarkastettiin 2 vrk:n välein. Koje purettiin 14 vrk:n kuluttua (kuva 5.3), jolloin taimien märkä- ja kuivapainot punnittiin sekä typpipitoisuus määritettiin.



Kuva 5.3. Lehtisalaatin idätyskoje. Siementen itävyys ja taimien kuivapainot mitattiin 14 vrk kylvön jälkeen.

5.2.4 Mittaukset poteista

Koemaiden vesipitoisuus mitattiin Grodan WCM -laitteella. Laitteen anturi mittaa digitaalisesti vesipitoisuutta (WC, tilavuusprosentteina), johtokykyä (EC, mS/cm) ja lämpötilaa. Grodan-mittarin käyttökelpoisuus hiilikokeissa osoittautui vain ”suuntaa antavaksi”, koska laitetta ei ole alkujaan kehitetty hiiltä sisältävien maiden analysointiin¹. Mittauksia laitteella tehtiin kokeen aikana 20 kertaa.

Hiilten pH mitattiin ilmatiiviissä astioissa säilytetyistä hiilinäytteistä. Koemaiden pH:t mitattiin toisella näytteenotokerralla 25.9.2012 otetuista maanäytteistä. Mittaus tehtiin 1:5 (maa:tisle, v/v) vesiliuoksesta (5 min ravistelu + 24 h stabilointi huoneenlämmössä).

Viljelykokeiden päätyttyä toukokuussa 2013 poteissa olleiden maiden annettiin kuivua +20 °C:n lämpötilassa. Maan vedenpidätyskyky mitattiin kokeen poteista otetuista näytemaista heinäkuussa 2013. Suodatinpaperilla vuorattuihin suppiloihin lisättiin 200 g hyvin sekoitettua maata, jonka läpi valutettiin 250 ml vettä. Läpi valuneen sekä maahan imeytyneen (paino) veden määrät mitattiin.

5.2.5 Mikrobitoiminnan ja sukkulamatojen analysointi

Hiilten vaikutukset maan mikrobiaktiivisuuteen ja -biomassaan sekä sukkulamatojen määriin ja yhteisörakenteeseen mitattiin poteista 4, 10 ja 42 viikkoa hiilen lisäksi maahan. Näytteet otettiin muhitusvaiheen jälkeen (I), ensimmäisen kasvin (retiisi) kasvukauden jälkeen (II) sekä kokeen lopuksi kolmen kasvin (retiisi, ohra ja raiheinä) vuoroviljelyn päätyttyä (III).

Sukkulamadot erotettiin maanäytteistä (n. 5 g) märkäsuppilomenetelmää käytäten. Tämän jälkeen jokaisen näytteen sukkulamadot laskettiin ja vähintään 50 yksilön ravinnonkäyttöryhmä/näyte (bakteerin-, kasvin- tai juurensyöjä, omnivori tai peto) tunnistettiin binokulaarimikroskoopilla.

Mikrobitoiminnan analysoimiseksi maat (n. 20 g) punnittiin laboratoriossa lasiasioihin ja maiden kosteus tasattiin. Suljetut astiat jätettiin yöksi huoneen lämpöön (+20 °C). Tämän jälkeen aloitettiin mittaukset Apollo 9000 -hiilianalysointilaitteella. Ilmanäytteet otettiin korkin septumin läpi. Mikrobibiomassan laskemiseksi mikrobit aktivoitiin lisäämällä purkkeihin glukoosiliuosta (glukoosin määrä 2 % maan tuorepainosta).

Hiilten hajoamista/abiottista hiilituotantoa mitattiin Apollo 9000 -hiilianalysointilaitteella. Hiilet (n. 10 g) punnittiin astioihin, niihin lisättiin 5 ml vettä ja annettiin stabiloitua 2 h ajan. Tämän jälkeen hiilten tuottaman hiilidioksidin määrä mitattiin kahden mittauksen välisenä erotuksena yllä kuvatulla tavalla.

¹ http://www.grodan.com/files/GR-EN/Marketing%20Material/WGM/FIN/Continu_Installation_manual_FIN.pdf

5.2.6 Lierokokeet

Lierojen käyttäytymiskokeissa käytettiin lajina tunkiolieroa (*Eisenia fetida*). Kokeet tehtiin Van Zwieten ym. [16] ohjeen mukaan ja OECD:n ohjetta [17] mukaillen. Muoviastiat (170 × 120 × 70 mm) jaettiin kahteen osaan väliseinällä. Käsittelyissä maan kosteuspitoisuus säädettiin 70 %:iin maan vedenpidätyskyvystä. Maa ja biohiili (200 g mp) laitettiin toiselle puolelle ja kontrollimaa toiselle puolelle astiaa. Biohiilen määränä käytettiin 15 t/ha (15 g/kg). Tämän jälkeen väliseinä otettiin pois ja maata taputettiin kevyesti, jotta molempien maiden pinta saatiin samalle tasolle eikä väliin jäänyt tyhjää tilaa. Kokeessa oli 10 toistoa/käsittely. Maan pH:ta ei säädetty. Kymmenen sukukypsää lieroa asetettiin jokaisen astian keskelle ja kansi suljettiin kaikkien lierojen kaivauduttua maahan. Astiat laitettiin kasvatuskaappiin 22 °C (±2 °C) jatkuvaan valaistukseen. 48 h:n kuluttua astiat otettiin varovasti lämpökaapista ja maat jaettiin puolivälisestä muoviseinällä. Molemmilla puolilla olevat lierot laskettiin erikseen. Laskemisen jälkeen väliseinät palautettiin astioihin, minkä jälkeen maat lisättiin astioihin. Tämän jälkeen väliseinät poistettiin, maiden pinnat tasattiin samalle tasolle ja lierot asetettiin astioiden keskelle. Seuraava purku toistettiin samalla tavalla 7 vrk:n kuluttua.

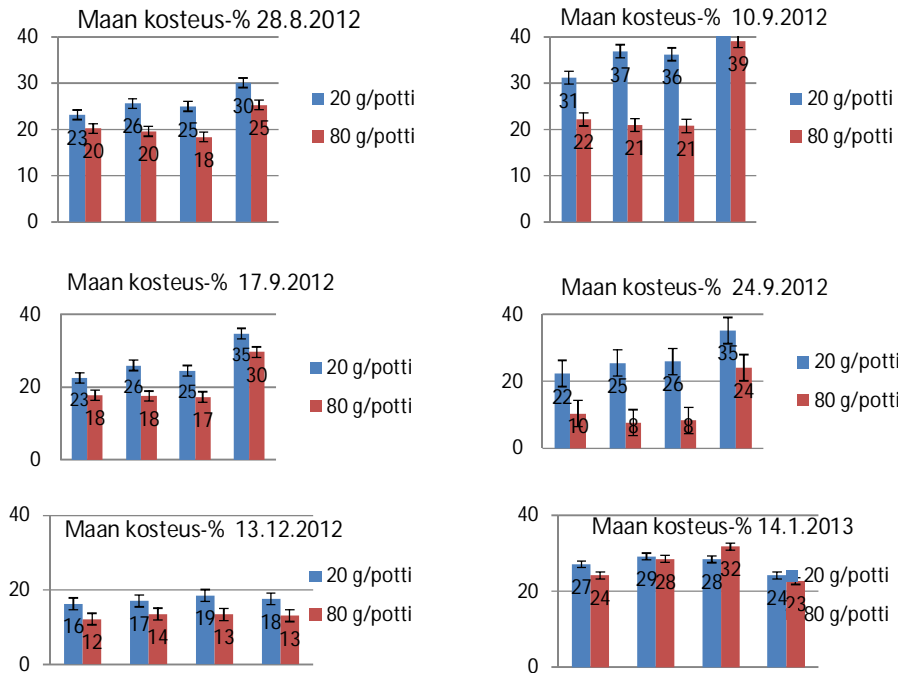
Eri lämpötiloissa tuotettujen biohiiltien toksisuus lierolle (*Eisenia fetida*) määritettiin OECD:n [17] mukaan. Keinotekoinen maa tehtiin ohjeen mukaan, ja se sisälsi 10 % turvetta, 20 % kaoliinisavea ja 70 % kvartsihiekkää ja pH säädettiin tasolle 6,0±0,5 kalsiumkarbonaatilla. Käytetyt hiilitasot olivat 25, 43, 72 and 123 t/ha (1,7, 2,8, 4,8 ja 8,2 % kuivapainosta). Kaikki tuotetut hiilet testattiin samanaikaisesti. Maa ja hiili sekoitettiin toisiinsa ja kosteus säädettiin 70 %:iin maan vedenpidätyskyvystä. Jokaiseen astiaan punnittiin maata/sekoitusta 750 g. Toistojen määrä oli neljä. Elävien lierojen määrä astioissa laskettiin 7 ja 14 vrk:n kuluttua kokeen aloittamisesta.

5.3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

5.3.1 Vesi imeytyi biohiileen heti sekoituksen jälkeen

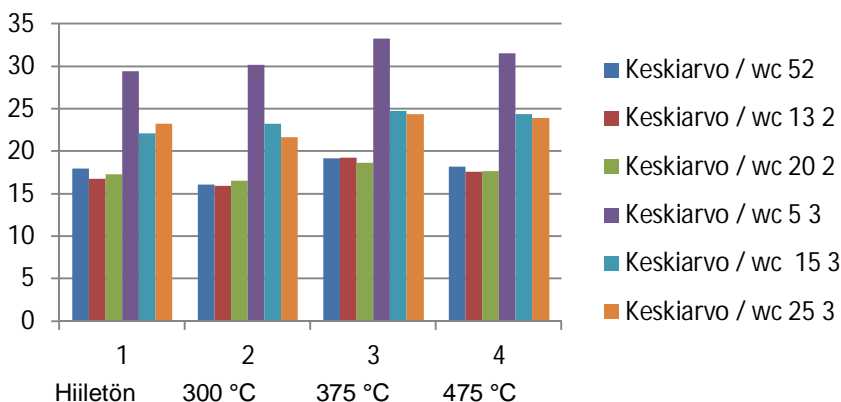
Maiden vesipitoisuusmittausten tulokset osoittivat, että kaikki hiilet sitoivat vettä välittömästi sekoituksen jälkeen. Suurempi hiilimäärä (80 g/potti) sitoi enemmän kuin pienempi määrä (20 g/potti). Hiilen lisääminen piti kosteuden alhaisena pottien talvilepovaiheeseen saakka, vaikka kasveja kasteltiin koko ajan. Talvilevon aikana (potit kylmässä ja pimeässä kasvihuoneessa ilman kasveja) hiilettömien ja hiilellisten pottien kosteudet tasoittuivat. Talvilevon jälkeinen kastelu vaikutti samalla tavalla kaikkien hiiltä sisältäneiden pottien kosteuteen, ja mitta-arvot pysyivät käytännöllisesti katsoen lähes samalla tasolla koko raiheinän viljelyn ajan (3 kk). Hiilien väliset erot tulivat esiin vasta talvilevon jälkeen, jolloin 300 °C:ssa valmistettua hiiltä sisältäneiden pottien kosteus oli hieman pienempi kuin muita hiiliä sisältäneissä poteissa. Hiiletön maa ja 300 °C:n hiiltä sisältänyt maa olivat silloin (14.1.2013) yhtä kosteita. Maiden kosteudet on esitetty kuvassa 5.4.

5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä



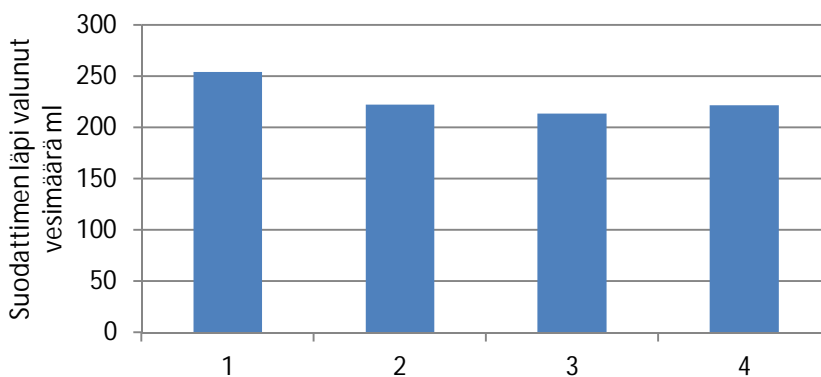
Kuva 5.4. Biohiilen vaikutus maan kosteuteen eri hiilipitoisuuksilla. Vasemmalla ylimpänä on 300 °C:n hiiltä, keskellä 375 °C:n hiiltä ja alimpana 475 °C:n hiiltä sisältävien maiden kosteudet potissa. Oikealla ovat hiilettömien kontrollimaiden kosteudet.

Hiilten välillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja, vaikka 375 °C:ssa ja 475 °C:ssa tuotettuja hiiliä sisältäneiden pottien vesipitoisuudet olivat systemaattisesti hieman muita suurempia (kuva 5.5). Ero muhitusvaiheen tilanteeseen oli suuri, eli talvilevon aikana tasoittunut ja muuttunut kosteustilanne säilyi raiheinäkasvatuksen ajan. Kosteus voi selittää osan hiilten positiivisesta vaikutuksesta satoon, mikä on esitetty luvussa 6. Biohiilen edullinen vaikutus maan vesitalouteen ja sitä kautta kasvien kasvuun hiekkamailla on osoitettu monissa tieteellisissä julkaisuissa [13] sekä käytännön viljelyssä.



Kuva 5.5. Maan kosteudet mitattiin poteista viimeisen koekasvin eli raiheinän kasvatuksen aikana 6 kertaa. Hiiltä sisältäneiden maiden kosteudet (%) ovat eri hiilimäärillä (20 g/potti ja 80 g/potti) saatujen keskiarvoja. Potteihin ei lisätty vettä eikä ravinteita 5.3 jälkeen. Värit osoittavat mittauspäivät helmi- ja maaliskuussa.

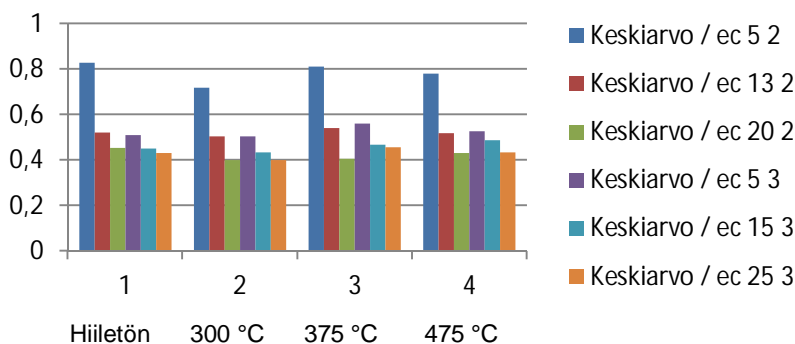
Kasvihuonekokeen jälkeen tehty vedenpidätyskyvyn mittausta osoitti, että kaikki hiilet lisäsivät veden pidättymistä vielä maan kuivatuksenkin jälkeen (kuva 5.6). Biohiilen vaikutukset maassa ovat pitkäaikaisia. Pyrolyysilämpötilalla ei ollut vaikutusta maan vedenpidätyskykyyn.



Kuva 5.6. Eri maahiilisekoitusten vedenpidätyskyky. Suppiloissa oleviin suodatinpusseihin punnittiin 200 g maata (hiekkamaata) tai maahiilisekoitusta. Mittauksessa vettä kaadettiin 250 ml jokaiseen suppiloon, pylväätkä kuvaavat läpi valuneen veden määrää.

Maan johtoluku seurasi mitattuja kosteusarvoja (kuva 5.7). Johtoluku oli korkea, kun vapaata vettä oli paljon ja päinvastoin. Molemmat arvot olivat matalia, kun vettä imeytyi hiileen.

5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä

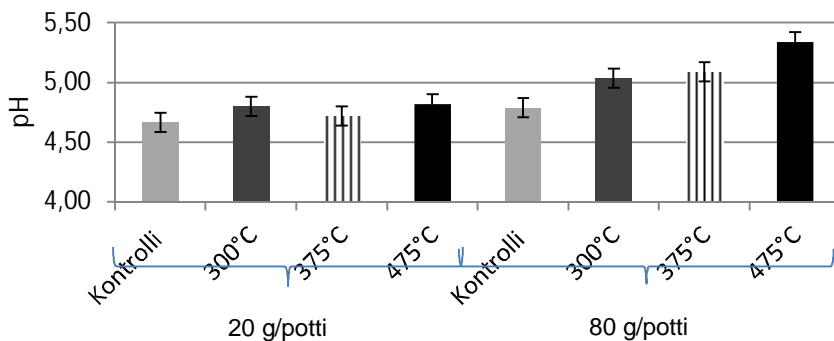


Kuva 5.7. Hiilettömän ja hiilellisten maiden johtolukuarvot (mS/cm) eri ajankohtina. Värit osoittavat mittauspäivät helmi- ja maaliskuussa. Mittaukset tehtiin samalla kertaa kuin kuvan 5.5 kosteusmittaukset. Tulokset ovat kahden hiilimäärän ja 7 kerranteen keskiarvoja (n = 7). Potteihin ei lisätty vettä eikä ravinteita 5.3 jälkeen.

