



**KOMPENSAATIOKÄYTTÖÖN TUOTETUN BIOHIILEN ARVOKETJUN
KIERTOTALOUSHALLI**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2022

Jenni Noki

Tarkastaja: Tutkijaopettaja, dosentti, MMT Mirja Mikkilä

Ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Miika Marttila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Ympäristötekniikka

Jenni Noki

Kompensaatiokäyttöön tuotetun biohiilen arvoketjun kiertotalousmalli

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2022

41 sivua, 5 kuvaa, 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja, dosentti, MMT Mirja Mikkilä

Ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Miika Marttila

Avainsanat: kiertotalous, biohiili, arvoketju, ympäristö, sivuvirta, elinkaari, kompensaatio, päästöt, hiilikompensaatio, kompensaatiomarkkinat, kiertotalousmalli, hiilensidonta, hiilineutraalius

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on selvittää kompensaatiomenetelmänä käytettävän biohiilen kiertotalousmallin taloudellista potentiaalia. Lisäksi pohditaan tuotteen taloudellista kehitystä. Työssä muodostetaan kirjallisuuslähteiden avulla arvoketju biohiilelle ja sitä hyödynnetään potentiaalın ja vaadittujen skaalojen tarkastelussa. Kompensaatiomarkkinoita ja biohiiltä tuotteena käsitellään kiertotalouden näkökulmasta. Tässä työssä on pyritty arvioimaan paitsi hintaa laskevia tekijöitä ja biohiilen tuotantoprosessin kokonaisvaltaista vaikutusta kansantalouteen mutta myös tuotteen potentiaalia toissijaisten talouskäsitusten pohjalta.

Biohiilen ilmastovaikutukset on tieteellisesti todettu, mutta esteeksi tuotteen valtavirtaistamiselle on muodostunut korkea hinta. Varsinkin pienemmän mittakaavan biohiililiiketoiminnassa on paljon potentiaalia. Biohiilelle lisäarvoa tuottaa erityisesti sen monet positiiviset ympäristövaikutukset hiilensidontapotentiaalın ohella. Erilaiset yhteistuotannot ja käyttökohteiden yhdistäminen saattaisivat parantaa tuotteen kannattavuutta. Mikäli taloudellista potentiaalia tarkastellaan kiertotalouden tai vaihtoehtoisten talouskäsitusten pohjalta, olisi se huomattavasti suurempi kuin lineaarisen talouskäsituksen kautta tarkasteltuna. Biohiilen markkina-asemaa pystyttäisiin kehittämään esimerkiksi erilaisten tukien avulla, sääntelyä helpottamalla tai tutkimukseen ja resurssitehokkuuteen keskittymällä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Environmental Technology

Jenni Noki

The circular economy model for the value chain of biochar produced for carbon offsets

Bachelor's thesis

2022

41 pages, 5 figures, 1 table

Examiner: Associate Professor, docent, D. Sc. (Agr. & For.) Mirja Mikkilä

Supervisor: Junior Researcher, M.Sc. (Tech.) Miika Marttila

Keywords: circular economy, biochar, value chain, environment, branch current, life cycle, compensation, emissions, carbon compensation, carbon offset market, circular economy model, carbon sequestration, carbon neutrality

The objective of this bachelor's thesis is to elucidate the economic potential of the biochar produced by using a circular economy model. The focus in this study is biochar in carbon offset markets. In addition, the economic development of the product is considered. In this study, a value chain for biochar is formed with the help of literature sources and it is utilized in the examination of potential and required scales. The carbon offset market and biochar as a product are treated from a perspective of circular economy. This thesis is aiming at assessing not only price depressing factors and the overall impact of the biochar production process on the national economy, but also the potential of the product based on secondary economic perceptions.

The climate impact of biochar has been scientifically proven, but a high price has become an obstacle to product's success in the market. There is a lot of potential, especially in the smaller-scale biochar business. Its many positive environmental effects are particularly affecting the potential of biochar in the carbon offset market, in addition to its carbon sequestration potential. Based on this study it can be said that the various co-productions and combinations of uses could improve the profitability of the product. If the economic potential is considered based on the circular economy or alternative economic concepts, it would be significantly higher than when viewed through the linear economic concept. The market position of biochar could be developed, for example, through various allowances, regulatory facilitation or a focus on research and resource efficiency.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

CO ₂	hiilidioksidi
CDR	carbon dioxide removal, hiilidioksidin sitominen pois ilmakehästä
HTC	hydrothermal carbonization, hydrotermien käsittely
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change, Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
NETs	negative emissions technologies, teknologiat, joilla pyritään hiilineutraaliuteen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Symboli- ja lyhenneluettelo

1.	Johdanto.....	7
2.	Menetelmä ja aineistot.....	9
3.	Kiertotalouden hyödyntäminen biohiilen arvoketjun eri vaiheissa.....	10
3.1.	Biohiilen arvoketju.....	11
3.2.	Sivuvirrat biohiilen raaka-aineena	13
3.2.1.	Metsäteollisuus	14
3.2.2.	Maatalous.....	14
3.2.3.	Elintarviketeollisuus	15
3.2.4.	Sivuvirtojen hyödyntämisen haasteet	15
3.3.	Biohiilen jalostus.....	16
3.4.	Biohiilen loppukäyttö.....	17
4.	Markkinat	19
4.1.	Biohiilen markkinoiden nykytilanne.....	19
4.2.	Kompensaatiomarkkinat	20
4.2.1.	Kiertotalouden liiketoimintamallit kompensatiomarkkinoilla.....	21
4.2.2.	Vapaaehtoisten päästökompensaatiopalveluiden toimintamallit.....	22
4.2.3.	Kompensaation nykytilanne Suomessa	23
4.2.4.	Biohiileen pohjautuvat kompensatiorahastukset	24
5.	Biohiilen kestävyys ja kiertotalousmallin taloudellinen potentiaali.....	25
5.1.	Kannattavuuden nykytilanne.....	26
5.2.	Kilpailukyky markkinoilla	26
5.3.	Tuotannon skaalaus	26
5.4.	Biohiili kestävä tuotteena	27
6.	Keskustelu	29
7.	Johtopäätökset ja yhteenveto	31
7.1.	Tuet	32