5.3.2 Maan happamuus ei pienistä hiilimääristä muutu

Pyrolyysilämpötilan vaikutus hiilen pH:hon näkyi selvästi. Lämpötiloissa 300 °C ja 375 °C valmistettujen hiilten pH oli 5,1, kun taas 475 °C:ssa valmistetun hiilen pH oli 7,3.

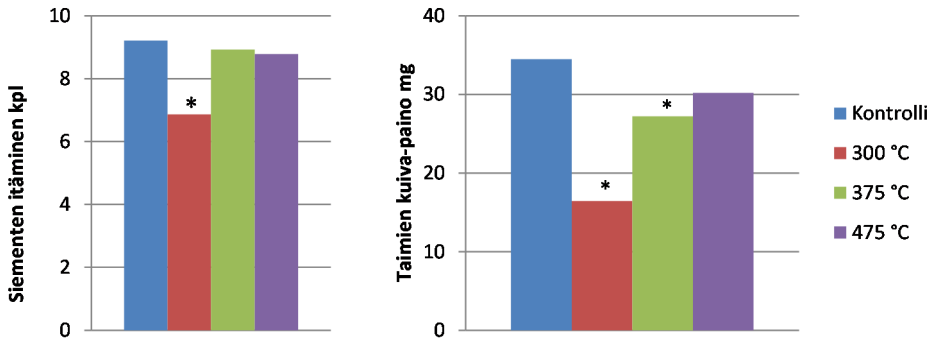
Hiilen lisäys pitoisuudella 20 g/potti nosti maan pH:ta lievästi. Sen sijaan pitoisuudella 80 g/potti hiilet nostivat maan pH:ta selvästi. Suurin nostava vaikutus maan pH:hon oli 475 °C:n hiilellä (kuva 5.8).



Kuva 5.8. Eri hiililämpötiloissa valmistettujen hiilten vaikutus maan happamuuteen (pH) kasvihuonekokeessa 25.9.2012 (keskiarvo ja keskihajonta, n = 3). Kontrollina oli potti, johon ei lisätty hiiltä.

5.3.3 Hiilet vaikuttivat lehtisalaatin itämiseen, kasvuun ja typpipitoisuuteen

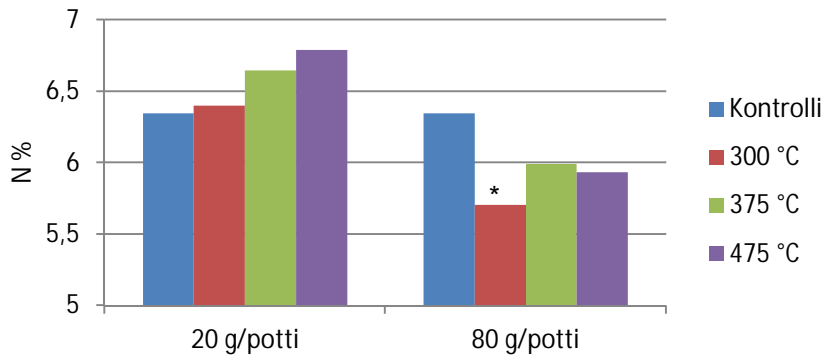
Pitoisuudella 20 g/potti mikään hiilistä ei vaikuttanut lehtisalaatin siementen itävyyteen eikä taimien kuivapainoon. Sen sijaan pitoisuudella 80 g/potti erot eri hiiltien välillä tulivat esiin: 300 °C:n hiili laski lehtisalaatin siementen itävyyttä merkittävästi ja sekä 300 että 375 °C:n hiilet laskivat taimien kuivapainoa merkittävästi (kuva 5.9). Tämä viittaa siihen, että matalammissa lämpötiloissa valmistettuihin hiiliin on mahdollisesti jäänyt lehtisalaatin siementen itävyyttä sekä taimien kasvua heikentäviä yhdisteitä. 475 °C:n hiilessä kyseisten yhdisteiden määrä lienee pienempi eikä vaikutusta lehtisalaatin kasvuun havaittu.



Kuva 5.9. Lehtisalaatin siementen itäminen sekä taimien kuivapaino (keskiarvo) eri hiilillä käsitellyssä (80 g/potti → 80 t/ha) maissa sekä kontrollimaassa 14 vrk kuluttua kokeen aloittamisesta. 300 °C:n hiili laski sekä siementen itävyyttä että kuivapainoa. Myös 375 °C:n hiili laski taimien kuivapainoa. Tilastollisesti merkitsevät erot kontrolliin nähden on merkitty *:llä.

Pitoisuudella 20 g/potti hiilet nostivat salaattintaimien typpipitoisuuksia lievästi, mutta ei tilastollisesti merkittävästi. Erot hiiltien välillä tulivat jälleen esille pitoisuudella 80 g/potti, jolloin 300 °C:n hiili laski taimien typpipitoisuutta merkittävästi (kuva 5.10). Saman hiilen vaikutus pitoisuudella 20 g/potti ja 80 g/potti erosi merkittävästi toisistaan (esim. punaiset pylväät kuvassa 5.10), mikä osoittaa, että pienellä hiilimäärällä voi olla positiivinen vaikutus taimen typpipitoisuuteen, kun taas suuri määrä vaikuttaa typpipitoisuutta laskevasti. Maahan laitettavan hiilen laatu vaikuttaa sen aiheuttamaan vasteeseen kasvissa. Matalimman hiilolämpötilan (300 °C) hiilellä negatiiviset vaikutukset lehtisalaatin itämiseen, kasvuun ja typpipitoisuuteen ovat selvimmän näkyvissä.

5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä



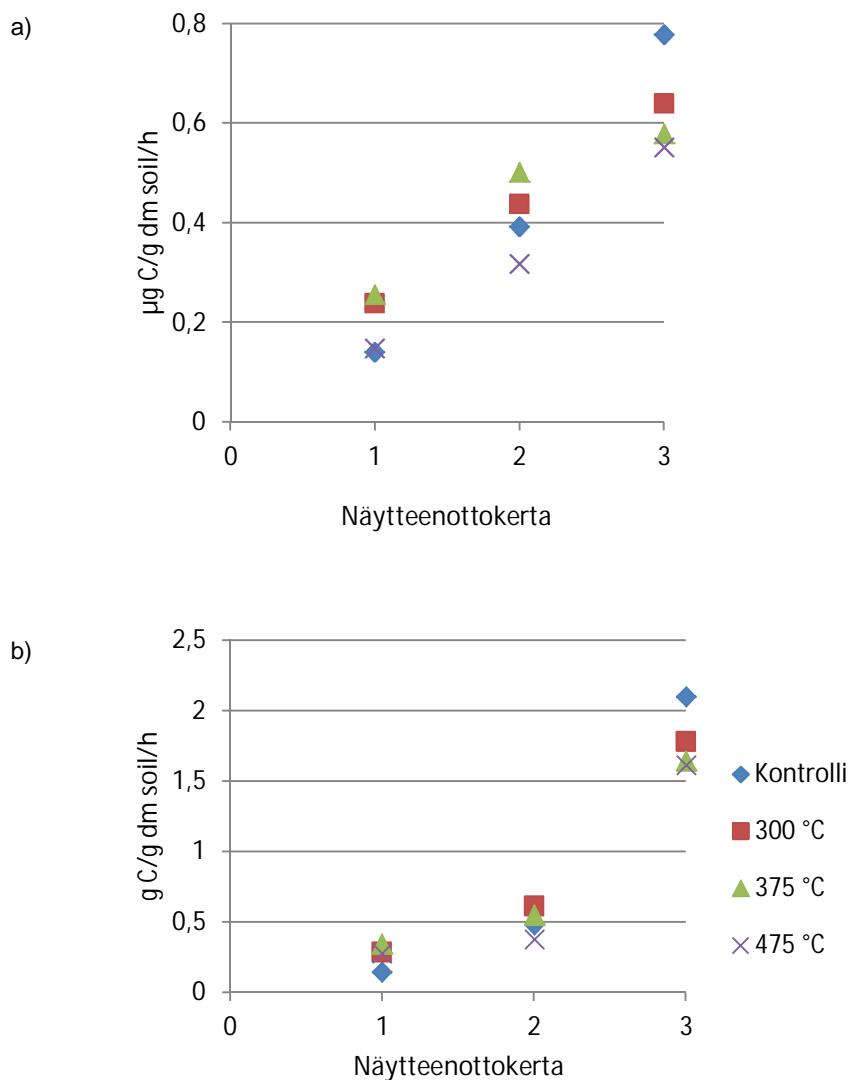
Kuva 5.10. Lehtisalaatin taimien typpipitoisuus eri hiilipitoisuuksilla. Pitoisuudella 80 g/potti (→ 80 t/ha) 300 °C:n hiili laski taimien typpipitoisuutta. Tilastollisesti merkitsevä ero kontrolliin nähden on merkitty *lla (n = 4).

5.3.4 Erilaiset hiilet vaikuttivat eri tavoin maan mikrobitoimintaan

Hiilipitoisuus 20 g/potti (20 t/ha) eri hiilillä ei aiheuttanut muutoksia maaperän mikrobiaktiivisuudessa tai -biomassassa. Sen sijaan hiilipitoisuudella 80 g/potti erot eri hiilten välillä tulivat esiin (kuva 5.11). Erot maan mikrobien aktiivisuudessa ja biomassassa viittaavat siihen, että 300 ja 375 °C:n hiilet sisältävät enemmän mikrobeille käyttökelpoista ravintoa kuin 475 °C:n hiili eli ne hajoavat aluksi nopeammin. Ensimmäisessä näytteenotossa kaikkien hiilien aiheuttama mikrobibiomassan kasvu oli nähtävillä. Toisen näytteenoton kohdalla (noin 10 viikkoa hiilten lisäyksestä maahan) mikrobiaktiivisuus sekä -biomassa ovat palanneet kontrollin tasolle. 475 °C:n hiilen kohdalla näkyy lievä mikrobiaktiivisuuden ja -biomassan lasku 10 vk ja 42 vk hiililisan jälkeen. Viimeisellä näytteenotokerralla myös 300 ja 375 °C:n hiilet laskivat sekä mikrobibiomassaa että -aktiivisuutta.

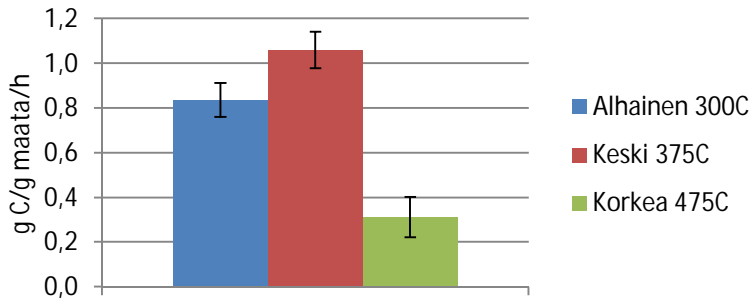
Osa hiilten sisältämistä rakenteista alkaa hajota abioottisesti jo ennen maahan lisäystä. 300 ja 375 °C:n hiilet tuottivat noin kolme kertaa runsaammin hiilidioksidia kuin 475 °C:n hiili (kuva 5.12). Tulokset hiilten ”abioottisesta hengityksestä” tukevat aiempaa päätelmää 300 °C:n hiilen epävakaammasta rakenteesta ja nopeammasta hajoamisesta.

Jokaisella näytteenotokerralla maista otettiin kairanäytteet, joista eroteltiin sukukulamadot märkäsuppilomenetelmällä. Sukkulamadot laskettiin ja noin 50 yksilön ravinnonkäyttöryhmä määritettiin. Millään hiilellä ei havaittu olevan vaikutusta maan sukukulamatojen määriin ja yhteisörakenteeseen kummallakaan hiilipitoisuudella (20 ja 80 g/potti).



Kuva 5.11. Mikrobiaktiivisuus (a) ja mikrobibiomassa (b) hiilipitoisuudella 80 g/potti (80 t/ha). Aluksi (5 vk kokeen aloituksesta) 300 ja 375 °C:n hiilet nostivat mikrobiaktiivisuutta. Lopussa tilanne kääntyi päinvastaiseksi, ja mikrobiaktiivisuus kaikissa hiilimaissa oli alhaisempi kuin kontrollissa. Kokeen alussa kaikki hiilet nostivat myös mikrobibiomassaa. Lopussa mikrobibiomassa kaikissa hiilimaissa oli alhaisempi kuin kontrollissa.

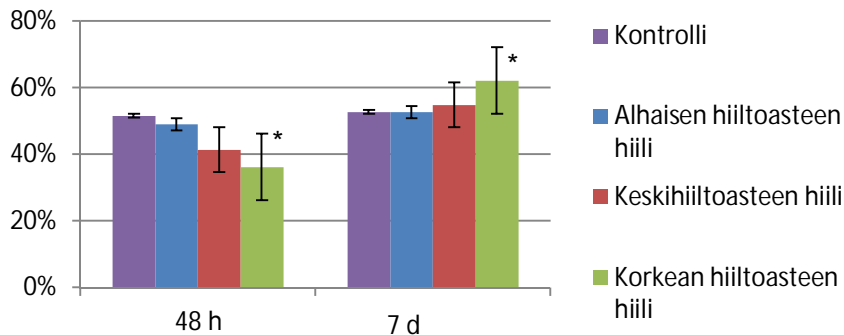
5. Koivupuuhiilen vaikutus maaperässä



Kuva 5.12. CO₂:n vapautuminen hiilistä (keskiarvo ja keskihajonta, n = 3).

5.3.5 Hiilten vaikutus lierojen käyttäytymiseen ja kuolleisuuteen

Hiilistä 300 ja 375 °C:n hiilet eivät vaikuttaneet merkitsevästi lierojen käyttäytymiseen. 475 °C:n hiilellä oli 48 h:n kohdalla melkein merkitsevä karkottava vaikutus lieroihin. Sen sijaan 7 vrk:n kohdalla saman hiilen vaikutus oli merkitsevästi lieroja houkutteleva (kuva 5.13). Mikään hiilistä ei vaikuttanut lierojen kuolleisuuteen – edes suurissa pitoisuuksissa.



Kuva 5.13. Lierojen osuus (%) eri hiilillä käsitellyissä maissa 48 h:n ja 7 vrk:n kuluttua hiilien lisäämisestä (keskiarvo ja keskihajonta, n = 10). Tilastollisesti merkitsevät erot merkitty *:-llä.

5.4 Yhteenveto

Eri hiiltoämpötiloissa saatujen hiilten vaikutukset maan kosteuteen ja johtolukuun olivat käytännössä samanlaiset. Hiekkamaahan sekoitettu hiili sitoi maan kosteutta tehokkaasti heti sekoituksen jälkeen. Ero säilyi retiisin ja ohran viljelyn ajan ja tasoittui vasta ns. talvilevossa, kun potit olivat viileässä ja kostealla alustalla. Alkuvaiheen tulos oli yllättävä näyttö siitä, miten hiilen vedenpidätyskyky voi muuttua haitalliseksi pottikokeessa, vaikka normaalissa avomaaviljelyssä se on tärkein

satotason parantaja hiekkamailla [13]. Koesarjan lopussa hiilten positiivinen ominaisuus imeä ja vapauttaa vettä tuli esiin, ja kosteus ylitti hiilettömän maan kosteuden. Yhdistettäessä kaikki mittaustiedot saatiin viite siitä, että 300 °C:n lämpötilassa valmistetun hiilen vaikutukset maan ominaisuuksiin olivat erilaisia kuin 375 °C:n ja 475 °C:n lämpötilassa tuotettujen hiilien.

Maan johtokyvyn muutokset olivat hyvin samankaltaiset vesiarvojen muutosten kanssa eikä hiilien välisiä eroja tullut esiin. Raiheinäkasvatuksen lopussa saatiin kuitenkin viite siitä, että hiilten sitomat ravinteet voivat tulla kasvien käyttöön, mikäli sadonkorjuu jatkuu eikä lisälannoitusta anneta. Tällä saattoi olla vaikutus raiheinäsattoon viimeisten leikkuukertojen aikana. Tässäkin suhteessa matalimmassa lämpötilassa tuotettu hiili vaikutti poikkeavan kahdesta muusta hiilestä. Tulosten suuren vaihtelun takia erosta ei saatu täysin varmaa näyttöä eli on ilmeistä, että hiiltolämpötilalla ei ole suurta käytännön merkitystä, joka jatkuisi pitkään maassa. Maan happamuustason muuttamiseen tarvitaan tulosten mukaan niin suuria hiilimääriä (80 tn/ha), etteivät ne ole taloudellisesti kannattavia.

Maahan lisätyn hiilen aiheuttamat vasteet maan eliöissä vaihtelivat. Koivupuusta eri lämpötilassa tuotettujen hiilten maaperävaikutuksissa havaittiin eroja. Matalampien lämpötilojen (300 ja 375 °C) hiilet sisältävät oletettavasti enemmän mikrobeille käyttökelpoista ravintoa kuin 475 °C:n hiili, eli ne hajoavat aluksi nopeammin vaikuttaen maan mikrobitoimintaan ja lehtisalaatintaimien kasvuun. Hiilten vaikutukset maan mikrobeihin olivat suurimpia heti lisäyksen jälkeen ja vähenivät ajan kuluessa. Tutkimusten aikana hiilillä ei havaittu olevan vaikutuksia maaperän sukkulamatoyhteisöihin. Koivusta saatava biohiili ei ollut toksista lieroille edes suurissa pitoisuuksissa, ja sen vaikutukset lierojen käyttäytymiseen vaihtelivat. Perinteistä hidaspölylyysiä käyttäen puhtaasta koivupuusta valmistetun hiilen aiheuttamat riskit maan madoille ovat pieniä.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että hiiltolämpötilalla ei ole ratkaisevan suurta vaikutusta siihen, miten hiililisiä vaikuttaa maan vesi- ja ravinnetalouteen pitkällä aikavälillä. Käytännössä biohiilen käyttö on syytä ajoittaa sellaiseen kasvukauden vaiheeseen, jolloin maassa on runsaasti vettä tai sitä tulee runsaana sateena maan luontaisen vedensidontakyvyn ylittävät määrät. Tällaiset olosuhteet toistuvat syksyllä yhä useammin, joten biohiileen perustuvia ympäristötekniikoita on syytä tutkia ja kehittää. Vastaavasti biohiiltä ei kannata käyttää kuivan ajan edellä, kuten keväällä Suomessa. Veden pidätyskyvyn jälkiseuranta osoitti, että maahan lisätyn biohiilen vaikutukset voivat vaikuttaa maan ominaisuuksiin useamman kasvukauden ajan. Hankkeen tuloksia voidaan soveltaa lehtipuusta saatavaan biohiileen, mutta prosessilämpötilan vaikutus muista raaka-aineista valmistetun hiilen laatuun pitää tutkia erikseen.

6. Koivupuuhiilen vaikutus kasveihin

6.1 Taustaa

Biohiili on ollut intensiivisen tutkimuksen kohteena jo yli 30 vuoden ajan [18]. Lu-
kuisissa tutkimuksissa on osoitettu, että kasvualustaan lisätty hiili vaikuttaa kasvi-
en kasvuun ja satoisuuteen. Biohiilen vaikutukset viljelykasville voivat olla suoria,
kuten sen sisältämät ravinteet, tai epäsuoria kuten kyky pidättää ravinteita ja vettä,
vaikutukset maan happamuuteen, ravinteiden (esim. fosfori ja rikki) käyttökelpoi-
suuteen, maaperän rakenteeseen, mykoritsojen kasvuun sekä mikrobitoimintaan
[19]. Biohiilen vaikutukset riippuvat kuitenkin suuresti ympäristön olosuhteista eikä
vaikutusmekanismeja tunneta vielä yksityiskohtaisesti. Biohiilillä saadaan
myönteisiä vaikutuksia yleensä ravinteiden ja orgaanisen aineen suhteen köyhillä
mailla [20]. Runsasravinteisilla mailla biohiili voi joskus jopa heikentää satoa [21].

Tavoitteena oli selvittää eri hiilolämpötiloissa (300 °C, 375 °C, 475 °C) tuotettu-
jen biohiilten vaikutuksia retiisin, ohran ja raiheinän kasvuun. Vaikuttavatko eri
lämpötiloissa tuotetut hiilet samalla tavalla ja poikkeavatko ne hiilettömän maan
tuloksista? Vaikuttaako biohiilen määrä kasvien kasvuun? Onko biohiilen lisäämi-
sellä vaikutusta maan kasvukuntoon ja vesitalouteen tai kasvien ominaisuuksiin
kuten fotosynteesitehokkuuteen tai typpipitoisuuteen?

6.2 Aineisto ja menetelmät

6.2.1 Biohiilen ja maan käsittely ennen kokeen aloittamista

VTT:llä tuotetut hiilet murskattiin edelleen manuaalisesti ja seulottiin < 2 mm rae-
kokoon. Jokaiseen pottiin tuleva hiilimäärä punnittiin erikseen (20 g tai 80 g), minkä
jälkeen maa ja hiili yhdistettiin ja sekoitettiin huolellisesti. Maata punnittiin 1320 g
ja hiiltä 20 g tai 80 g. Koeasetelma ja kasvihuoneen koejärjestelyt on kuvattu ko-
konaisuudessaan luvussa 5.

Käsittelyt olivat:

1. Kontrolli = hiiletön
2. Matalalämpötilahiili = 300 °C
3. Keskilämpötilahiili = 375 °C
4. Korkealämpötilahiili = 475 °C.

Koemaita muhiettiin kasvihuoneessa 5 viikkoa. Muhitusvaiheen jälkeen aloitettiin kolmen peräkkäisen astiakokeen sarja, joista ensimmäisenä toteutettiin retiisikoe (kesto 5 viikkoa). Retiisikoea seurasi ohrakoe (kesto 5 viikkoa), jonka jälkeen pidettiin 4 viikon tauko (talvilepo). Tauon jälkeen koeastioiden maat muokattiin uudelleen ja aloitettiin raiheinäkoe (10 viikkoa).

6.2.2 Retiisikoe

Muhitusvaiheen jälkeen 28.9. kylvettiin 10 retiisin siementä/potti (lajike Ronde Rode Broei 4). Maan pinta sumutettiin päivittäin ja potit peitettiin muovilla kosteuden säilyttämiseksi. Kastelumatoille lisättiin vettä päivittäin, jotta kasvihuoneessa säilyisi riittävä suhteellinen kosteus. Taimettumishavainnot tehtiin 8.10., jonka jälkeen kasvusto harvennettiin 3 taimeen/potti. Harvennettujen retiisintaimien kuivapaino punnittiin ja tyyppitoisuudet määritettiin.

Astiakokeiden koeasetelma kasvihuoneen pöydillä on esitetty kuvassa 5.1. Viiden viikon kasvatuksen jälkeen kokeet b ja d siirrettiin kuivuusstressiin fotosynteesimittauksia varten ja kokeet a ja c suoraan sadonkorjuuseen. Fotosynteesimittauksen jälkeen retiisit kasteltiin välittömästi ja sato korjattiin seuraavana päivänä.

Kuivuusstressin järjestäminen fotosynteesimittauksia varten

Kuivuuskäsittely aloitettiin 28.10. lopettamalla kastelu ja nostamalla potit aluslautasille (kokeet b ja d) 3 vrk ennen fotosynteesimittauksia. Jo yhden vuorokauden kuivatus (28–29.10.) näkyi selvästi voimakkaampana nahistumisena hiilettömien pottien retiiseissä. Tästä syystä mittausta edeltävänä päivänä jouduttiin antamaan vielä yksi kastelukerta. Mittauksen alussa 31.10. kuivuusstressi oli melko tasaisesti näkyvissä alalehtien nuutumisenä. Mittaukseen valittiin terhakkaampia ylälehtiä. Mitattavan lehden lehtilavan leveys mitattiin päätylehdykän leveimmästä kohdasta kohtisuoraan keskiruotia vastaan. Mitattavan lehden lehtilavan pituus mitattiin alimpien lehdyköiden alalaidasta kärkeen. Molemmat pyöristettiin lähimpään 0,5 cm:iin. Koe b mitattiin 31.10. ja koe d 1.11.

Välittömästi mittauksen jälkeen retiisit kasteltiin. Sato korjattiin seuraavana päivänä. Retiisit punnittiin yksilöittäin punnitsemalla lehti- ja juurisato erikseen. Juuren koko määritettiin mittaamalla juuren pituus ja halkaisija.

6.2.3 Ohrakoe

Maat lannoitettiin lisäämällä 50 ml Yara combi1 -lannoitusliuosta/potti. Maasta mitattiin kosteus ja jos se oli alle 20 %, lisättiin maahan vettä 30 ml/potti. Ohran siemeniä (Voitto-lajike) kylvettiin 10 kpl/potti 6.11.2012. Maan pinnan kosteudesta huolehdittiin sumuttamalla vettä päivittäin. Oraat venähtivät pituutta nopeasti yli 10 cm, joten kasvua pyrittiin hidastamaan laskemalla kasvihuoneen päivälämpötila 16 °C:seen ja yölämpötila 10 °C:seen. Lisäksi oraat tuettiin ja tehtiin taimettumishavainnot.

Ohraa kasvatettiin 3 viikkoa, jonka jälkeen ohra oli sopivassa kasvuvaiheessa fotosynteesimittausten aloittamiseksi. Ensimmäinen mittausta suoritettiin 28. ja 29.11., kun maan kosteus oli optimaalinen ohran kasvuun. Tämän mittauksen jälkeen koepottien kastelu lopetettiin ja ohrat altistettiin kuivuusstressille. Fotosynteesimittausten toinen kierros toteutettiin 3.12. ja 5.12. Mittausjärjestystä jouduttiin vaihtamaan toisella mittauskerralla siten, että 3.12. mitattiin 80 g:n hiilipotit ja 5.12. 20 g:n potit, koska 20 g:n hiilipottien ohrat olivat lakastuneet liian pitkälle eikä niistä voitu mitata fotosynteesiä. Fotosynteesimittausten jälkeen ohria kasteltiin normaalisti ja kasvatettiin vielä viikon ajan, jonka jälkeen sato korjattiin.

6.2.4 Raiheinäkoje

Raiheinän kylvöä edelsi 4 viikon tauko, jona aikana kasvihuoneen lämpötila laskettiin 10 °C:seen, kasvatusvalot sammutettiin ja huoneen kosteus pidettiin tasaisena (45 % RH). Potit peitettiin ruskealla paperilla. Tauon jälkeen juuripaakut kuvattiin juuriston määrän arvioimista varten, minkä jälkeen maa muokattiin ja ruukutettiin uudelleen samaan pottiin. Maan kosteus ja johtoluku mitattiin Grodan WCM-laitteella. Huoneen lämpötila nostettiin 18 °C:seen.

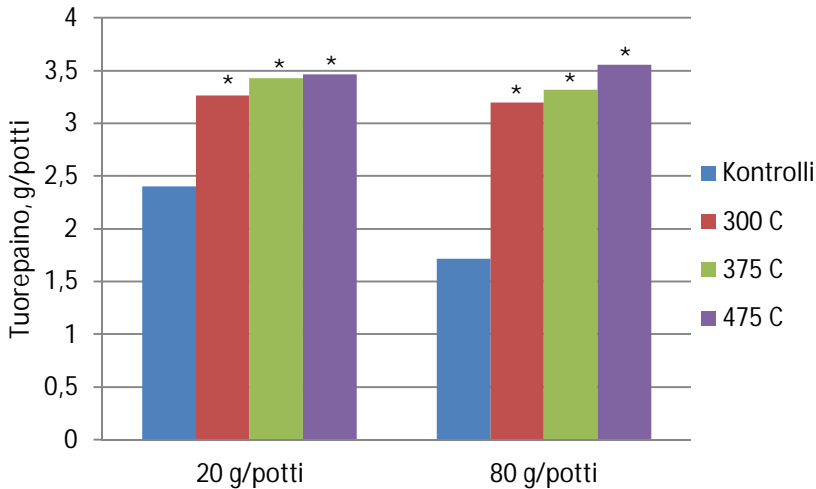
Englanninraiheinän *Lolium perenne* (Riikka-laji 11245A) siemeniä punnittiin 0,305 g/potti (n. 150 siementä). Maan pinta muokattiin kylvön jälkeen kevyesti ja sumutettiin. Kylvöstä pidettiin kosteana sumuttamalla päivittäin. 7 vrk:n kuluttua raiheinä oli itänyt, jolloin kasvatusvalot ja tihkukastelu kytkettiin päälle.

Raiheinä iti epätasaisesti, joten itämisestä otettiin valokuvia ja itämishavainnot ja -laskenta tehtiin jokaisesta potista. Raiheinän sato korjattiin 6 kertaa: 5.2., 13.2., 20.2., 4.3., 13.3. ja 25.3.2013. Sadosta punnittiin tuorepaino, minkä jälkeen sato kuivattiin (100 °C/ 12 h) kuivapainon määrittämistä varten.

6.3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

6.3.1 Biohiilet lisäsivät retiisin kasvua ja satoa

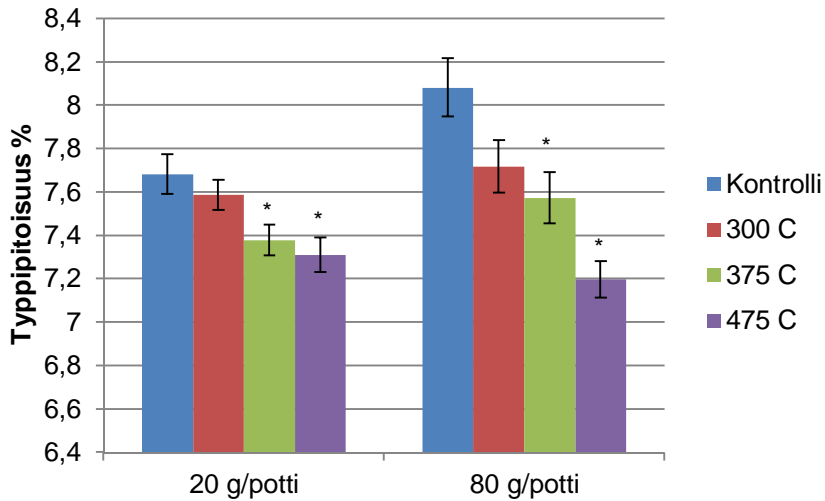
Biohiiltä sisältävällä kasvualustalla retiisi lähti nopeammin kasvuun. 11 vrk kylvön jälkeen harvennettujen retiisintaimien biomassassa oli suurempi hiilellisissä kuin hiilettömässä poteissa kummallakin hiilipitoisuudella (20 g/potti ja 80 g/potti) kaikilla kolmella eri hiilellä (kuva 6.1). Hiilten lisäämisellä ei ollut haitallista vaikutusta retiisin siemenien itämiseen.



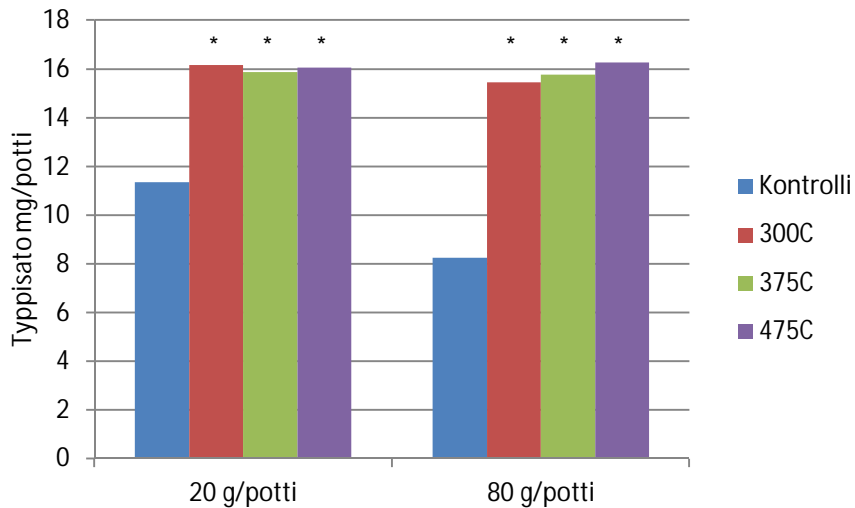
Kuva 6.1. Retiisin biomassa kasvatuksen alkuvaiheessa (11 vrk kylvöstä). Hiiletömiä pottien (kontrolli) biomassa eroaa merkittävästi hiilellisistä. Hiilien välillä ei ole eroja. Tilastollisesti merkitsevät erot hiilettömään verrattuna on merkitty *:llä.