7.2. Sääntely	33
7.3. Tutkimus	34
Lähteet	35

1. Johdanto

Ihmisen toiminta aiheuttaa vakavia muutoksia ilmastossa. Kasvihuoneilmiö on yksi merkittävimmistä ihmisen toiminnan seurauksena voimistuneista ilmiöistä. Kasvihuoneilmiössä muodostuvat kasvihuonekaasut hidastavat auringon lämpösäteilyn poistumista maapallolta, aiheuttaen maapallon lämpötilan nousun. Kasvihuonekaasuista keskeisin on hiilidioksidi. Ihmisen toiminta vapauttaa hiiltä varastoista, kuten maaperästä, hiilidioksidipäästöinä lisäten hiilen määrää ilmakehässä. Hiilen normaali kierto maapallolla häiriintyy näistä hiilidioksidipäästöistä johtuen. Yhä suurempi osa kiertossa olevasta hiilestä sijaitsee ilmakehässä muiden varastojen varastointikyvyn heiketessä. Näin ollen ilmakehän CO₂-pitoisuus kasvaa koko ajan voimistaen ilmastonmuutoksen vaikutusta. Hiilen kierron tasapainottamiseksi on kehitetty useita kompensatiomenetelmiä. Kompensoinnilla pyritään vaikuttamaan hiilen kiertoon esimerkiksi muodostamalla hiilinieluja. (Ilmasto-opas.fi 2021; Laine ym. 2020, 3.)

IPCC:n kuudennen arviointiraportin ensimmäisen osan mukaan yksi keino ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden vähentämiseksi olisi hiilen sitominen suoraan pois ilmakehästä. Hiiltä sitomalla pyrittäisiin laskemaan ihmisen toiminnan aiheuttamat hiilidioksidin nettopäästöt nolnaan hiilinieluratkaisujen avulla ja samalla palauttamaan hiilen kierto normaaliksi. Lisäksi menetelmillä on arvioitu olevan useita sivuhyötyjä ilmasto- ja ympäristöhyötyjen ohella. Raportissa on käsitelty muun muassa vaikutuksia monimuotoisuuteen sekä ruoantuotantoon. Hiilensidontamenetelmiin liittyy kuitenkin haasteita, sillä niiden kokonaisvaikutusta hiilen kiertoon on vaikeaa mallintaa. Raportissa arvioidaan, että tietyn suuruisten päästöjen kompensointiin tarvittaisiin todellisuudessa alkuperäisiä päästöjä suurempi määrä hiilensidontaa hiilen kierron epävarmuuksista johtuen. (IPCC 2021, 107.) Haasteiden ratkaisemiseksi ja kokonaisvaltaisten ympäristövaikutusten arvioimiseksi on entistä tärkeämpää tuottaa lisää tutkimusta erilaisista hiilensidontamenetelmistä.

Lehmann & Joseph kuvailevat kirjassaan biohiiltä lupaavaksi hiilensidontamenetelmäksi. Biohiilen valmistusprosessissa raaka-aineena toimii biomassa, jota poltetaan vähähappisissa

oloissa. (Lehmann & Joseph 2009, 1, 5–8.) Biohiilen negatiivinen vaikutus kasvihuonekaasupäästöjen määrään on pystytty näyttämään tieteellisesti. Esimerkiksi Leppäkoski ym. (2021, 13–14) kirjoittaa artikkelissaan pajusta valmistetun biohiilen olevan hiilinegatiivinen. Lisäksi artikkelissa todetaan joutomaalla kasvatetusta pajusta valmistetun biohiilen laskennallisen hiilensidontapotentiaalin kattavan jopa 7,7 prosenttia maatalouden päästöistä Suomessa (Leppäkoski ym. 2021, 1). Myös Varpulan kandidaatintyössä (2020, 30–31) biohiilen potentiaalin toimia osaratkaisuna ilmastonmuutoksen hillitsemisessä todettiin olevan merkittävä ja nettopäästöjen laskennallisista epävarmuuksista huolimatta negatiivinen. Työssä arvellaan kompensatiomarkkinoiden kehittyvän ja nostavan asemaansa tulevaisuudessa, mikä kasvattaisi myös biohiilen asemaa kompensatiomenetelmänä (Varpula 2020, 29–30).

Korkeasta hiilensidontapotentiaalistaan huolimatta biohiiltä ei olla vielä aktiivisesti otettu käyttöön kompensatiomenetelmänä. Fussin ym. (2018, 25) mukaan biohiilen kaupallisen käytön estää tällä hetkellä korkeat tuotantokustannukset. Lehmann & Joseph (2009, 375) puolestaan arvioivat, että biohiilen toimivuuden epävarmuudet ja vähäinen tietoisuus alan toimijoiden keskuudessa vaikuttavat osaltaan kaupallistamiseen. Hiilensidontamenetelmille on kuitenkin kysyntää, joten biohiilen tuominen markkinoille olisi ajankohtaista.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää kompensatiokäytössä hyödynnettävän biohiilen kiertotalousmallin kokonaisvaltaista taloudellista potentiaalia. Hinnan ohella työssä pyritään luomaan kattava kuva biohiilen vaikutuksista kansantalouteen. Työ vastaa muun muassa kysymyksiin, millaiset mahdollisuudet kompensatiokäyttöön tarkoitetulla biohiilellä on kehittyä tuotteena ja miten kiertotalousajattelu vaikuttaa biohiilen taloudellisiin mahdollisuuksiin. Lisäksi ratkaisevia tapoja kasvattaa biohiilen asemaa markkinoilla pohditaan. Työssä keskeisenä näkökulmana on kiertotalous biohiilen arvoketjun eri vaiheissa. Kiertotalousnäkökulman ohella työn keskiöön on valittu kompensatiomarkkinat ja biohiili kompensatiomenetelmänä, mutta biohiilen myyntiä ja markkinoita käsitellään myös yleisellä tasolla.

2. Menetelmä ja aineistot

Kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuusselvityksenä. Työn kolmannessa luvussa määritetään arvoketjun vaiheet biohiilen tuotantoprosessille ja tarkastellaan sivuvirtojen hyödyntämistä näissä vaiheissa. Neljännessä luvussa käydään läpi biohiilen markkinoita yleisesti sekä kompensatioiden kautta. Muun muassa kompensatiomarkkinoiden toimintaa sekä kiertotalouden liiketoimintamalleja määritetään kirjallisuuslähteiden avulla. Viidennessä luvussa määritetään taloudellinen potentiaali aiemmissa luvuissa rakennetun teoreettisen viitekehyksen avulla. Kandidaatintyön lopun keskusteluosuudessa käydään läpi tutkimuksen validiteettia sekä pohditaan tulosten reliabiliteettia. Johtopäätöksissä pohditaan vielä biohiilen taloudellisten mahdollisuuksien kehittymistä sekä kiertotalousnäkökulman vaikutusta tuotteeseen.