Hiilistä 475 ja 375 °C:n hiilet laskivat retiisintaimien typpipitoisuutta molemmilla hiilipitoisuuksilla (20 ja 80 g/potti) (kuva 6.2). Vaikka retiisintaimien typpipitoisuus laski, kokonaistyyppisato/ala kasvoi kasvien biomassan kasvun myötä (kuva 6.3). Kasveilla liian alhainen typen määrä vaikuttaa kasvua heikentävästi. Tässä tutkimuksessa kasvien typpipitoisuuden lasku ei kuitenkaan vaikuttanut kasvien kasvuun negatiivisesti, vaan kasvien kuiva- ja tuorepainot olivat sekä harvennettujen taimien kohdalla että kokeen lopussa hiilellisissä poteissa suurempia kuin hiilettömässä (kuvat 6.1, 6.4, 6.5). Liian vähäinen typensaanti aiheuttaa kasveissa puutosoireita. Oireet näkyvät ensimmäiseksi kasvin vanhimmissa lehdistä, koska kasvi siirtää typpeä niistä nuoriin, vielä kasvaviin lehtiin, jolloin vanhat lehdet muuttuvat vaaleanvihreiksi tai kellastuvat. Edellä mainittuja muutoksia ei havaittu tutkimuksissamme, mikä kertoo, että kasvit saivat edelleen kasvun kannalta riittävän määrän typpeä. Kasvien typpipitoisuus on yksi merkittävä tekijä, joka vaikuttaa niiden kelpaavuuteen eri herbivorien ravinnoksi. Monet herbivorit valitsevat kasveja, joiden typpipitoisuus on mahdollisimman suuri.

6. Koivupuuhiilen vaikutus kasveihin



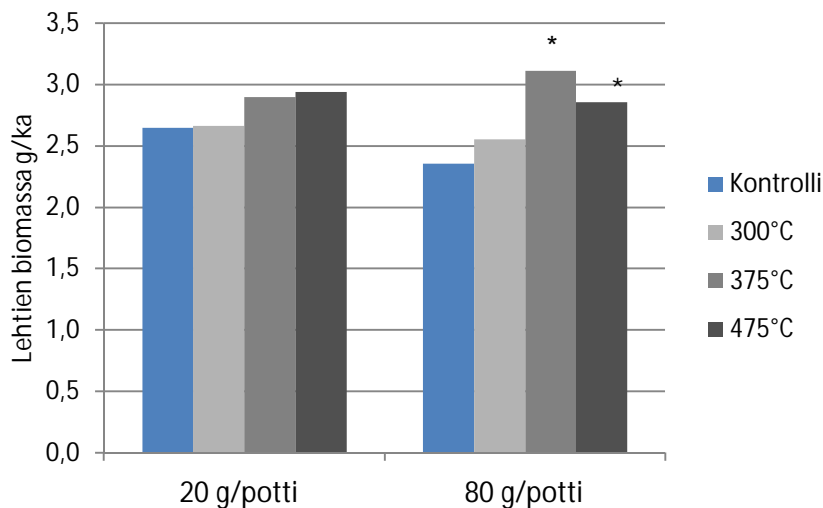
Kuva 6.2. Harvennettujen retiisintaimien typpipitoisuudet hiilipitoisuuksilla 20 ja 80 g/potti. Tilastollisesti merkitsevät erot kontrolliin (hiiletön) verrattuna merkitty *:llä.



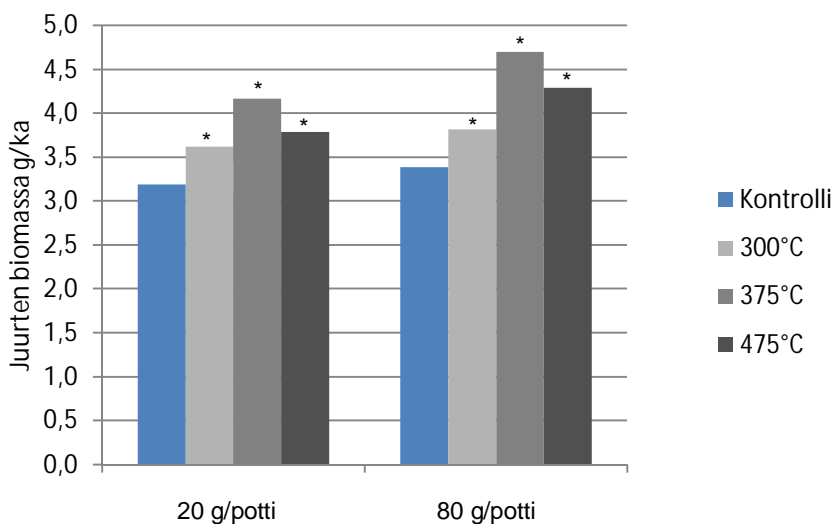
Kuva 6.3. Typpisato/potti (sato mg/potti * kasvin typpi-prosentti). Tulokset harvennetuista retiisintaimista. Tilastollisesti merkitsevät erot kontrolliin (hiiletön) verrattuna on merkitty *:llä.

Kokeen päättyessä korjattiin lehti- ja juurisato erikseen. Alemmalla hiilitasolla (20 g/potti) käsittelyillä ei ollut vaikutusta retiisiin lehtisatoon, mutta korkeammalla hiilitasolla (80 g/potti) 375 ja 475 °C:n hiilillä saatiin merkittävästi suurempi sato

kuin hiilettömällä kasvualustalla (kuva 6.4). Biohiilen kasvua parantava vaikutus näkyi myös retiisin juuren painossa ja koossa. Hiiltä sisältävät kasvualustat tuottivat selvästi suurempia retiisejä kuin kontrollissa (kuva 6.5) .



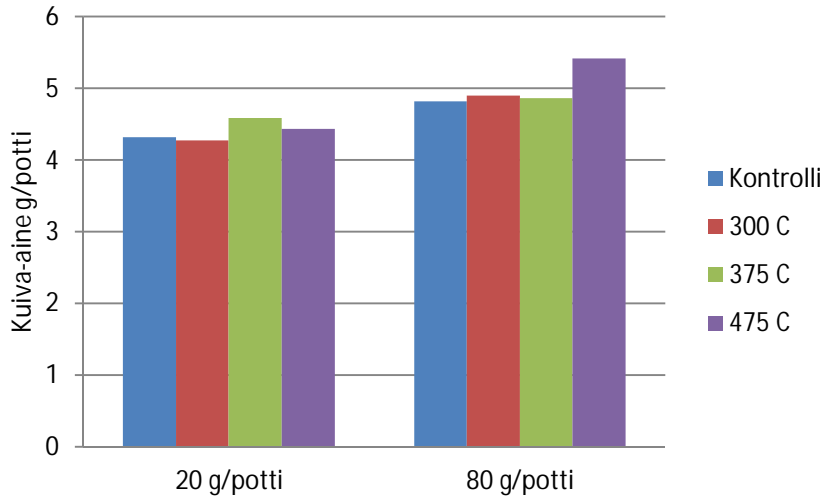
Kuva 6.4. Retiisin lehtisato kokeen lopussa (kuivapaino g/potti). Tilastollisesti merkitsevät erot hiilettömään verrattuna on merkitty *:llä.



Kuva 6.5. Retiisin juurten massa kokeen lopussa (kuivapaino/potti) hiiliasoilla 20 ja 80 g/potti. Tilastollisesti merkitsevät erot hiilettömään verrattuna on merkitty *:llä.

6.3.2 Biohiili ei vaikuttanut ohran satoon

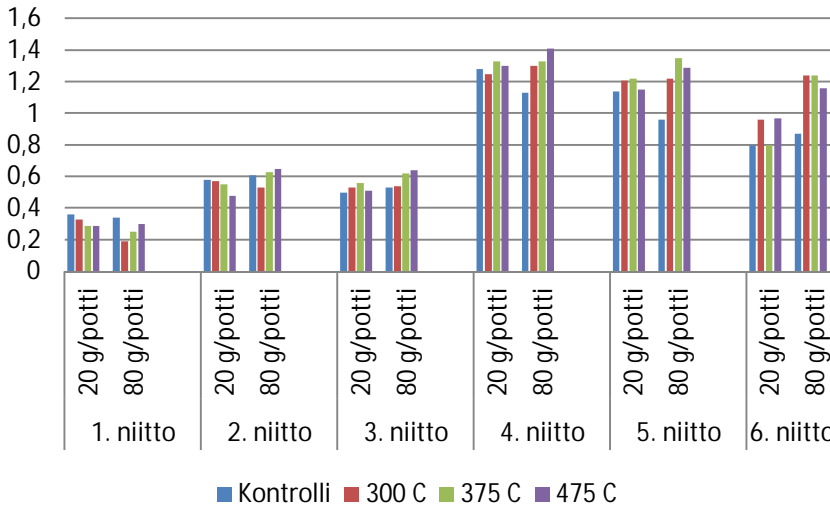
Hiilen määrällä tai hiilen valmistuslämpötilalla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta ohran kasvuun eikä sadon määrään (kuva 6.6).



Kuva 6.6. Ohran kuiva-ainesato, g/potti.

6.3.3 Raiheinäkoe

Raiheinää kasvatettiin 10 viikkoa, jona aikana sato korjattiin 6 kertaa (kuva 6.7). Ensimmäisessä niitossa hiiletön koejäsenen tuotti parhaan sadon. Toisessa niitossa hiilettömän koejäsenen sato laski hiilellisiin verrattuna sadon sekä 20 g/potti että 80 g/potti hiilipitoisuudella, mutta satoerot olivat vähäisiä. Kolmannessa niitossa satoeroja oli vain korkeammalla hiilipitoisuudella, jossa 300 °C:n hiilen ja hiilettömän sadot olivat muita pienempiä. Neljännessä ja viidennessä niitossa satoeroja oli vain korkeammalla hiilipitoisuudella, jolloin hiilettömän koejäsenen sato jäi merkittävästi alhaisemmaksi kuin hiilellisten sato.



Kuva 6.7. Raiheinän kuiva-ainesato (g/potti) eri niitoissa.

Biohiili todennäköisesti vapauttaa ravinteita kasvien käyttöön ja luo edellytykset parempaan kasvuun. Myös maan kosteudella ja monilla muilla tekijöillä voi olla vaikutusta kasvuun lisääntymiseen hiilipitoisessa maassa kastelun ja lannoittamisen päätyttyä. Raiheinäkokeen lopussa havaittava sadon kasvu hiilellisissä poteissa osoittaa, että hiileen sitoutuneet ravinteet ja vesi vapautuvat myöhemmin kuivuu- den ja ravinnepuutoksen uhatessa kasvien käyttöön. Hiileen sitoutuvan veden ja ravinteiden vapautumista on syytä tutkia tarkemmin, sillä biohiilen markkinointi on ollut aktiivista golfkenttien rakentamisessa sekä maisemointihankkeissa^{2,3}.

6.4 Yhteenveto

Hiilen valmistumislämpötilalla ei tässä tutkimuksessa havaittu olevan suurta vaikutusta kasvien kasvuun. Pääsääntöisesti 300 °C:n hiilen vaikutukset olivat kuitenkin pienempiä kuin korkeammassa lämpötiloissa valmistettujen hiilten. Kaikki testatut hiilet nostivat retiisin satoa. Sen sijaan ohran satoon millään hiilellä ei ollut vaikutusta. Raiheinän sato väheni hetkellisesti suuren hiililisän myötä, mutta hiilen positiiviset vaikutukset tulivat esiin, kun kosteus ja ravinneolosuhteet heikkenivät. Tällöin hiilellisissä maissa saavutettiin paras raiheinäsato. Yhteenvetona voidaan todeta, että hiilen vaikutus kasvien kasvuun ja ominaisuuksiin riippuu sekä hiilen että kasvin ominaisuuksista.

² <https://sites.google.com/a/tenmandigital.com/mirimichigreen/biochar/golf-courses>

³ <http://www.biocharmerchants.com/index.php/contact-information/8-articlets-by-mike-urban/10-bio-char-for-landscapers>

7. Biohiilen ja tisleiden vaikutus kompostointiin

7.1 Johdanto

Hajutorjunta ja kaasumaisten päästöjen vähentäminen ovat merkittäviä asioita kompostoinnissa, jätteiden varastoinnissa sekä biomassojen jalostamisessa uusiksi tuotteiksi. Hajuongelmia on varasto- ja kuljetusketjun kaikissa vaiheissa, mutta erityisen suuria haittoja on todettu paikoissa, joihin kerätään suuret materiaalimassat odottamaan jatkojalostusta. Ajoittain hajut leviävät myös asutusalueille ja taajamiin. Hiilen ominaisuudesta absorboida ja adsorboida kaasuja on paljon tietoa, ja biohiilen käyttö kompostoinnissa on yleistymässä [22]. Hiileen sitoutuvat typpikaasut ovat kasviraivanteita, joten on tärkeää tietää, että monet biohiileen sitoutuneista ravinteista pysyvät myös kasveille käyttökelpoisessa muodossa [23]. Myös biohiilen vaikutusta kompostoinnin kasvihuonekaasupäästöihin on tutkittu [24]. Koivutisleen käyttö hajunhallinnassa on sen sijaan vähemmän tunnettu asia. MTT:llä on ollut alustavia kokeita ja yritysten tiloissa tehtyjä testejä, joiden perusteella koivutisleen tiedettiin muuttavan hajoamisprosesseja siten, että hajun muodostus vähenee aistinvaraisissa mittauksissa. Koivutisleen vaikutusta on myös testattu saostuskaivojen hajunpoistossa. Syitä hajun vähenemiseen ei täysin tunneta eikä tisleiden käytön tehosta ole tieteellistä tietoa. Japanilaiset ovat kehittäneet tekniikkaa, jossa tisleet poistavat lantojen hajuhaittoja [25].

Tässä tutkimuksessa tehtyjen demonstraatioiden tavoitteena oli osoittaa, miten kompostiin sekoitettu biohiili ja koivutisle vaikuttavat kompostoitumiseen sekä kompostin hajuun ja kasvihuonekaasupäästöihin. Lisäksi hankittiin alustavaa tietoa biohiilen vaikutuksesta turkistarhan hajuhaittoihin.

7.2 Aineisto ja menetelmät

7.2.1 Kenttäkokeet Envor Biotech Oy:n alueella

Biolan Oy:n hiili kompostoinnissa

Envor Biotech Oy:n⁴ -alueen ensimmäisessä kokeessa verrattiin noin 10 m³:n suuruisten biojätekompostikasojen hajupäästöjä (kuva 7.1). Koe aloitettiin 18.8.2011. Koemateriaalina oli Biolan Oy:n toimittama biohiili, joka oli valmistettu sekapuusta Virossa ja oli kaupallisen grillihiilituotannon sivutuote. Kompostikasoihin lisätty hiilimäärä oli noin 0,5 m³/kasa/sekoituskerta. Verrannekompostina oli hiiletön kasa, joka käsiteltiin Envor Biotech Oy:n standardimenetelmän mukaan. Näytteet hajuanalyysiin otettiin 2.10.2011. Kompostikasoihin tehtiin seuraavat käsittelyt:

Kasa 1: hiiletön verrannekasa, jota sekoitettiin kolmen viikon välein

Kasa 2: hiiltä lisättiin kasaan kerran 1. sekoituskerralla (hiililisäys 5 % kasan tilavuudesta)

Kasa 3: hiiltä lisättiin 1. ja 2. sekoituskerralla (2 hiililisäystä → 10 % kasan tilavuudesta)

Kasa 4: hiiltä lisättiin 1., 2. ja 3. sekoituskerralla (3 hiililisäystä → 15 % tilavuudesta).



Kuva 7.1. Koekompostit Envor Biotech Oy:n alueella. Kasoissa oli 10 m³ kompostoituvaa turvetta ja orgaanista jätettä.

⁴ <http://www.envigrowpark.fi/DowebEasyCMS/>

7. Biohiilen ja tisleiden vaikutus kompostointiin

Koivutisleen ja biohiilen yhteisvaikutuksen testaus

Komposti- ja hiilimateriaalit olivat samoja kuin ensimmäisessä kokeessa kesällä 2011, mutta lisänä oli koivutisle, joka oli Charcoal Finland Oy:n toimittama. Kokeen tarkoituksena oli tutkia biohiilen ja koivutisleen vaikutusta kompostoinnin kasvihuonekaasupäästöihin.

Kompostin käsittelyt:

Kasa 1: hiiletön verrannekasa, jota sekoitettiin kompostointiprosessin mukaisesti kolmen viikon välein

Kasa 2: hiiltä lisättiin 1. ja 2. sekoituskerralla (2 hiillisyystä → 10 % kasan tilavuudesta)

Kasa 3: hiiltä lisättiin 1. ja 2. sekoituskerralla (2 hiillisyystä → 10 % kasan tilavuudesta) sekä koivutislettä lisättiin kasan sisään ennen sekoittamista (10 L/kerta eli yhteensä 20 L).

Kasa 4: hiiltä ei lisätty, mutta koivutislettä ruiskutettiin kasan sisään kaksi kertaa: ennen 1. ja 2. sekoittamista.