Kirjallisuuskatsaus tutkimusmuotona pohjautuu tieteellisiin lähteisiin. Kaksi keskeistä tutkimusmenetelmää ovat määrällinen ja laadullinen tutkimus. (Metsämuuronen 2008, 13–14). Kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus vaatii toteutuakseen laajan tutkimusaineiston, kun puolestaan kvalitatiivisen eli laadullisen tutkimuksen aineisto rajataan. Laadullisessa tutkimuksessa on tarkoituksena selittää tiettyä ilmiötä tai tapahtumaketjua. (Alasuutari 2011, 38–39.) Tässä kandidaatintyössä hyödynnettävä menetelmä on laadullinen tutkimus. Työssä pyritään selvittämään kokonaisvaltaista kuvaa biohiilen potentiaalista, joten laadullisen tutkimuksen menetelmät sopivat tutkimiseen paremmin kuin tilastoiminen.

Tavallisesti laadullisen tutkimuksen aineisto kerätään haastatteluiden, litteroinnin ja havainnoinnin perusteella sekä analysoimalla aiemmin tuotettuja tekstejä. Laadullisen tutkimuksen laadusta riippuen metodeja voidaan valita yksi tai useampia (Metsämuuronen 2008, 14–15). Kandidaatintyön laajuus ja aikataulu kuitenkin mahdollistavat lähinnä valmiina olevan, eli sekundäärisen, aineiston käyttämisen lähteenä. Olemassa olevien lähteiden kanssa pitää kiinnittää erityistä huomiota valittujen lähteiden reliabiliteettiin. Lähteiden arviointia jatketaan luvussa kuusi.

3. Kiertotalouden hyödyntäminen biohiilen arvoketjun eri vaiheissa

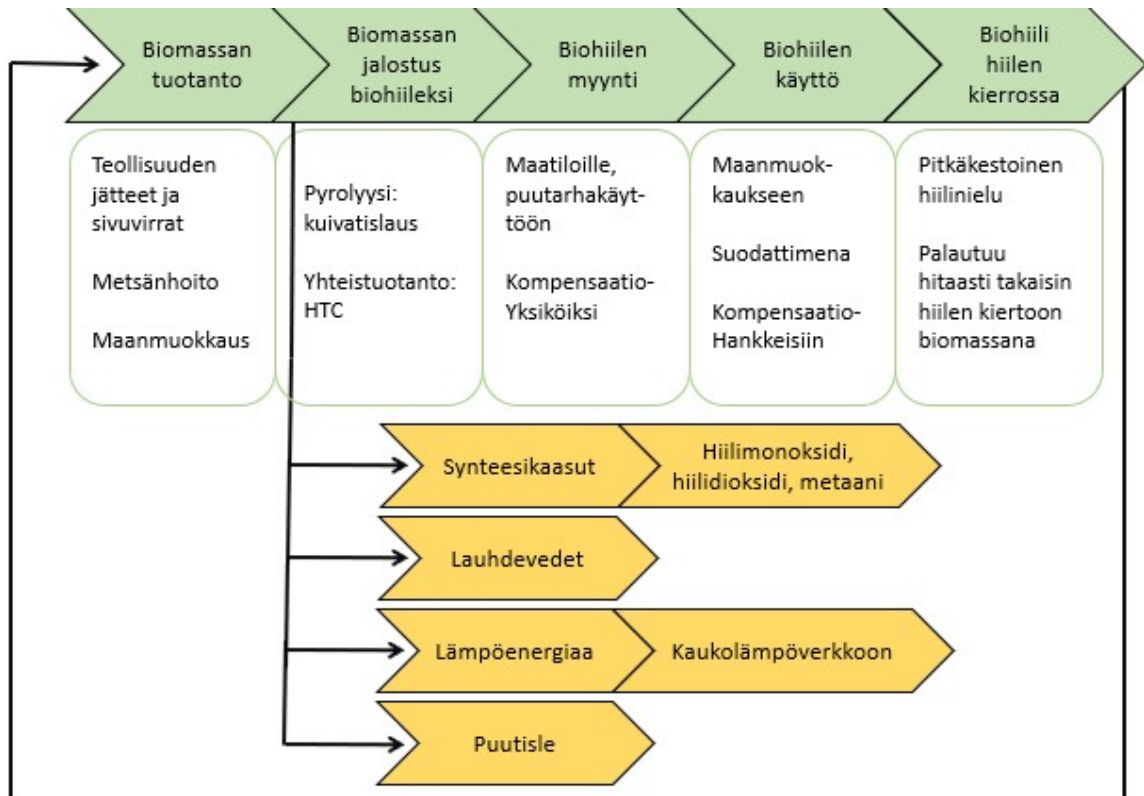
Maailman luonnonvarat hupenevat nykyisen sääntelyn nojatessa edelleen vahvasti ajatukseen lineaarisesta talousmallista. Neitseellisten raaka-aineiden ylikulutukseen pyritään esimerkiksi Euroopan unionissa vaikuttamaan vuonna 2015 hyväksytyyn kiertotalouspaketin avulla. Tuotteiden käyttöiän pidentämisen lisäksi talousjärjestelmää halutaan muuntaa kestävämmäksi tuotteen elinkaaren joka vaiheessa. (Probst ym. 2016, 2–3.)

Kiertotalous on elinkaariajatteluun ja resurssitehokkuuden maksimointiin perustuva talousmalli. Ellen McArthur -säätiö on luonut kiertotaloudelle viitekehyksen, joka muodostuu kolmesta pääpilarista:

- 1) Luonnonvarojen suojelu neitseellisten raaka-aineiden rajallisia resursseja kontrolloimalla ja uusiutuvia resursseja tasapainottamalla.
- 2) Resurssien optimointi kierrossa olevilla raaka-aineilla elinkaaren eri vaiheissa.
- 3) Systemaattisen tehokkuuden harjoittaminen suunnittelemalla prosessit ilman haitallisia ulkoisvaikutuksia, kuten päästöjä. (Ellen McArthur Foundation 2015a, 47–52; Ellen McArthur Foundation 2015b, 7.)

Ellen McArthur -säätiö on luonut perhosdiagrammiksi kutsutun kiertotalouskaavion (kuva 1), joka havainnollistaa materiaalien kiertotalousmallin mukaista elinkaarta. Lineaarinen kulutustapa on esitetty diagrammin keskellä raaka-aineista jätteenpolttoon. Kiertotalousmalliin pohjautuva kulutustapa on taas kuvattu silmukoin lineaarisen mallin ympärille. Diagrammin vasemmalla puolella sijaitsee biologinen kierto, johon biohiilen tuotanto kuuluu.

Muodostuvaan biohiilen arvoketjuun vaikuttaa kiertotalousajattelu. Aiemmin kuvattua Ellen McArthur -säätöön (2022) perhosdiagrammia, arvoketjun yleisiä periaatteita sekä biohiilen elinkaarta soveltaen voidaan luoda kuvan 2 mukainen yksinkertaistettu arvoketju biohiilelle. Biohiilen arvoketjun alulla ja lopulla voidaan ajatella olevan yhteys, sillä biohiilen avulla sidotusta hiilestä tulee lopulta biomassaa, joka on biohiilen pääraaka-aine.



Kuva 2. Biohiilen arvoketju

Esitetty malli on yksinkertaistettu eikä sisällä kuin biohiilen tuotannon sivutuoteketjut. Jokaista arvoketjun vaihetta on laajennettu esimerkein, mutta varsinaista arvoverkkoa ei ole luotu. Tämän luvun alaluvuissa avataan biomassan tuotantoa, jalostusta ja loppukäyttöä tarkemmin. Biohiilen myynnin ja markkinoiden käsittelyyn siirrytään luvussa neljä. Myös erilaisia arvoketjua tukevia toimintoja, kuten tekniikan kehitystä käsitellään tässä työssä.

3.2. Sivuvirrat biohiilen raaka-aineena

Biohiilen raaka-aineeksi kelpaa melkein mikä tahansa biomassa, mutta valittu raaka-aine vaikuttaa merkittävästi valmiin tuotteen laatuun ja ominaisuuksiin. Biohiilen valmistamiseen soveltuvat lukuisat orgaaniset ja ei-orgaaniset aineet. (Kwapinski ym. 2010, 184; Riikonen 2019, 8.) Soveltuvien raaka-aineiden monipuolisuus tarjoaa hyvät mahdollisuudet hyödyntää kiertotalousmallia biohiilen tuotannossa. Johtuen raaka-aineen rakenteen vaikutuksesta lopputuotteen koostumukseen ja laatuun, valmis tuote on suunniteltava tarkkaan. Suunnitteluvaiheessa on kartoitettava, millaisia ominaisuuksia valmiilta tuotteelta halutaan ja raaka-aine valittava sen mukaan. (Boguta ym. 2019, 9.) Myös valittu prosessi vaikuttaa biohiilen ominaisuuksiin (Siipola ym. 2021, 12, 22). Erilaisia tuotantomenetelmiä esitellään tarkemmin luvussa 2.3.

Sitra (2022) määrittelee sivuillaan sivuvirran olevan tuotantoprosessin tuote, joka syntyy lopputuotteen ohella. Siipola ym. (2021, 2) mukaan esimerkiksi saha- ja selluteollisuuden sivuvirroista iso osa jää ilman jatkojalostusta, vaan ne päätyvät perhosdiagrammin (Ellen McArthur Foundation, 2022) mukaisesti esimerkiksi energiaksi. Uusia sovelluskohteita tarvitaan, jotta päästään kohti kestävämpää taloutta (Siipola ym. 2021, 2).

Alalukuihin 3.2.1–3.2.3 on valittu kolme keskeisistä teollisuuden ja alkutuotannon alaa, joiden sivuvirtojen hyödyntämistä biohiilen raaka-aineena on tieteellisesti tutkittu. Alalukuihin on koottu esimerkkejä sivuvirtojen sivuvirroista ja niiden soveltuvuudesta biohiilen raaka-aineeksi. Valitut alat ovat metsäteollisuus, maatalous sekä elintarviketeollisuus. Alaluvussa 3.2.4 käydään vielä läpi sivuvirtojen hyödyntämisen haasteita.

3.2.1. Metsäteollisuus

Metsäteollisuuden sivutuotteet sopivat hyvin biohiilen raaka-aineeksi. Sivutuotteista erityisesti kuorijätteen ja muunlaisen jätteen hyödyntämistä biohiilen tuotantoprosessissa on selvitetty. Metsäteollisuuden sivuvirroista valmistetulla biohiilellä on havaittu olevan eritoten jätevedenpuhdistukseen soveltuvia ominaisuuksia, mutta kompensatiomenetelmänä käytettävän biohiilen materiaaliksi soveltuvat paremmin esimerkiksi maatalouden sivuvirrat. (Boguta ym. 2019; Das ym. 2016; Kwapinski ym. 2010; Siipola ym. 2021).

3.2.2. Maatalous

Siipola ym. (2021, 36) toteaa raportissaan, että etenkin nestemäisistä raaka-aineista valmistetulla biohiilellä on korkea hiilensidontapotentiaali. Raaka-aineeksi sopii maataloudessa syntyvät lanta- ja jätevesilietteet. Jindo ym. (2020, 6) kertoo artikkelissaan muun muassa banaanin kannoista ja merilevästä tuotetun biohiilen lisäävän maaperän kaliumpitoisuutta. Kalium on typen ohella kasvien tärkeimpiä ravinteita (Maaseudun tiede 2007, 2).

Kwapinski ym. (2010, 184) esittää artikkelissaan erilaisista jättemateriaaleista tuotetun biohiilen hiilensidontamahdollisuuksia. Mukana vertailussa oli muun muassa olki, siipikarjan kuivike ja ruokasienien kasvatuksesta jäävä kompostointijäte. Artikkelissa todetaan, että kaikki mainitut raaka-aineet soveltuvat hyvin biohiilen tuotantoon. Pyrolyysireaktio pienentää myös biomassan painoa ja tilavuutta, mikä helpottaa osaltaan jätehuoltoa. Erityisesti oljen kompensointikyky skenaariossa, jossa käytettäisiin myös tällä hetkellä eläinten ravinnoksi käytettävää olkea, oli merkittävä. Erot eri sivuvirtojen välillä selittyvätkin osittain sillä, että eri niitä on saatavilla eri määriä. (Kwapinski ym. 2010, 184.)