Raaka-aineena oli kypsymätön kompostimateriaali, josta otettiin ravinneräyhteet Envor Biotech Oy:n normaalin analytiikan mukaan. MTT ruiskutti koivutisleen kasojen sisään paineilmalaitteella (kuva 7.2). Ruiskutukset tapahtuivat 2.10. ja 23.10.2012. Hiillisyysten ja tislaruiskutusten jälkeen kasojen hoito jatkui Envor Biotech Oy:n normaalin sekoitusohjelman mukaisesti koko syksyn talven tulon saakka.



Kuva 7.2. Tisle ruiskutettiin kompostikasoihin ilma-avusteisella laitteella, jolla voidaan ruiskuttaa tervapitoistakin tislettä maahan, komposteihin ja katoille. Kuvassa kohteena ovat vesimyyrien käytävät.

Demonstraatio turkistarhalla

Biolan Oy:n toimitti hiilet Isto Kärkäisen turkistarhalle heinäkuussa 2013. Hajupäästöt kokeen alussa olivat poikkeuksellisen voimakkaita, koska minkkien ja kettujen lantoja ei oltu peitetty biohiiltä odotettaessa. Biohiiltä levitettiin lannan päälle suoraan häkkien alle 10 vrk:n välein. Kuukauden aikana biohiiltä käytettiin noin 6 m³ (kuva 7.3).



Kuva 7.3. Kettutarha, jossa lannat on peitetty biohiilellä. Myöhemmin biohiilipitoinen lanta siirrettiin kompostiin ja sieltä hiilipitoiseksi lannoitteeksi mansikanviljelyyn.

7.2.2 Mittaukset

Mittaukset kompostikokeista

Biohiilikokeen kompostikasojen lämpötilaa, kosteutta ja johtokykyä seurattiin Grodan-mittarilla viikoittain kokeiden alusta kasojen pinnan jäätymiseen saakka (kuva 7.4). Lisäksi biohiilikokeen kompostikasoista otettiin 2.10.2011 olfaktometriset hajunäytteet, jotka Jyväskylän yliopiston hajupaneeli analysoi seuraavana päivänä.

Kompostien kypsyys analysoitiin Biolan Oy:n kehittämällä testillä Eurassa. Koe-kasvatuksessa näytteet käsiteltiin kuten muutkin kompostinäytteet eli seostettiin turpeeseen määrättyissä suhteissa. Testi oli osa yrityksen omaa laadunvalvontaprosessia, jossa kasvualustan laatua tutkitaan testikasvien avulla.



Kuva 7.4. Kompostikokeen kasojen seuranta.

Syksyllä 2012 tehdyssä biohiilen ja tisleen yhteisvaikutusta tutkivassa kompostikokeessa mittausten tarkoituksena oli saada tietoa käsittelyjen vaikutuksesta kompostoinnin kasviuonekaasu (KHK) -päästöihin. Näytteet KHK-analyyseihin otettiin 2 kk kuluttua kokeen perustamisesta ja 2 vk viimeisestä kasojen käsittelystä (kuva 7.5). Jokaisesta kasasta otettiin 40 osanäytettä, jotka yhdistettiin ja sekoitettiin. Näytekaira oli 30 cm pitkä (läpimitta 25 mm). Jokaisesta kasasta kerättiin yhteensä 6 L kompostoitunutta multaa. Sekoitettu kompostinäyte otettiin 100 g in-fuusiopulloon viitenä rinnakkaisena kerranteena. Pullot säilytettiin vakioämpötilassa ja suljettuna ennen mittausta. Kaasunäytteet otettiin neulalla kannen (septumin) läpi kahtena ajanhetkenä. Näytteen hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidi (N_2O)-pitoisuudet analysoitiin kaasukromatografisesti. Näytteenotto toistettiin 5 kertaa, jotta saatiin varmuus näytteiden välisistä eroista.



Kuva 7.5. Kompostinäytteiden ottoon KHK-analysejä varten käytetyt välineet.

Biohiilen käyttö turkistarhalla

Tarhan hajupäästöt arvioitiin ennen biohiilen käytön aloitusta ja yhden kuukauden kuluttua biohiilen käytön jälkeen. Tarhaajat seurasivat hajunmuodostusta päivittäin koko koekäytön ajan. Vertailukohtana oli kokeen alun tilanne sekä käsittelemättömien alueiden tilanne. Biohiilen vaikutusta seurattiin erikseen yhdellä kettutarhalla ja yhdellä minkkitarhalla.

7.3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

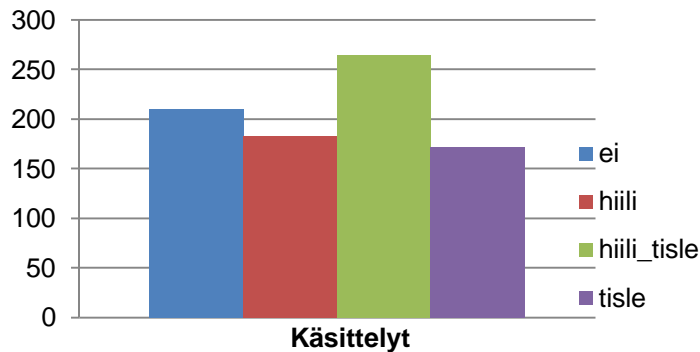
Biohiili nopeutti kompostoitumista ja vähensi hajuhaittoja

Jyväskylän yliopiston raportti kesän 2011 kompostikokeen hajusta osoitti biohiilen positiiviset vaikutukset. Komposti, johon oli lisätty biohiiltä, oli huomattavasti kypsempää kuin verranne. Kuiva-aineen tuhkapitoisuus oli 38,2 % (verranne 31,6 %), pH 7,5 (verranne 6,0) ja hiilidioksidituotto 6,1 mg CO₂-C/g VS/vrk (verranne 7,3 mg). Biohiiltä sisältänyt kompostikasa tuotti 1700 hajuyksikköä/ilma-m³, kun verranteen hajupäästö oli 2200 hajuyksikköä/m³. Hajun laatu oli biohiiltä sisältäneissä kasoissa merkittävästi erilainen. Biohiillisisätyn kompostin hajun kuvaukset olivat ”imelä ja komposti”. Verrannekompostin hajun kuvaukset olivat ”hapan, multa, öljy, paha ja pistävä”.

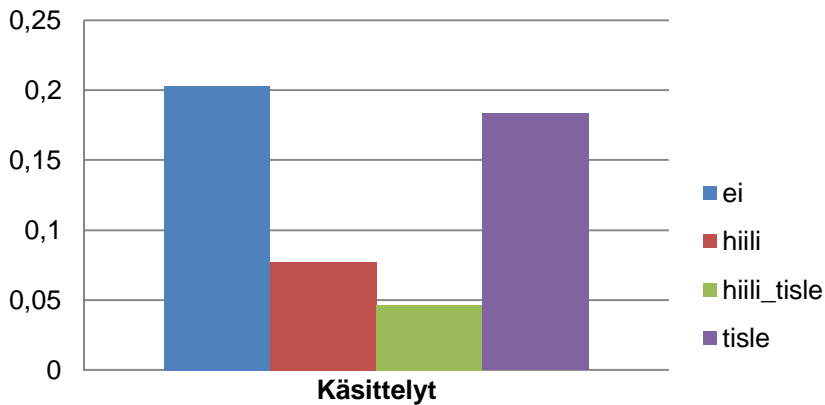
Hiilen ja tisleen yhdistelmä nosti hieman prosessin lämpötilaa ja sillä käsitelty kasa oli teknisesti myös kuohkein. Kasa lämpeni alussa nopeasti ja viileni joulukuussa muita nopeammin. Myös vesipitoisuus ja johtokyky laskivat siinä muita kasoja nopeammin. Tulos viittaa siihen, että kahden hiillisen ja tisleen yhdistelmä nopeutti kompostoitumisprosessia. Mittaukset eivät kuitenkaan täytä tieteellisen tutkimuksen vaatimuksia, koska mittauskertoja ja kerranteita ei ollut riittävästi.

Kasvihuonekaasujen määrät prosessin puolivälissä osoittivat, että tisleen ja hiilen yhdistelmä voi kiihdyttää CO₂:n muodostusta, mutta biohiili sitoo ainakin N₂O:ta ja voi siten vähentää KHK-päästöjen kokonaisuutta (kuvat 7.6 ja 7.7). Luotettavan tiedon saanti olisi edellyttänyt koko kompostointiajan jatkunutta näytteenkeruuta ja analysointia.

7. Biohiilen ja tisleiden vaikutus kompostointiin



Kuva 7.6. Kompostikasojen CO₂-päästöt (ppm/10 min) 2 kk kokeen alusta mitattuna. Hiilen ja tisleen yhdistelmä nopeutti hiemän hiilidioksidin vapautumista prosessin alkuvaiheessa. Ei = verrannekomposti ilman hiili- ja tislelisäystä.



Kuva 7.7. Kompostikasojen N₂O-päästöt (ppm/10 min) 2 kk kokeen alusta mitattuna. Päästöt olivat alhaisimmat biohiiltä sisältäneistä kasoista otetuissa näytteissä. Ei = verrannekomposti ilman hiili- ja tislelisäystä.

Turkistarhalla tehdyt tarkastukset osoittivat, että biohiili vähensi olennaisesti kettutarhan hajupäästöjä, kun lanta peitettiin hiilellä 10 vrk välein. Tärkein tarhojen hajun aiheuttaja on ammoniakki. Kirjallisuuden perusteella biohiili adsorboi ammoniakkia ja voi vapauttaa hiileen sitoutunutta typpeä myöhemmin kasvien käyttöön [23]. Minkkitarhalla biohiilen teho hajun poistossa oli heikompi, koska hiili peitti huonosti korkeina kasoina olleet lannat. Biohiilen käyttöön turkistarhoilla tarvitaan uutta levitysteknologiaa ja lisätutkimusta.

7.4 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta, että demonstraatioissa saatiin monta näyttöä siitä, miten hidaspölylyysituotteita voidaan käyttää hajuhaittojen torjunnassa ja kasvihuonekaasupäästöjen (N₂O) vähentämisessä. Hiilen käyttö on myös osa hiilidioksidin pitkäaikaista sitomista maahan. Tulokset ovat suuntaa antavia, mutta hyvin samankaltaisia julkaistujen tietojen kanssa [22, 24]. Biohiili sitoo hyvin kaasumaisia aineita, joista osa aiheuttaa hajuongelmia ja osa tunnetaan kasvihuonekaasuna. Biohiiltä voidaan käyttää esim. kompostiprosessissa ja siitä on mahdollista tehdä erillisiä suodattimia tai suodatinkerroksia, jotka adsorboivat kaasuja. Tisleillä voi olla biologisia prosesseja kiihdyttävä vaikutus, joka voi jopa lisätä kaasujen tuottoa hetkellisesti. Toisaalta on myös näyttöä siitä, että pyrolyysinesteet voivat muuttaa biomassojen ja prosessien mikrobilajistoa merkittävästi [26]. Mikrobilajiston muutokset voivat olla syynä hajun vähenemiseen esim. lantojen käsittelyssä.

Käytännön kannalta olennaista oli saada tietoa siitä, että grillihiilen valmistuksessa saatavalla hiilellä sekä nesteillä on monia käyttömuotoja biomassojen prosessoinnissa ja hajun hallinnassa. Täysin uusi havainto oli hajun poisto biohiilellä turkistarhojen häkkialueelta. Hajunhallintaan liittyvät ratkaisut edellyttävät kuitenkin runsaasti tutkimus- ja kehitystyötä ennen kuin testattujen menetelmien kannattavuus ja kokonaisvaikutukset ovat tiedossa.

8. Teknis-taloudelliset laskelmat

8.1 Taustaa

Teollisten panostoimisten retorttien tuotantoajojen tuloksiin, niiden yhteydessä tehtyihin mittauksiin ja tuloksista laskettuihin aine- ja energiataseisiin perustuen laadittiin aikaisemmassa "Hidaspyro"-projektissa yritysten käyttöön toimintaperiaatteiltaan samanlaiset Excel-pohjaiset laskentamallit, joiden avulla voidaan tarkastella eri vaihtoehtojen keskinäistä ja absoluuttista kannattavuutta sekä luoda tarkasteluun uusia vaihtoehtoja. Kustannustekijöiden lähtöarvoja voidaan laskentamallissa joustavasti muuttaa ja mallista pyrittiin tekemään lisäksi rakenteeltaan yksinkertainen ja helppokäyttöinen. Tavoitteena oli pk-yritysten hidaspYROlyysin liiketoimintojen tukeminen ja kehittäminen lehtipuuperäisten nestetuotteiden, lähinnä koivutisleen, kaupallistamiseksi. Nämä laskelmat tehtiin vuonna 2010 (kustannustaso 2010) ja tuotteina olivat grillihiili tai grillihiili ja karkote vuotuisen tuotantoajan ollessa 3 kk. Tuotantoa tarkasteltiin yhdellä tai kolmella retortilla, kun raaka-aineita olivat kuorellinen koivuranka ja iso kuorellinen koivupala. Yksikköjen kannattavuutta voitiin parantaa tuottamalla grillihiilen ohella karkotetta. Uuden tuotteen markkinat karkotteena ovat epävarmat. Tuotteiden kaupallistamiseen vaadittavien EU-lainsäädännön lupien ja REACH-rekisteröintien kustannukset voivat olla pk-yrityksille suuret. Toisaalta näiden kustannusten suuruuden arviointiin liittyy monia epävarmuustekijöitä, minkä vuoksi näitä kustannuksia ei sisällytetty Excel-pohjaiseen laskentaohjelmaan. Lyhennelmä laskentatuloksista on esitetty projektin julkisessa loppuraportissa [1].

"Hidaspyro II" -projektin tutkimus- ja tuotekehitystulosten pohjalta tehtiin syksyllä 2013 uusien prosessikonseptien teknis-taloudelliset arviot (kustannustaso 2013), jotka perustuivat edellä mainittuun Excel-pohjaiseen laskentamalliin. Aine- ja energiataseiden laskenta perustui sekä vuoden 2010 teollisilla retorteilla tehtyihin ison kuorellisen koivupalan tuotantoajoihin ja niiden yhteydessä tehtyihin mittauksiin että VTT:n koelaitteiston vuoden 2012 koivupuun hiiltotuloksiin. Teollisuusretorttien erilaisen toimintaperiaatteen takia VTT:n koelaitteen hieman erilaiset aine- ja energiataseet on laskennassa huomioitu. Prosessin sivutuotteena lämpöä tuotavia (retorttikaasun tisleen talteenotosta tai retortin lämmitykseen käytetyistä savukaasuista), hankintahinnaltaan hieman nykyistä kalliimpia, mutta sovelluskohteesta riippuen mahdollisesti myös tuotantotaloudeltaan vieläkin edullisempia

prosessivaihtoehtoja ei ole huomioitu. Raaka-aineena on kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa iso kuorellinen koivupala. Retorttien vuotuinen käyttöaika aikaisempaa monipuolisemman tuotekirjon ansiosta on vaihtoehtoisesti 6 tai 9 kk. Tuotteiden (biohiili, grillihiili ja tisle) rekisteröinnin kustannuksia ei ole huomioitu arviointiin liittyvien monien epävarmuustekijöiden takia. Seuraavassa on lyhennelmä laskentatuloksista.

8.2 Tarkasteltavat tapaukset ja kannattavuuslaskennan perusteet

Retorttien raaka-aineena käytetään isoa kuorellista koivupalaa, josta valmistetaan grillihiiltä, maanparannushiiltä (biohiiltä) ja ”puhdastislettä”. Grillihiilen tuotannossa retorttipanoksen loppulämpötila on 450 °C ja maanparannushiilen tuotannossa 375 °C. Laboratoriokoelaitteella tehtyihin hiiltokokeisiin sekä biohiilen tuoteanalyysiin ja käyttökokeisiin perustuen 375 °C on riittävä lämpötila laadultaan hyvän maanparannushiilen tuottamiseen. Grillihiiltä matalampi lämpötila nopeuttaa tuotantoa (noin 60 % panosretortin grillihiilen tuotantokiertoajasta) ja laskee biohiilen tuotantokustannuksia. Aiemmissa laskelmissa grillihiilen tuotannon yhteydessä otettiin kaikki myyntiin menevä tisle talteen sen sisältämästä tervasta huolimatta. Tutkimustulosten perusteella, lähinnä tervan sisältämien polyaromaattisten hiiliveityjen takia, päädyttiin tässä tarkastelussa tuottamaan tervatonta ”puhdastislettä”, joka otetaan talteen alle 300 °C:n retorttilämpötiloissa. Puhdastisleen määrä on vajaa puolet koko tisleen määrästä. Puhdas tisle soveltuu tehtyihin tuoteanalyysiin ja käyttökokeisiin. Tisle soveltuu hajun torjuntaan kompostoinnissa, karkotteeksi ja mahdollisesti myös kasvinsuojeluaineeksi (pestisidi) tai eliöntorjunta-aineeksi (biosidi). Ensisijaisena käyttökohteena on tässä hajujen hallinta, ja laskennassa on arvioitu kaikelle tuotetulle ”puhdastisleelle” olevan markkinoita. ”Puhdastislettä” voitaisiin tuottaa kysynnästä riippuen myös vähemmän, jolloin osa tisleestä poltettaisiin polttokammiossa yhdessä kuumien retorttikaasujen kanssa. Tällöin lämpöä voitaisiin tuottaa enemmän kuin koko puhdastisleen talteenoton tapauksessa. Laskennassa on arvioitu kaikelle tuotetulle biohiilelle olevan markkinoita maanparannushiilenä. Näin ei välttämättä vielä nykyisin ole, koska tuote on uusi ja sen markkinat ovat kehittymättömät.