3.2.3. Elintarviketeollisuus

Myös elintarviketeollisuudessa syntyy märkiä jätteitä, joiden jatkojalostus on haasteellista. Esimerkiksi rehujakeet, mädätejäänökset ja solumassa, joka on tärkkelyksen valmistamisen sivutuote, soveltuvat biohiilen raaka-aineiksi. (Siipola ym. 2021, 35.) Johtuen mädätysjätteiden kosteudesta biohiilen saanto on massaltaan huomattavasti pienempi kuin siihen tarvittavalla raaka-aineella (Liu ym. 2020, 1–2, 5). Elintarviketeollisuuden jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntämisestä ei ollut saatavilla yhtä paljon tutkimustietoa kuin metsäteollisuuden ja maatalouden vastaavista.

3.2.4. Sivuvirtojen hyödyntämisen haasteet

Sivuvirtojen hyödyntämiseen liittyy monia haasteita, jotka vaikuttavat biohiilen tuotantotehokkuuteen ja edelleen taloudelliseen potentiaaliin. Hämeen ammattikorkeakoulun julkaisemassa selvityksessä (2020, 17) käsitellään puutarhatuotannon orgaanisten sivuvirtojen hyödyntämistä. Selvityksessä listattuja haasteita ovat esimerkiksi sivuvirtojen määrän vaihtelevuus kausittain sekä sivuvirtojen keräämisen, varastoinnin ja kuljetuksen aiheuttamat lisäkustannukset. Lisäksi mainitaan säilytysajan vaikutus sivuvirran laatuun ja hyödyntämismahdollisuuksiin. (HAMK 2020, 17.) Myös Berg (2016, 25) kertoo selvityksessään, että elintarviketeollisuuden sivuvirtojen hyödyntämistä hankaloittaa muun muassa pitkät välimatkat ja niiden aiheuttamat kustannukset. Samoja ongelmia liittyy enemmän tai vähemmän kaikkien teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämiseen.

Sääntely aiheuttaa ongelmia biopohjaisen jäännösmateriaalin hyödyntämiseen. Erityisesti käyttökelpoisen raaka-aineen määrittelemisen jätteeksi lopputuotteen sijaan hidastaa kiertotalousmallin mukaisten tuotteiden kehitystä. Jätelain nojalla jätteeksi määritellyn lopputuotteen hyödyntäminen voi tulla kalliiksi, sillä luokittelun muuttamiseksi sen vaarattomuus olisi osoitettava tutkimuksin. (Alaranta ym. 2015, 3–4; Berg 2016, 26; Korhonen ym. 2018, 45.) Kauppila ym. (2018, 79–80) arvioi raportissaan jätteeksi luokitellun materiaalin päättävän sääntelyn olevan Suomessa tarpeellista. Sääntelyn kehittäminen lisäisi raportin mukaan jätemateriaalin käytön kannattavuutta neitseellisten

materiaalien sijaan ja helpottaisi samalla viranomaisprosesseja. Aiheesta kuitenkin kaivataan systemaattista tutkimusta. (Kauppila ym. 2018, 79–80.) Suomessa kierrätysaste on vielä kaukana EU:n asettamista tavoitteista ja yhteiskuntajätteen määrä kasvaa vuosittain, joten parannusta tavoitteisiin pääsemiseksi tarvitaan (Euroopan parlamentti 2018; Tilastokeskus 2021).

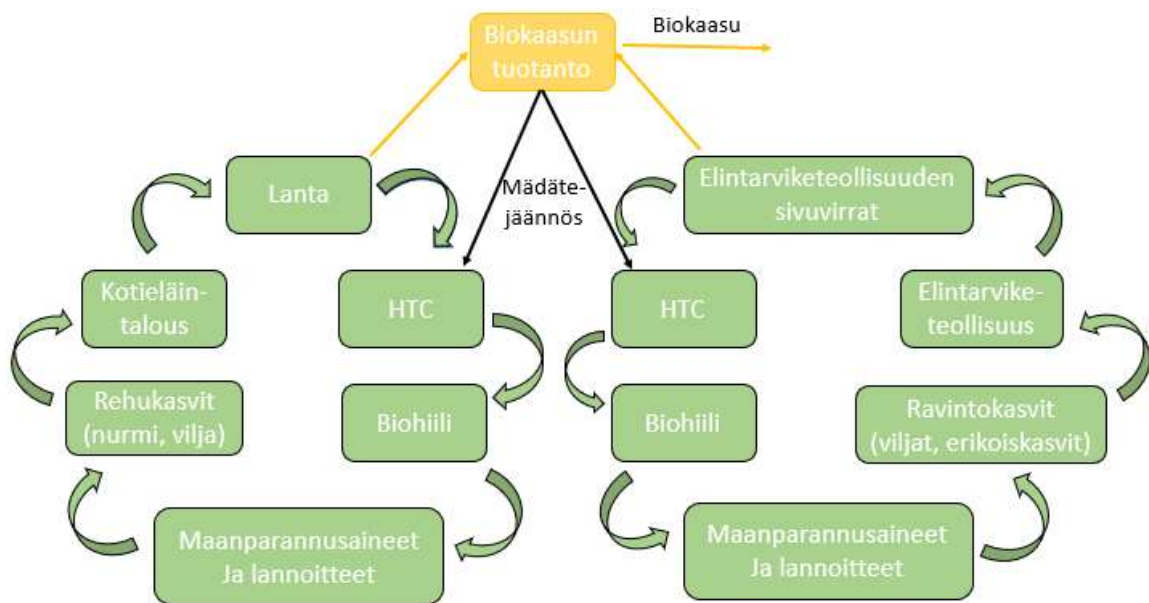
3.3. Biohiilen jalostus

Biohiiltä voidaan tuottaa usealla eri tavalla, joista yleisin on kuivatislaus. Kyseisessä kontrolloidussa pyrolyysireaktiossa hiiletys eli biomassan muuntaminen reaktiossa kiinteään muotoon, tapahtuu lämpötilavälillä 300–500 °C (HighBio, 2008–2011. 1). Biohiilen tuotantoprosessissa syntyy sivutuotteena lämpöenergiaa eli prosessi on eksoterminen. Valmistusprosessin olosuhteiden muuntamisella saadaan muutettua tuotteen ominaisuuksia. Erityisesti tuotantoprosessin lämpötilalla on suuri vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin. Samantyyppisiä hiiletysreaktioita käytetään myös muiden hiilimateriaalien, kuten puuhiilen, valmistamiseen. (Heinonsalo 2020, 34; Lehmann & Joseph 2009, 1–3.)



Kuva 3. Pyrolyysireaktion kulku yksinkertaistettuna

Kosteille raaka-aineille on myös käytössä niin kutsuttu HTC-menetelmä. HTC eli hydroterminen käsittely soveltuu hyvin muun muassa maatalouden sivuvirtojen, kuten lietteiden, prosessoimiseen. Menetelmän avulla esimerkiksi biokaasutuotannon mädätejäännöstä voidaan ohjata biohiilen raaka-aineeksi. Menetelmän avulla voidaan mahdollistaa biohiilen ja biokaasun yhteistuotanto. Yksi merkittävimmistä eroista kuivatislaukseen verrattuna raaka-aineen korkeamman kosteusasteen lisäksi on prosessin alhaisempi lämpötila. HTC-prosessin avulla voidaan maksimoida kiinteän biohiilen saanto jopa yli 80 prosenttiin. Kuva 4 havainnollistaa menetelmän kulkua. (Libra ym. 2011. 99; Siipola ym. 2021. 7, 47–48.)



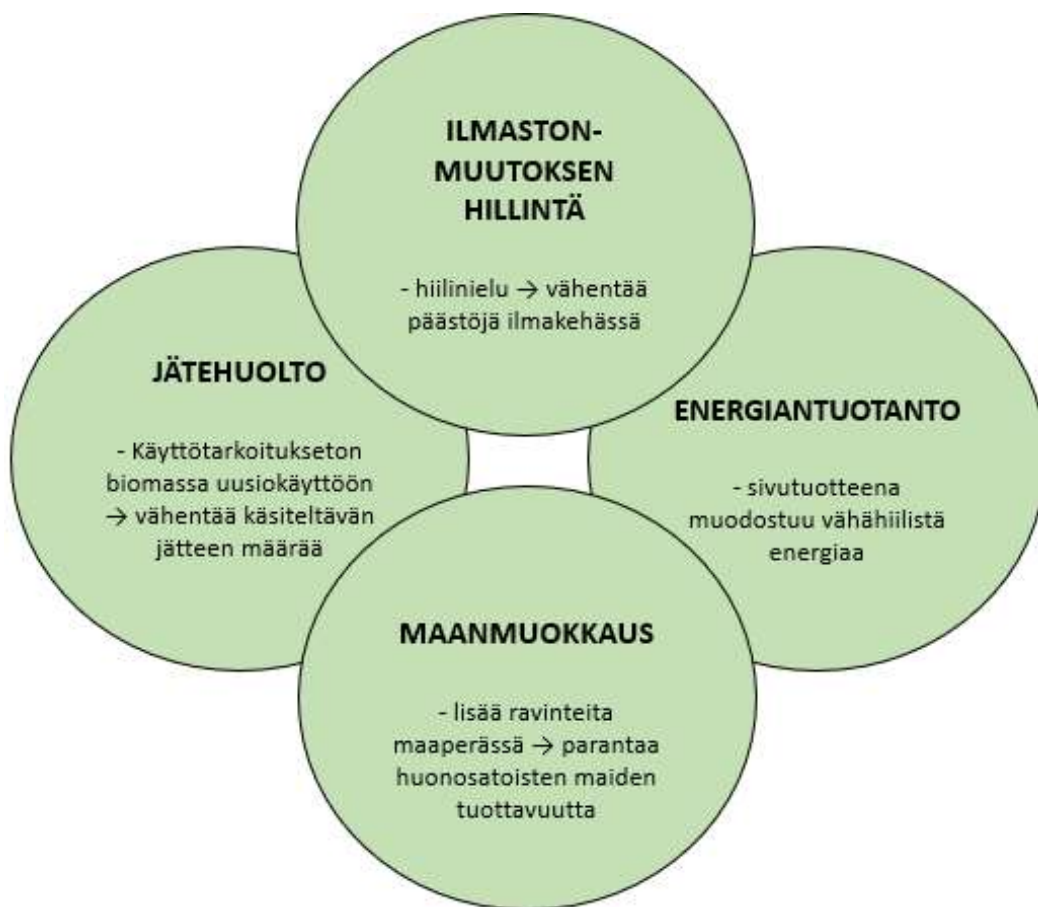
Kuva 4. Kiertotalousmalli biohiilen valmistusprosessille (Siipola ym. 2021, 48.)

3.4. Biohiilen loppukäyttö

Biohiilellä on monia käyttökohteita ja hyötyjä ilmastonmuutoksen hillitsemisen ohella. Biohiiltä käytetään maanmuokkauksessa lisäämään maaperän ravinteita vähentäen lannoittamisen tarvetta. Lisäksi tuotteesta voi olla apua esimerkiksi jätehuollossa. (Lehmann & Joseph 2009, 5–8.) Monien ominaisuuksiensa ansiosta biohiiltä voidaan hyödyntää useilla eri aloilla, kuten rehuteollisuudessa lisäaineena ja tekstiiliteollisuudessa adsorbenttina. Schmidt & Wilson (2014) listaavat artikkelissaan yhteensä 55 käyttökohdetta biohiilelle. Tekstissä todetaan listan olevan vajavainen ja biohiilen olevan vieläkin monikäyttöisempi. (Schmidt & Wilson, 2014.)

Biohiilen tuotantoprosessissa syntyy lämpöenergiaa, joka on myös hyödynnettävissä. Biohiilituotannossa syntyvä lämpöenergia on vähähiilistä. (Lehmann & Joseph 2009, 6–8.) Suomessa esimerkiksi Carbofex myy biohiilituotantonsa sivussa muodostuvan lämmön sähköyhtiölle. (Yle 2019.) Tuotannon sivutuotteena valmistuvaa puutislettä (wood vinegar) voidaan käyttää torjunta-aineena ja lannoitteena. Puutislettä käytetään erityisesti hedelmätarhoissa parantamaan satoa. Biohiilen ja puutisleen yhteisvaikutusta maanmuokkauksessa on tutkittu esimerkiksi (Zhang ym. 2020, 1) artikkelissa.