Investointikustannukset arvioitiin annuiteettimenetelmällä 0, 5, 10 %:n sisäistä korkoa käyttäen. Investointitukiprosentteina käytettiin 0, 20 ja 40 %:a. Järjestelmän käyttöikä oli joko 7 vuotta (vuotuinen käyttöaika 9 kk) tai 10 vuotta (vuotuinen käyttöaika 6 kk). Excel-ohjelma laskee vuosituloksen tuotteiden myyntitulojen ja kokonaiskustannusten erotuksena.

Tarkastellut tapaukset on esitetty taulukossa 8.1. Vuotuista käyttöaikaa on pidennetty maanparannushiilen (biohiilen) tuotannon ansiosta. Sivutuotteena muodostuvaa ”puhdastislettä” otetaan talteen koko tuotannon ajalta. Tuotantoa ei ole joulu–helmikuussa silloin kun tuotantokauden pituus on 9 kk. Grillihiilen tuotanto ajoittuu kaikissa tapauksissa huhtikuun alusta kesäkuun loppuun. Laskennan tulokset esitetään kohdassa 8.3 yksityiskohtaisemmin yhdelle tapaukselle (taulukko

8. Teknis-taloudelliset laskelmat

8.1, perustapaus 7), jossa tuotanto ajoittuu vuoden lämpimämpään vuosipuoliskoon huhtikuun alusta syyskuun loppuun.

Taulukko 8.1. Teknis-taloudellisen arvion laskentatapaukset.

Perustapaus	Tuotantoaika, retorttien lukumäärä	Grillihiiilen tuotantoaika kk/a	Biohiilen tuotantoaika kk/a	Tisleen tuotantoaika kk/a	Huomaukset
1	9 kk, 1 retortti	3	6	9	
2	9 kk, 1 retortti	0	9	9	Biohiili, 450 °C
4	9 kk, 3 retorttia	0	9	9	
5	9 kk, 3 retorttia	3	6	9	
6	6 kk, 3 retorttia	3	3	6	Käyttöikä 7 a
7	6 kk, 3 retorttia	3	3	6	Käyttöikä 10 a
8	9 kk, 3 retorttia	0	9	9	Biohiili, 375 °C

Kustannustekijöiden arvot peruslaskennassa on esitetty taulukossa 8.2. Tuotteiden hinnat ovat tehdashintoja, ja hiili myydään irtonaishana tai jätisäkeissä ja tisle säiliöissä. Grillihiilituotannon yhteydessä muodostuva hienoaines, jonka määrän on arvioitu olevan 10 % grillihiilen tuotannosta, myydään maanparannushiileksi.

Taulukko 8.2. Kustannustekijöiden arvoja peruslaskelmassa.

Kustannustekijä	Perusarvo
Puun hinta, €/pino-m ³	30
Puun hinta, €/MWh	19,4
Palkkakustannus, €/kk	3185
Sähkön hinta, €/kWh	0,15
Grillihiiilen hinta, €/kg	0,60
Maanparannushiilen hinta, €/kg	0,40
Puhdastisleen hinta, €/kg	0,25

Taulukossa 8.3 on esitetty kustannustekijöiden arvot herkkyytarkastelussa. Eri tuotantotekijäin muutosten vaikutuksia tarkastellaan kohdassa 8.3 yksi kerrallaan muiden tuotantotekijöiden pysyessä samana kuin peruslaskelmassa. Tulokset esitetään taulukon 8.1 tapaukselle 7. Määritetään myös tuotantotekijöiden raja-arvot, joilla tuotanto on vielä kannattavaa muiden tuotantotekijöiden ollessa samat kuin peruslaskennassa. Seurattavaksi pisteeksi on valittu 5 %:n sisäinen korko ja 20 %:n investointitukiarvo.

Taulukko 8.3. Kustannustekijöiden arvot herkkyystartastelussa.

Kustannustekijä	Arvo 1	Arvo 2	Arvo 3
Sisäinen korko, %	0	5	10
Investointituki, %	0	20	40
Puun hinta, €/pino-m ³	30	40	50
Palkkakustannus, €/henkilötyövuosi	22 000	38 000	55 000
Grillihiihen hinta, €/kg	0,40	0,50	0,60
Maanparannushiilen hinta, €/kg	0,30	0,40	0,50
Puhdastisleen hinta, €/kg	0,10	0,25	0,40
Investoinnin muutos, %	- 30	0	+ 30
Tuotetulojen muutos, %	- 30	0	+ 30

8.3 Laskennan tulokset

Tuotanto yhdellä retortilla on käytetyillä laskenta-arvoilla yleensä kannattamatonta. Osa hiiltokaasun energiasisällöstä jää yhdellä retortilla toimittaessa myös hyödyntämättä. Parhaat vaihtoehdot olivat grillihiihen (450 °C, 3 kk/a) ja maanparannushiilen (375 °C, 6 kk/a) yhteistuotanto tai vaihtoehtoisesti maanparannushiilen tuotanto (375 °C, 9 kk/a). Oheistuotteena saadaan puhdastislettä (< 300 °C) hajun torjuntaan.

Tuotanto kolmella retortilla on käytetyillä laskenta-arvoilla useassa vaihtoehdossa kannattavaa. Hiiltokaasun energiasisältö voidaan tässä tapauksessa kokonaisuudessaan hyödyntää retorttien lämmittämisessä. Retorttien energiahyötysuhdetta olisi mahdollista edelleen parantaa, jolloin ylijäämäenergia (retortin lämmityksen poistokaasut, puhdastisleen talteenotto) voidaan käyttää ison kuorellisen koivupalan kuivauksessa ja/tai vaihtoehtoisesti muissa lämmön käyttökohteissa. Seuraavassa tarkastelussa lämmön myynnistä ei arvioida saatavan tuottoa. Toisaalta arviossa ei ole huomioitu tuotteiden rekisteröinnin kustannuksia, jotka voivat olla varsin suuret.

Seuraavassa esitetään laskennan tuloksia ainoastaan taulukon 8.1 tapaukselle 7. Tässä tapauksessa tuotanto rajoittuu vuoden lämpimimpiin kuukausiin. Huhtikuusta kesäkuuhun tuotetaan grillihiiltä kesäsesonkia varten ja edelleen maanparannushiiltä heinäkuun alusta syyskuun loppuun. Puhdastisle otetaan talteen niin grillihiihen tuotannon kuin maanparannushiilen tuotannon aikana. Puhdastisle myydään käytettäväksi hajun torjuntaan pääasiassa kompostoinnissa. Maanparannushiili myydään ensisijaisesti puutarhalannoitteiden tuottajille, puutarhoille, kasvihuoneille ja harrastelijaviljelijöille. Grillihiili myydään pääasiassa kaupan tukkuliikkeille ja huoltoasemaketjuille. Taulukossa 8.4 on esitetty tapauksen 7 perustiedot sekä laskentatulokset perusarvoilla, kun sisäinen korkokanta on 0, 5 ja 10 % sekä investointituki 0, 20 ja 40 %. Tavoitteena on tässä vaihtoehdossa pitää tuotantomäärät kohtuullisina ja myydä koko tuotanto kotimaahan tai lähialueille (Pietarin alue, Ruotsi). Tällöin myös raaka-aineen kuljetusmatkat ja hinta pysyvät kohtuullisina. Kolmiretorttilaitoksen absoluuttinen kokonaisinvestointi on jatkuvatoimisiin hiilto-

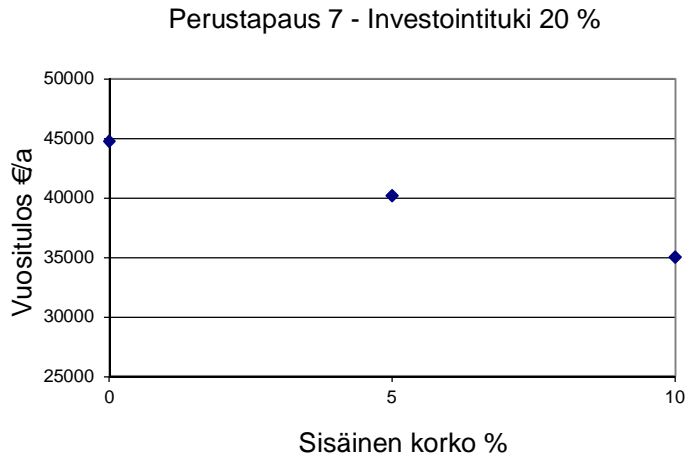
8. Teknis-taloudelliset laskelmat

laitteisiin verrattaessa suhteellisen pieni. Jatkuvatoimisten hiiltolaitteiden ongelmana ovat myös lähimarkkinoihin nähden suuret tuotemäärät. Tuotteiden hinnat ovat tehdashintoja, ja hiili myydään irtonaisena tai jättisäkeissä ja puhdastisle säiliöissä. Työllistävä vaikutus on 16 kk/a retortityötä, ja lisäksi tuotanto tarjoaa työtä raaka-ainetuotannossa, jonka vuosikulutus on noin 4600 p-m³. Grillihiiltä käytetään vuosittain Suomessa noin 4 milj. kg ja lähes 90 % Suomessa käytettävästä grillihiilestä tuodaan ulkomailta, lähinnä Virosta ja myös muualta Baltiasta [27]. Maanparannushiilen ja puhdastisleen osalta markkinat ovat vielä varsin kehittymättömät.

Taulukko 8.4. Laskentatapauksen 7 perustiedot ja vuositulo eri sisäisen koron ja investointitukien arvoilla. Tuotanto: grillihiiltä (450 °C, 3 kk/a), maanparannushiiltä (375 °C, 3 kk/a) ja oheistuotteena puhdastislettä hajun torjuntaan (6 kk/a).

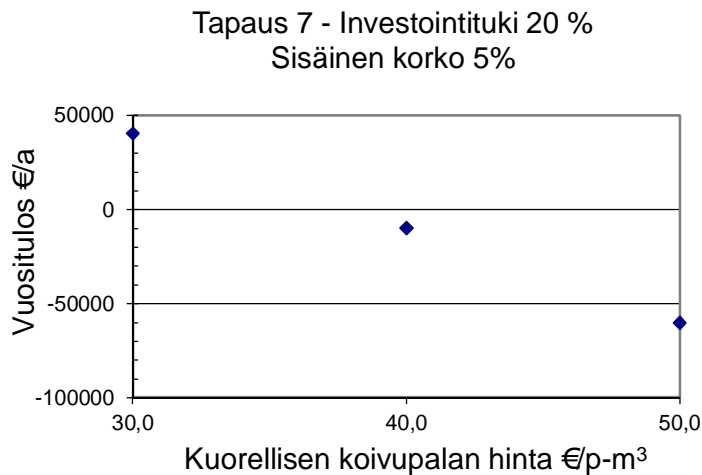
Perustapaus 7 - Kolme retorttia tuotannossa			
Raaka-aineena iso kuorellinen koivupala		Määrä, kg	Hinta €/kg
Raaka-aineen kosteus	15 p-%		
Terva poltetaan			
Retortti tuotannossa vuodessa	6 kk		
Grillihiilen tuotanto (450 °C), huhti-kesäkuu	3 kk/a	148 150	0,60
Puhdastisle hajuntorjuntaan (talteenotto <300 °C), huhti-syyskuu	6 kk/a	202 990	0,25
Muju (10 % grillihiilen tuotannosta) maanparannushiileksi, huhti-kesäkuu	3 kk/a	16 460	0,40
Panosten lukumäärä grillihiilen tuotannossa	60 panosta /kk		
Maanparannushiilen tuotanto (375 °C), heinäkuu-syyskuu	3 kk/a	335 010	0,40
Panosten lukumäärä maanparannushiilen tuotannossa	103 panosta /kk		
Työvoiman tarve	16 kk/a		
Palkkakustannus	3 200 €/kk		
Raaka-aineen kulutus	4 570 p-m ³ /a		
Raaka-aineen hinta	30 €/p-m ³		19,4 €/MWh
Sähkön kulutusarvio	5 200 kWh		
Sähkön hinta	0,15 €/kWh		
Kuolettava kokonaisinvestointi	194 000 €		
Vuositulos, pitoaika 10 a			
Yksikkö, €/a			
Korkokanta/Investointitukiprosentti		0 %	5 %
	0 %	40863	35148
	20 %	44738	40166
	40 %	48613	45184
			41313

Kuvassa 8.1 on esitetty laskennan tulokset perustapaukselle sisäisen koron arvoilla 0, 5 ja 10 %, kun investointituki laitokselle on 20 %. Vuositulos saadaan, kun myyntituloista vähennetään vuosikustannukset. Vuositulos on noin 40 000 €, kun sisäinen korko on 5 % ja investointituki 20 % (herkkyystarkastelun peruspiste).



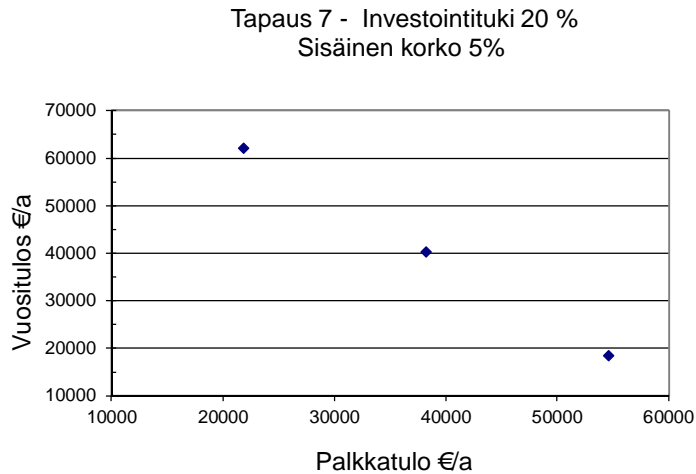
Kuva 8.1. Perustapauksen 7 vuositulo eri sisäisen koron arvoilla.

Kuvassa 8.2 on esitetty vuosituloksen muutos raaka-aineen hinnan noustessa. Raaka-aineen hinta on merkittävin yksittäinen vuositulokseen vaikuttava tekijä. Hinnan ohella raaka-aineen kosteus on merkittävä asia, koska korkeampi puun kosteus lisää tuotantokierron pituutta ja pienentää vuosituotantoa. Tässäkin mielessä ylijäämälämmön käyttö puun kuivaukseen olisi merkittävä edistysaskel nykytilaan verrattuna. Kuorellinen iso koivupala saa tapauksessa 7 maksaa enintään 38 €/p-m^3 ($24,6 \text{ €/MWh}$). On huomattava myös metsänhoidollinen puoli, koska harvennuspuun käytössä retorttien raaka-aineena ohutrunkoinen koivupuu tulee tehokkaasti hyödynnetyksi rasiin kaadon sijaan.



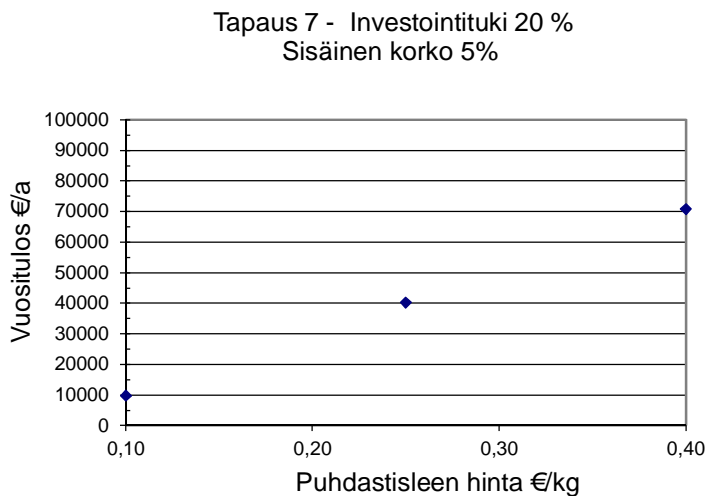
Kuva 8.2. Kuorellisen koivupalan hinnan vaikutus vuositulokseen.