Tutkimuksessa on pyritty selvittämään yhteiskäytön vaikutusta mustikoiden kasvattamiseen. Tutkimuksessa ei havaittu merkittävää parannusta pensaan kasvuun, mutta saatu marjasato sekä maaperän ravinteisuus kasvoivat. Artikkelin mukaan yhteiskäytön vaikutuksia tulisi tulevaisuudessa tutkia lisää esimerkiksi eri maaperissä. (Zhang ym. 2020, 1, 9–10.) Kuvassa 5 joitakin biohiilen keskeisimpiä hyötyjä on avattu tarkemmin.



Kuva 5. Biohiilen käyttötarkoituksia (Lehmann & Joseph 2009, 5.)

Kompensaatiokäyttöön tuotettu biohiili säilyy maaperässä pitkään. Biohiilen käyttö hidastaa hiilen normaalia kiertoa ja lisää orgaanisen hiilen määrää maaperässä. (Heinonsalo 2020, 34–35.) Kuitenkin lopulta myös biohiili päättyy osaksi hiilen kiertoa biomassana, josta voidaan tuottaa uudelleen biohiiltä.

4. Markkinat

Markkinoiden ensimmäinen alaluku kattaa biohiilen markkinoiden ja myynnin nykytilan. Työn toinen alaluku keskittyy kompensatiomarkkinoihin ja biohiileen kompensatiomenetelmänä. Hiilikompensatioon liittyy paljon potentiaalia biohiilen markkinoiden kasvattamista ajatellen, joten kompensatioon paneudutaan käsitteenä tarkemmin. Kiertotalouden ollessa tämän työn toinen merkittävä näkökulma, kompensatiomarkkinoita käsitellään alaluvussa kiertotalous huomioiden.

4.1. Biohiilen markkinoiden nykytilanne

Biohiilen markkinat ovat alkaneet kasvaa vasta viime vuosina. Esimerkiksi Suomessa uusia yrityksiä ja tuotantolaitoksia on perustettu erityisesti vuodesta 2017 eteenpäin, vaikka ensimmäiset alan toimijat ovat tuottaneet biohiiltä jo reilusti yli kymmenen vuotta. Uusia biohiilituotteita tulee jatkuvasti markkinoille sekä yksityiseen, että yritysten ja maatalouksien käyttöön. Suomalaista biohiiltä on kotimaan lisäksi myyty ulkomaille, esimerkiksi Ruotsiin. (Salo 2019, 8, 12.) Suomen biohiiliyhdistys pitää yllä karttaa kotimaisista alan toimijoista ja vireillä olevista projekteista. Kartan mukaan tällä hetkellä toiminnassa olevia biohiilituotantolaitoksia on neljä ja määrä olisi tuplaantumassa, mikäli vireillä olevat laitoshankkeet toteutuvat. (Suomen biohiiliyhdistys, 2022.)

Itä-Suomen yliopiston artikkelissa (2021) arvioidaan biohiililiiketoiminnassa olevan potentiaalia kasvaa etenkin pienemmillä markkinoilla. Kasvaakseen toiminta tarvitsisi kuitenkin osaamisen ja toimijoiden tukemisen lisäämistä. Artikkelissa esitellään biohiiliohjelma, jonka tarkoituksena on luoda Pohjois-Karjalaan uutta liiketoimintaa biohiilen avulla vuosina 2021–2023. (UEF, 2021.)

Biohiiltä myydään maataloillemkin soveltuvissa suursäkeissä, jonka lisäksi saatavilla on pienempiä määriä puutarhanhoitoon. Tuotteita markkinoidaan viherrakennukseen ja maanviljelyyn maanparannusaineena sekä kompostointialustana. Biohiilen

ilmastovaikutukset ovat myös osa tuotteen markkinointia. Huomionarvoista on myös se, että biohiiltä myydään tilavuuden mukaan, joten hinta esimerkiksi tuhatta kiloa kohden voi vaihdella tuotteiden välillä. (Carbofex Oy 2022; Jaakkola Puutarhakeskus 2022.) Biohiilen korkea hiilensidontapotentiaali on nostanut sen kysyntää päästökompensaationa (Lehmann & Joseph 2009, 320).

4.2. Kompensaatiomarkkinat

Kuluttajien tietoisuus päästöjen vaikutuksista ympäristöön on kasvanut viime vuosina. Tiedon lisääntyminen on saanut runsaasti päästöjä tuottavat toimijat etsimään keinoja toimintansa vastuullistamiseen. Asetelma on luonut kysynnän kompensaatiomarkkinoille. Kompensaatiomarkkinoiden ideana on, että toimija korvaa toimintansa aiheuttaman ilmastohaitan sitomalla päästöjä toisaalla (Adams ym. 2020, 4; Laine ym. 2020, 2). Yritysten lisäksi myös kunnalliset toimijat ja yksittäiset kuluttajat ovat kiinnostuneita päästökompensaatiosta (Ympäristö.fi. 2021.)

Kompensaatiomarkkinat koostuvat säädelystä ja vapaaehtoisesta markkinasta. Säädely markkina kattaa esimerkiksi valtioiden ilmasopimusten mukaiset päästövähennykset, kun taas vapaaehtoisilla markkinoilla tarkoitetaan yritysten, organisaatioiden tai kuluttajien velvoittamatonta päästöjen kompensointia. Markkinoita pyritään säätämään kansainvälisten standardien avulla, mutta osa hankkeista toimii kokonaan standardisoinnin ulkopuolella (Laine ym. 2020, 3.) Kasvavat markkinat tarvitsevatkin selkeämpiä ja yhteneväisempiä linjauksia. (Ympäristö.fi. 2021.) Laine ym. (2020, 2) raportoi, että tieto esimerkiksi Suomessa käynnissä olevista hankkeista on vähäistä eikä sääntelyä juurikaan ole.