Kuvassa 8.3 on esitetty palkkatulon muutoksen vaikutus vuositulokseen. Peruslaskelman palkkatulo on noin 38 000 €/a (3 200 €/kk). Palkkatulo voi olla enimmillään 68 000 €/henkilötyövuosi (5 700 €/kk), muiden kustannustekijöiden pysyessä muuttumattomina.



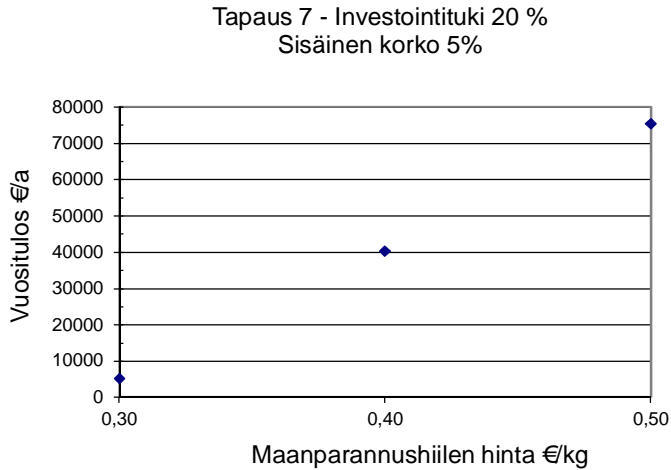
Kuva 8.3. Palkkatulon vaikutus vuositulokseen.

Puhdistisleen hinnan vaikutusta vuositulon suuruuteen on tarkasteltu kuvassa 8.4. Puhdistisleen hinnan tulisi olla vähintään 0,05 €/kg, kun muut kustannustekijät pysyvät samana kuin peruslaskelmassa. Kivin matalalla hintatasolla puhdistislettä ei kannata tuottaa, varsinkin jos ylijäämälämpö voidaan täysimääräisesti hyödyntää. Tislettä tuotetaan vuodessa tapauksessa 7 noin 203 000 kg.



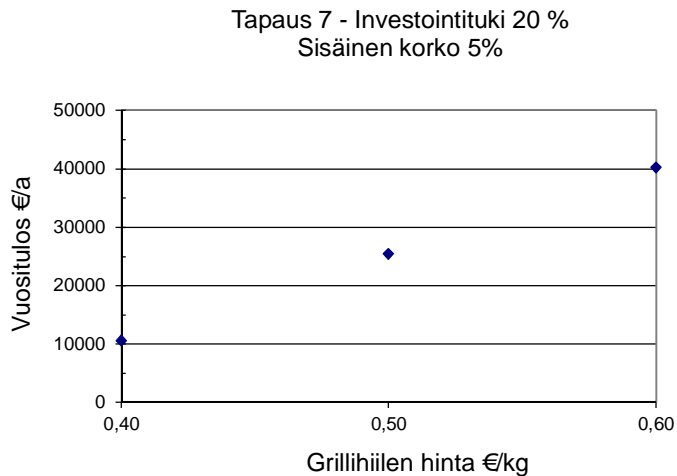
Kuva 8.4. Puhdistisleen hinnan vaikutus vuositulokseen.

Maanparannushiilen hinnan vaikutus vuositulokseen on esitetty kuvassa 8.5. Maanparannushiilen keskihinnan tulisi olla vähintään 0,29 €/kg, kun muut kustannustekijät pysyvät samana kuin peruslaskelmassa. Maanparannushiilen vuotuinen tuotantomäärä on 335 000 kg.



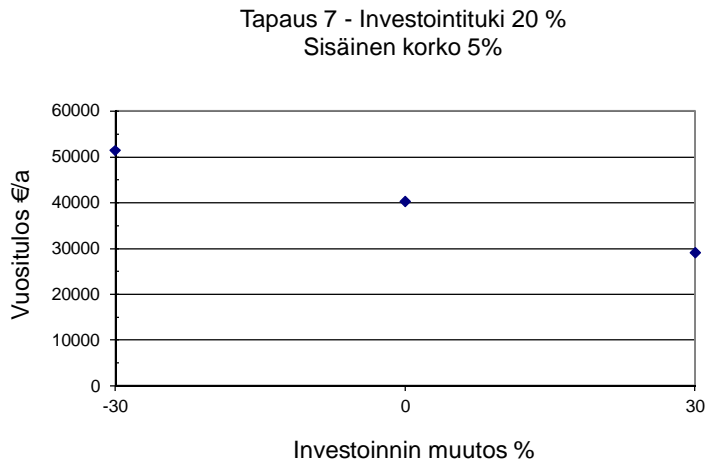
Kuva 8.5. Maanparannushiilen hinnan vaikutus vuositulokseen.

Grillihiilen hinnan vaikutus vuositulokseen on esitetty kuvassa 8.6. Grillihiilen keskihinnan tulisi olla vähintään 0,33 €/kg, kun muut kustannustekijät pysyvät samana kuin peruslaskelmassa. Grillihiilen tuotantomäärä on noin 150 000 kg/a, joka vastaa vajaata 4 % Suomen vuosikulutuksesta.



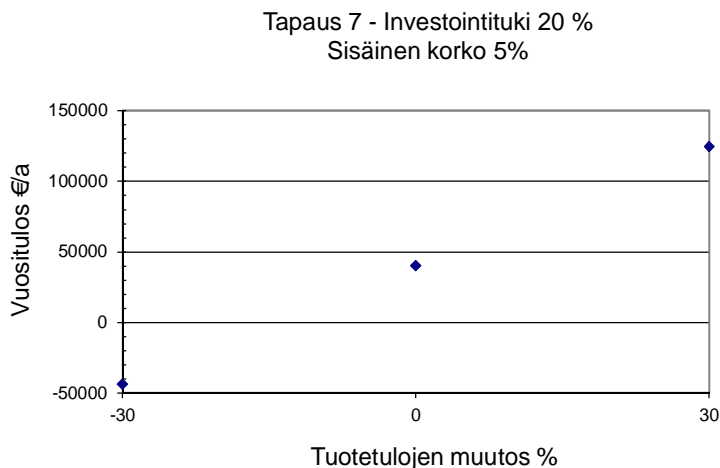
Kuva 8.6. Grillihiilen hinnan vaikutus vuositulokseen.

Kuvassa 8.7 on tarkasteltu kuolettavan investoinnin muutoksen vaikutusta vuositulokseen. Kuolettavan investoinnin perusarvoksi on arvioitu 194 000 €, joka sisältää retortit oheislaitteineen ja varaston. Kuolettava investointi voi olla enintään kolminkertainen eli noin 580 000 € perusarvoon verrattuna, kun muut kustannustekijät pysyvät samana kuin peruslaskelmassa.



Kuva 8.7. Kokonaisinvestoinnin muutoksen vaikutus vuositulokseen.

Kaikkien tuotetulojen hinnan muutoksen vaikutusta vuositulokseen on tarkasteltu kuvassa 8.8. Tuotteista saatavat tulot voivat maksimissaan pudota 14 % käytetyistä perusarvoista. Esimerkiksi seuraavin hinnoin vuositulo on vielä positiivinen: maanparannushiili 0,35 €/kg, grillihiili 0,45 €/kg ja puhdistisle 0,25 €/kg.



Kuva 8.8. Kaikkien tuotetulojen vaikutus vuositulokseen.

8.4 Johtopäätökset

Tuloslaskelmat osoittavat, että niin "Hidaspyro"-projektin (kolmen panosretortin yhteistuotanto ja koko tisleen käyttö karkotteena) kuin edelleen "Hidaspyro II"-projektin (kolmen panosretortin yhteistuotanto, maanparannushiilen ja puhdistisleen tuotanto) päätavoitteet mahdollistavat merkittävän parannuksen kolmella retortilla tapahtuvan tuotannon kannattavuudessa. Maanparannushiili ja puhdistisle ovat tuotteina uusia ja niiden kehittymättömät markkinat ovat selvä riskitekijä tuotannolle. Esitetyssä laskentatapauksessa (tapaus 7) on mahdollista lisätä grillihiilen tuotantoaikaa ja lyhentää vastaavasti biohiilen tuotantoaikaa, mikäli maanparannushiilelle ei ole riittävästi kysyntää. Ylijäämälämmön hyväksikäytön – esimerkiksi puun tai viljan kuivaukseen – arvioidaan parantavan kolmiretorttilaitteiston tuotantotaloutta edelleen. Pidättäytymällä toistaiseksi muusta kuin grillihiilen ja maanparannushiilen rekisteröinnistä voidaan nämäkin lisäkustannukset pitää kohtuullisina. Aika työskentelee tässä tapauksessa yrittäjän puolesta eurooppalaisten sääntöjen selkiintyessä. Esimerkiksi osuuskuntamuotoinen toimintamalli voisi olla hyvä, sillä se madaltaisi tämänkin vaihtoehdon korkeaa investointikynnystä ja mahdollistaisi metsänhoidollisten harvennushakkuiden ohuen koivupuun hyödyntämisen. Valmiita teollisia panostoimisia retorttiratkaisuja on Suomessa saatavilla. Parhaimmillaan kolmiretorttiratkaisu voisi luoda tärkeitä uusia työpaikkoja kyläyhteisöille ja edelleen lisätä toimeliaisuutta ylijäämälämmön pienteollisen hyödyntämisen myötä. Määrätietoisella tutkimus- ja tuotekehitystoiminnalla voidaan pidemmällä tähtäimellä edelleen kehittää puhdistisleelle nykyisiä vaihtoehtoja arvokkaampia ja markkinoiltaan vakaampia käyttökohteita.

9. Johtopäätökset

Hidaspyrolyysireaktorin suunnittelu ja toteutus erilaisten hiilien ja tisleiden tuottamiseksi sovellustesteihin ja prosessin optimoimiseksi onnistui. Kehitettiin kaksivaiheinen ajo-ohjelma, jossa tervavapaa ”puhdastisle” otetaan talteen ensimmäisessä vaiheessa (< noin 300 °C). Kokeiden perusteella valittiin toisessa vaiheessa tapahtuvan hiillon loppulämpötilat (300, 375 ja 475 °C) selkeiden erojen saamiseksi koivu-puuhiilien välille. 300 °C:n lämpötilassa saadun hiilen saanto oli korkea ja kiinteän hiilen pitoisuus hiilessä matala. 375 °C:n lämpötilassa saadun hiilen saanto pieneni ja vastaavasti kiinteän hiilen pitoisuus kasvoi. Hiilien ominaispinta-alat olivat kuitenkin edelleen hyvin pieniä. 475 °C:n lämpötilassa saatu hiili vastasi hyvälaatuisia grillihiiltä, jonka ominaispinta-ala oli suurempi kuin muilla hiillillä. Ensimmäisessä vaiheessa muodostuva ”puhdastisle” on hyödynnettävissä esim. karkotteena ja rikkakasvien torjunta-aineena. Keski- ja korkealämpötiloissa saadut toisen vaiheen tisleet sisälsivät tervaa ja ne voidaan hyödyntää prosessissa energiana.

Hidaspyrolyysikoelaitteisto vastasi sille asetettuja vaatimuksia. Kehitetyllä kaksivaiheisella lämpötilaohjelmalla voidaan optimoida hiilen ja nesteiden saantoa ja laatua. Laitteistoa voidaan hyödyntää erilaisten biomateriaalien pyrolyysitutkimuksissa.

Biohiilen käytön kannalta tärkeä tulos oli biohiilen kyky sitoa vettä tehokkaasti heti maahan sekoituksen jälkeen. Käytännössä biohiili kannattaa levittää kasvu-alueeseen hyvissä ajoin ennen kasvien kylvöä ja aikaan, jolloin on tarve sitoa maassa olevaa vettä. Parantunutta maan vedenpidätyskykyä voidaan hyödyntää kasvintuotannossa sekä toisaalta valumariskien hallinnassa. Hiilen varhainen levitys antaa aikaa myös maan mikrobeille lisääntyä ja parantaa maaperän biologista aktiivisuutta, josta on vajetta monilla pitkään ja yksipuolisessa viljelyssä olleilla mailla.

Karkeaan kivennäismaahan lisätty biohiili lisää kasvien kasvua ja satoa, mutta ei kaikilla tutkituilla viljelykasveilla. Kasvien kasvuun ja ominaisuuksiin vaikuttavat sekä hiilen että kasvin ominaisuudet. Hiiltolämpötilalla ei ollut ratkaisevaa vaikutusta siihen, miten hiililisiä vaikuttaa maan vesi- ja ravinnetalouteen tutkitulla aikavälillä. 300 °C:n lämpötilassa valmistetun hiilen vaikutukset kasvien kasvuun olivat pienempiä ja maan ominaisuuksiin erilaisia kuin korkeammassa lämpötiloissa valmistettujen hiilien. Maaperä- ja kasvukokeissa käytettiin 20 ja 80 t/ha vastaavia hiilimääriä, jotka ovat yleensä käytettyä annostusta (10 t/ha) korkeampia. Hiilten pitempiaikaisia useita vuosia kestäviä vaikutuksia ei tässä tutkittu.

Biohiili parantaa kompostoitumista sekä vähentää typpioksiduulipäästöjä ja hajuhaittoja. On mahdollista parantaa ravinteiden kierrätystä kompostoinnin avulla ja samalla sitoa hiiltä pois kierrosta.

Vaikka biohiilen laatu vaihtelee, puuperäinen biohiili on ympäristöystävällinen tuote, jolla ei havaittu olevan kielteisiä vaikutuksia maaperän hajottajaeliöstöön ja sen toimintaan.

Teknis-taloudellisten arvioiden perusteella uudet prosessikonseptit, joissa tisle käytetään kasvinsuojelussa ja hajunpoistossa, hiili grillihiilenä ja maanparannusaineena ja tervat ja kaasut hyödynnetään energiantuotannossa, mahdollistavat merkittävän parannuksen tuotannon kannattavuudessa aikaisempiin konsepteihin verrattuna.

Tutkimustuloksia voivat hyödyntää esimerkiksi hiilentuottajat, tuotteiden jalostajat ja viranomaiset tuotekehityksessä, pienten hajautettujen biojalostamoiden perustamisessa ja tuotestandardien kehitystyössä.

Lähdeluettelo

1. Fagernäs, L., Kuoppala, E., Arpiainen, V., Tiilikkala, K., Lindqvist, I., Lindqvist, B., Järvinen, O., Hagner, M., Setälä, Bergroth, K. Hidaspyrolyysin liiketoimintojen kehittäminen Suomessa. Espoo 2012. VTT Technology 59. 69 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T59.pdf>.
2. Fagernäs, L., Kuoppala, E., Tiilikkala, K., Oasmaa, A. Chemical composition of birch wood slow pyrolysis products. *Energy Fuels* 2012, 26, s. 1275–1283.
3. Fagernäs, L., Kuoppala, E., Simell, P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in birch wood slow pyrolysis products. *Energy Fuels* 2012, 26, s. 6960–6970.
4. Fagernäs, L., Kuoppala, E., Ranta, J., Setälä, H., Hagner, M., Tiilikkala, K., Palojärvi, A., Lindqvist, B. Overall concepts for utilisation of slow pyrolysis products – Hidaspyro II. Teoksessa: BioRefine Yearbook 2011; Mäkinen, T., Alakangas, E., Kauppi, M. (toim.), Tekes Review 284/2011. Erweko Painotuote Oy, Helsinki, Finland. 2011. S. 172–175.
5. BioRefine – New Biomass Products Programme, 2007–2012. Mäkinen, T., Alakangas, E., Holviala, N. (toim.). Tekes Programme Report 7/2012. Final Report. Erweco Oy, Helsinki, Finland. 2012. 100 s.
6. Antal, M.J., Grønli, M. The art, science, and technology of charcoal production. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003, 42, s. 1619–1640.
7. Grønli, M. Industrial production of charcoal. SINTEF Energy Research. 5 s.
8. FAO TCP 3101: Industrial charcoal production. Domac, J., Trossero, M. (toim.). Zagreb, Croatia, June 2008. 34 s.
9. Fagernäs, L., Kuoppala, E. Development and application of a test rig for slow pyrolysis research. 2014. Hyväksyttävänä *Energy & Fuels* -lehteen.
10. Fagernäs, L., Kuoppala, E., Arpiainen, V. Condensates from torrefaction test runs. 2014. Tullaan lähettämään hyväksyttäväksi *Energy & Fuels* -lehteen.
11. *Trans IChemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(B5), s. 466–472.
12. Zhanga, A., Biana, R., Pana, G., Cuia, L., Hussaina, Q., Lia, L., Zhenga, J., Zhenga, J., Zhanga, X., Hana, X., Yu, X. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice

- paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crop Research* 2012, 127, s. 153–160.
13. Ok-Youn, Yu, Raichle, B., Sink, S. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2013, 4, s. 44. <http://www.journal-ijeee.com/content/4/1/44>.
 14. Anderson, C.R., Condrón, L.M., Clough, T.J., Fiers, M., Steward, A., Hill, A.H., Sherlock, R.R. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia* 2011, 54, s. 309–320.
 15. International Biochar Initiative. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. Product Definition and Specification Guidelines. 2012.
 16. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K.Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 2010, 327, s. 235–246.
 17. OECD, Earthworm acute tests no. 207. In *Guideline for Testing of Chemicals*. 1984. ISBN 9789264070042.
 18. Iswaran, V., Jauhri, K.S., Sen, A. Effect of charcoal, coal and peat on the yield of moong, soybean and pea. *Soil Biology & Biochemistry*, 1980, 12, s. 191–192.
 19. Elad, Y., Cytryn, E., Meller Harel, Y., Lew, B., Graber, E.R. The biochar effect: plant resistance to biotic stresses: a review. *Phytopathologia Mediterranea* 2011, 50, s. 335–349.
 20. Rondon, M.A., Lehmann J., Ramirez J., Hurtado, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar addition. *Biology and Fertility of Soils* 2007, 43, s. 699–708.
 21. Van Zeiten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S., Petty S., Rust J., Chan, K.Y. A glasshouse study on interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil. *Australian Journal of Soil Research* 2010, s. 48.
 22. Beeslay, L., Moreno-Jimenez, E., Gomez-Eyles, J. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in multi-element polluted soil. *Environmental Pollution* 2010, 158, s. 2282–2287.

23. Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T., Sherlock, R., Condon, L. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and Soil* 2012, 350 (1–2), s. 57–69. DOI 10.1007/s11104-011-0870-3.
24. Vandecasteele, B., Mondini, C., D'Hose, T., Russo, S., Sinicco, T., Quero, A. A. Effect of biochar amendment during composting and compost storage on greenhouse gas emissions, N losses and P availability. 2013. Proc. The 15th Ramiran International Conference. Versailles, France, 3–5.6.2013. http://www.ramiran.net/doc13/Proceeding_2013/documents/S8.33.pdf.
25. Takahara, Y., Katoh, K., Inaba, R., Iwata, H. Study on odor control using wood vinegars (II). Application of wood vinegars to piggery wastes. *Nihon Koshu Eisei Zasshi* 1994, 41(2), s. 147–56.
26. Choi, J.Y., Shinde, P.L., Kwon, I.K., Song, Y.H., Chae, B.I. Effect of wood vinegar on the performance, nutrient digestibility and intestinal microflora in weanling pigs. *Asia-Australasian Journal of Animal Sciences* 2009. <http://www.thefreelibrary.com/Effect+of+wood+vinegar+on+the+performance,+nutrient+digestibility+and...-a0195919166>.
27. Sinkkonen, M., Leppänen, T., Heiskanen, J. Markkinaselvitys puupohjaisen hiilen markkinoista maanparannushiilenä ja grillihiilenä. Lahden seudun kehitys Ladec Oy. 13.6.2013. 50 s.
28. Hagner, M. Potential of the slow pyrolysis products birch tar oil, wood vinegar and biochar in sustainable plant protection – pesticidal effects, soil improvement and environmental risks. Reports from the Department of Environmental Sciences, Lahti 2013. Academic dissertation. 42 s. + liitteet.

Nimeke	Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus Biohiili ja tisle
Tekijä(t)	Leena Fagnäs, Eeva Kuoppala, Jussi Ranta, Vesa Arpiainen, Kari Tiilikkala, Riitta Kempainen, Marleena Hagner & Heikki Setälä
Tiivistelmä	<p>Tutkimusprojekti "Hidaspyrolyysin kokonaisratkaisut tuotevirtojen hyödyntämiseksi" (Hidaspyro II) toteutettiin Tekesin "BioRefine Uudet biomassatuotteet" -teknologiaohjelmassa vuosina 2011–2014 tutkimusosapuolten VTT:n, MTT:n ja Helsingin yliopiston kesken. Projektin pää tavoitteena oli hidaspyrolyysiprosessin optimointi kaikkien tuotteiden (hiili, tisleet, terva, kaasut) hyödyntämiseksi ja uusien sovellusten kehittämiseksi. Osatavoitteina oli selvittää hiilen ja tisleiden vaikutus kasveihin, maaperään, maanparannukseen ja viljelyn ympäristöpäästöihin, määrittää hyvän biohiilen laatuksia ja tisleiden käyttömahdollisuuksia hajunpoistossa ja tuotteiden ympäristö- ja ekotoksikologisia vaikutuksia.</p> <p>Hidaspyrolyysiprosessin kehittämiseksi ja optimoimiseksi suunniteltiin ja rakennettiin VTT:lle hallittu panostoinen koelaitteisto (6 kg). Pyrolyysilaitteiston mitoittamiseksi ja ajo-olosuhteiden määrittämiseksi tehtiin ensin TGA-määrittämiä ja useita esikoeajoja. Varsinaisissa koeajoissa valmistettiin koivuuraaka-aineesta hiiltä kolmessa eri hiililämpötilassa ja kerättiin nesteet talteen. Lisäksi tehtiin koeajo mädätysjäätännöksen lietteellä. Kokeiden massataseet määritettiin ja hiili- ja nestetuotteiden laatua ja koostumusta analysoitiin. Eri lämpötiloissa tuotettuja koivuuraaka-aineita käytettiin MTT:n ja HY:n käyttökokeissa. Hiilien vaikutusta kasveihin ja maaperään tutkittiin astiakokeilla kasvihuoneissa ja lierojen toksisuuskokeilla laboratoriossa. Biohiilen ja tisleiden vaikutusta kompostointiin tutkittiin kenttäkokeilla yhteistyössä osallistuvien yritysten kanssa. Tutkimustulosten pohjalta laadittiin uusien prosessikonseptien teknistaloudelliset arvot. Lisäksi tehtiin markkinaselvitys puupohjaisen hiilen markkinoista maanparannusaineena ja grillihiilenä.</p> <p>Pyrolyysilaitteiston suunnittelu ja toteutus erilaisten hiilien ja tisleiden tuottamiseksi ja prosessin optimoimiseksi onnistui. Työssä kehitettiin kaksivaiheinen ajo-ohjelma tervavapaan tisleen, ns. puhdistetun, saamiseksi ja määrän maksimoimiseksi. Ainoana muuttujana koeajoissa oli hiillon loppulämpötila. Kokeiden perusteella valittiin lämpötilat selkeiden erojen saamiseksi hiilien välille. Matalassa lämpötilassa (300 °C) tuotetun hiilen saanto oli korkea ja kiinteän hiilen pitoisuus matala. Keskilämpötilahiilellä (375 °C) saanto pieneni ja vastaavasti kiinteän hiilen pitoisuus kasvoi. Saatujen hiilien ominaispinta-alat olivat kuitenkin hyvin pieniä. Korkean lämpötilan (475 °C) hiili vastasi hyvälaatuisia grillihiiliä. Sen ominaispinta-ala oli 44 m²/g. Kehitetyllä kaksivaiheisella lämpötilaohjelmalla voidaan optimoida hiilen ja nesteiden saantoa ja laatua.</p> <p>Biohiilen käytön kannalta tärkeää oli tieto biohiilen tehosta sitoa vettä tehokkaasti heti maahan sekoituksen jälkeen. Käytännössä biohiili kannattaa levittää kasvualueen hyvissä ajoin ennen kasvien kylvöä ja aikaan, jolloin on tarve sitoa maassa olevaa vettä. Karkeaan kivennäismaahan lisätty biohiili lisäsi kasvien kasvua ja satoa, mutta ei kaikilla testatuilla viljelykasveilla. Kasvien kasvuun ja ominaisuuksiin vaikuttavat sekä hiilen että kasvin ominaisuudet. Hiililämpötilalla ei ollut ratkaisevaa vaikutusta, miten hiiliäsi vaikuttaa maan vesi- ja ravinnetalouteen tutkitulla aikavälillä. 300 °C:een lämpötilassa valmistetun hiilen vaikutukset kasvien kasvuun olivat pienempiä ja maan ominaisuuksiin erilaisia kuin korkeammassa lämpötiloissa valmistettujen hiilien. Biohiili paransi kompostoitumista sekä vähensi typpioksiduulipäästöjä ja hajuhaittoja. On mahdollista parantaa ravinteiden kierätystä kompostoinnin avulla ja samalla sitoa hiiltä pois kierrosta. Vaikka biohiilen laatu vaihtelee, puuperäinen biohiili on ympäristöystävällinen tuote, jolla ei havaittu olevan kielteisiä vaikutuksia maaperän hajottajaeliöstöön ja sen toimintaan. Teknis-taloudellisten arvioiden perusteella uudet prosessikonseptit, joissa tisle käytetään kasvinsuojelussa ja hajunpoistossa, hiili grillihiilenä ja maanparannusaineena, ja tervat ja kaasut hyödynnetään energiantuotannossa, mahdollistavat merkittävän parannuksen tuotannon kannattavuudessa aikaisempiin konsepteihin verrattuna.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-8276-1 (nid.) ISBN 978-951-38-8277-8 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (painettu) ISSN 2242-122X (verkkojulkaisu)
Julkaisu-aika	Kesäkuu 2014
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	74 s.
Projektin nimi	Hidaspyrolyysin kokonaisratkaisut tuotevirtojen hyödyntämiseksi
Toimeksiantajat	Tekes, yritykset
Avainsanat	Slow pyrolysis, birch, biochar, charcoal, distillate, aqueous phase, wood vinegar, tar, soil improvement, composting, odour control, carbon sequestration, environmental effects
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, Puh. 020 722 111

Title	Utilization of slow pyrolysis products and feasibility of the production Biochar and distillate
Author(s)	Leena Fagernäs, Eeva Kuoppala, Jussi Ranta, Vesa Arpiainen, Kari Tiilikkala, Riitta Kempainen, Marleena Hagner & Heikki Setälä
Abstract	<p>The research project "Overall concepts for utilisation of slow pyrolysis products" (Hidaspyro II) was carried out within the "BioRefine – New Biomass Products" programme of Tekes – the Finnish Funding Agency for Technology and Innovation, during the years 2011–2014 in co-operation between VTT Technical Research Centre of Finland, MTT Agrifood Research Finland and University of Helsinki. The primary objective was optimization of slow pyrolysis process for utilization of all the products (charcoal, distillates, tar, and gases) and development of new applications. The aims were to determine the effect of biochar and distillates on plant growth, soil improvement, and odour prevention; to define the quality criteria of biochar in plant production, and to assess ecotoxicological and environmental impacts of the products.</p> <p>To develop and optimize the pyrolysis process, a controlled testing facility (batch, 6 kg) was planned and constructed at VTT. TGA tests and several performance tests with the equipment were carried out for dimensioning and determination of the running programs and conditions. Pyrolysis test runs with the equipment were carried out for birch wood at three different carbonization temperatures and the distillates were collected. In addition, a pyrolysis test run was carried out with digested sludge raw material. The mass balances were determined and the quality and composition of biochars and distillates were analysed. Biochars produced from birch wood at different temperatures were provided to efficacy and environmental tests at MTT and the University of Helsinki. The impact of biochars on plants and soil was studied with pot tests in greenhouses and toxicity tests in laboratory. The effect of biochar and distillates on composting process was studied in field tests in collaboration with the companies participated in the project. Based on our results techno-economic assessments of new process concepts were made. In addition, a survey of biochar markets as soil amendment and charcoal was carried out.</p> <p>The planning and realization of the pyrolysis equipment for production of different biochars and distillates and optimization of the process succeeded. A two-phase running program was developed to produce a tar-free distillate, wood vinegar, and to maximize its yield. The final carbonization temperature was the only variable in the test runs. The temperatures were selected to obtain clear differences between the different biochars. The biochar produced at low temperature (300 °C) had a high yield and low fixed carbon content. For the biochar of 375 °C the yield decreased and respectively the fixed carbon content increased. The BET surface areas were, however, relatively small. The biochar produced at 475 °C corresponded to charcoal of good quality. The BET surface area was 44 m²/g. With the two-phase temperature program developed, the yield and quality of biochar and distillates can be optimised.</p> <p>On the grounds of biochar use, knowledge about biochar capability to bind water effectively immediately after mixing with the soil was important. In practice it is profitable to mix biochar in the soil in good time before sowing of plants and when water in the soil is needed to be bound. Biochar added to coarse mineral soil increased the growth and yield of plants, but not for all tested crops. The properties of both the plant and biochar affect the growth and properties of the plant. The carbonization temperature had no decisive effect, how biochar affects the water and nutrient economy during the studied period. The biochar produced at 300 °C affected the plant growth less and soil properties differently than biochars produced at higher temperatures. Biochar improved composting process and decreased nitrous oxide and odour emissions. It is possible to improve recycling of nutrients via composting and at the same time to sequester carbon from the cycle. Though the quality of biochar varies, wood-based biochar is a pro-environmental product, which was not found to have negative effects on the decomposing organisms of the soil. The techno-economic estimates showed that the new process concepts, which produce wood vinegars for plant protection and odour prevention, biochar for soil improvement, charcoal for barbecue coke, and tars and gases for energy, were clearly more profitable than the ones previously estimated.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-8276-1 (Soft back ed.) ISBN 978-951-38-8277-8 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (Print) ISSN 2242-122X (Online)
Date	June 2014
Language	Finnish, English abstract
Pages	74 p.
Name of the project	Hidaspyrolyysin kokonaisratkaisut tuotevirtojen hyödyntämiseksi
Commissioned by	Tekes, companies
Keywords	Slow pyrolysis, birch, biochar, charcoal, distillate, aqueous phase, wood vinegar, tar, soil improvement, composting, odour control, carbon sequestration, environmental effects
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus

Biohiili ja tisle

Hidaspyrolyysi on lupaava tekniikka tuottamaan biohiiltä, tisleitä ja kaasuja eri tarkoituksiin. Hiiltoretorttien toiminnan kannattavuuden parantamiseksi tulisi grillihiilituotannon sivutuotteet hyödyntää sekä pidentää vuotuista tuotantoaika. Tervavapaa koivutisle on kaupallisesti lupaava tuote kasvinsuojeluun. Hiilen vaihtoehtoisista käyttömuodoista suurin kasvupotentiaali liittyy maanparannusaineena käytettävään biohiileen.

Tavoitteena oli hidaspyrolyysiprosessin optimointi kaikkien tuotteiden hyödyntämiseksi. Tutkimus toteutettiin Tekesin BioRefine-ohjelmassa yhteistyössä VTT:n, MTT:n, Helsingin yliopiston ja useiden pk-yritysten kesken. Prosessin optimoimiseksi suunniteltiin VTT:lle hallittu pyrolyysikoelaitteisto, jolla valmistettiin koivupuusta erilaisia hiiliä eri hiillon loppulämpötiloissa. Hiilten vaikutusta kasveihin ja maaperään tutkittiin astiakokeilla kasvihuoneissa ja lierojen toksisuuskokeilla. Hiilen ja tisleen vaikutusta kompostointiin ja hajuhaittojen torjuntaan tutkittiin kenttäkokeilla yritysten kanssa. Tulosten pohjalta laadittiin uusien prosessikonseptien teknis-taloudelliset arviot.

Koelaitteiston toteutus onnistui ja kehitettiin kaksivaiheinen ajo-ohjelma tervavapaan tisleen tuottamiseksi. Lämpötilaohjelmalla voidaan optimoida hiilen ja nesteiden saantoa ja laatua. Käytännössä biohiili kannattaa levittää kasvualustaan hyvissä ajojen ennen kasvien kylvöä ja aikana, jolloin on tarve sitoa maassa olevaa vettä. Karkeaan kivennäismaahan lisätty biohiili lisäsi kasvien kasvua ja satoa, mutta ei kaikilla testatuilla viljelykasveilla. Kasvien kasvuun ja ominaisuuksiin vaikuttavat sekä hiilen että kasvin ominaisuudet. Biohiili paransi kompostoitumista sekä vähensi typpioksiduulipäästöjä ja hajuhaittoja. Puuperäinen biohiili on ympäristöystävällinen tuote, jolla ei havaittu olevan kielteisiä vaikutuksia maaperän hajottajaeliöstöön ja sen toimintaan. Uudet prosessikonseptit, joissa tisleet käytetään kasvinsuojelussa ja hajuhaittojen torjunnassa, hiili grillihiilenä ja biohiilenä ja tervat ja kaasut hyödynnetään energiana, tuovat merkittävän parannuksen tuotannon kannattavuuteen aikaisempiin konsepteihin verrattuna. Tuloksia voivat hyödyntää hiilentuottajat, tuotteiden jalostajat ja viranomaiset mm. tuotekehityksessä, pienten hajautettujen biojalostamoiden perustamisessa ja tuotestandardien kehitystyössä.

ISBN 978-951-38-8276-1 (nid.)

ISBN 978-951-38-8277-8 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-1211 (painettu)

ISSN 2242-122X (verkkójulkaisu)