Suomessa markkinoille on noussut useita maankäyttösektorin yrityksiä, joiden palvelut vastaavat kysyntään päästökompensaatiosta. Maankäyttösektorilla kompensaatiokäyttöön sopivia maita ovat muun muassa metsät ja kosteikot. (Laine ym. 2020, 2–3.) Kompensaatiomarkkinoilla on myös muita menetelmiä, kuten uusiutuvan energian ja energiatehokkuuden projektit sekä hiilensidontatekniikat. Kompensaatiomenetelmiä ovat

esimerkiksi hiilidioksidia poistavat menetelmät (CDR) ja negatiivisten päästöjen teknologiat (NETs). Menetelmät voidaan jakaa karkeasti teknologisiin ja biologisiin Ellen McArthur -säätön (2022) perhosdiagrammin kiertojen mukaisesti. (European Union Policy Playbook 2022, 1; IPCC 2021, 40; Laine ym. 2020, 3.) Taulukossa 2 on esitetty esimerkkejä kompensatiorankkeista luokiteltuna tämän jaon mukaan.

Taulukko 2: Kompensaatiomenetelmien jakautuminen

BIOLOGISET RATKAISUT	TEKNISET RATKAISUT
metsät	energiatehokkuuden parantaminen
suot	uusiutuvan energian projektit
vaikutusta tehostavat menetelmät, kuten biohiili	vähäpäästöisemmät tekniikat
	päästöjen talteenotto ja neutraloiminen

Kompensaatiomarkkinat vaikuttavat epäsuorasti polkuriippuvuuksiin, sillä myydyt kompensatiorankkeet tukevat vähäpäästöisiä ja esimerkiksi uusiutuvaan energiaan pohjaavia ratkaisuja tehden niistä kilpailukykyisempiä verrattuna fossiilisiin vaihtoehtoihin. Useilla kompensatiorankkeilla on muitakin ympäristöä hyödyttäviä vaikutuksia kuin päästöjen vähentäminen. Monimuotoisuuden edistäminen ja erilaiset sosiaaliset hyödyt ovat esimerkkejä rankkeiden ympäristöhyödyistä. (Ramseur 2009, 6; Sitra 2020.)

4.2.1. Kiertotalouden liiketoimintamallit kompensatiorankkinoilla

Kiertotalouteen pohjautuva liiketoiminta on kehittynyt kannattavaksi jo useille yrityksille. Sitran (2021) sivuilla mainitaan seuraavat viisi keskeistä kiertotalouden liiketoimintamallia:

- 1) Tuote palveluna. Omistusoikeuden sijaan kuluttaja ostaa käyttöoikeuden tuotteeseen esimerkiksi liisauksella.
- 2) Uusiutuvuus. Uusiutuvien materiaalien ja/tai energian käyttö tuotteen elinkaaren eri vaiheissa.
- 3) Jakamisalustat. Tuotteen käytön lisääminen muun muassa jakamisen ja vaihtamisen avulla. Haastaa omistamisen käsitettä samalla tavoin kuin Tuote palveluna -malli.

- 4) Tuotteen elinkaaren pidentäminen. Elinkaarta pyritään pidentämään esimerkiksi erilaisten huolto- ja korjauspalveluiden avulla.
- 5) Resurssitehokkuus ja kierrätys. Elinkaarensa loppuun tulleiden tuotteiden hyödyntäminen kiertotaloutta tukevin menetelmin, kuten kierrättämällä. (Sitra 2021.)

Mainituista kiertotalouden liiketoimintamalleista ainakin ”1) Tuote palveluna” sekä ”5) Resurssitehokkuus ja kierrätys” ovat suoraan sovellettavissa kompensatiomarkkinoilla. Markkinoilla myydään tuotteiden sijaan kompensatiopalveluita (Laine ym. 2021, 11.) Lisäksi jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntäminen kompensatiomarkkinoille asetettavissa hankkeissa, esimerkiksi biohiilen tuotannossa, edistää kiertotaloutta (HAMK 2021).

4.2.2. Vapaaehtoisten päästökompensaatiopalveluiden toimintamallit

Tavallisesti myyntiin asetettava kompensatio jaetaan yksiköihin, jotka vastaavat tiettyä päästövähennystä. Toimijan ostettavien vähennysyksiköiden määrä riippuu aiemmin laskettujen toiminnan päästöjen määrästä. Kompensaatioyksikön hinta määräytyy paitsi kompensatiotavan, mutta myös maailmanlaajuisen kysynnän mukaan. (Lehmann & Joseph 2009, 375–377; Forest Trends Ecosystem Marketplace 2019, 2–4.) Vähennyspalveluiden tarjoamiseen on useita eri toimintamalleja, joista Suomessa on käytössä esimerkiksi:

- 1) Kansainvälisten standardien mukaan lasketut päästövähennysyksiköt
- 2) Eurooppalaisten kansallisten kompensatiojärjestelmien avulla määritellyt päästövähennysyksiköt
- 3) muu valvonta, esimerkiksi kansallisten kompensatiorankkeiden perustaminen

Standardeja määriteltäessä on tärkeää huomioida esimerkiksi päästövähennysten mitattavuus, pysyvyys, kaksoislaskennan välttäminen sekä riippumaton todentaminen. Myös eurooppalaisten kompensatiojärjestelmien päästövähennysyksiköitä muodostaessa tarkastellaan suurilta osin samoja asioita. Eri standardien luotettavuudessa on eroja.

Kansainväliset standardit toimivat yksityisellä sektorilla, kun taas eurooppalaiset järjestelmät julkisella sektorilla. (Niemistö ym. 2021, 24–37.)

Kompensaatiomarkkinat luovat uusia mahdollisuuksia ja toimintatapoja useille aloille. Hiilikompensaatiohankkeet parantavat esimerkiksi metsien liiketalousmahdollisuuksia. Eryityisesti metsänomistajaryhmien, kuten kuntien, on mahdollista hyötyä rahallisesti kompensaatiohankkeista. Hiilikompensaatiohankkeista voivat hyötyä myös maanviljelijät, sillä hankkeet tarjoavat uuden tavan tienata lisätuloja maataloustoiminnalla. Kompensaatiomarkkinoiden vaikutus maanviljelijöiden tuloihin on nykytiedon valossa kuitenkin pieni. (Laine ym. 2020, 37–38, 45.)

4.2.3. Kompensaation nykytilanne Suomessa

Useiden Euroopan maiden tapaan myös Suomen valtio on asettanut päästövähennys- sekä hiilineutraaliustavoitteita muun muassa Pariisin vuoden 2015 ilmastositomukseen pohjautuen. Yksi tavoitteista on hiilivarastojen vahvistaminen, mikä osaltaan kasvattaa kiinnostusta biohiilihankkeita kohtaan. Valtion kompensaatiotoimet ovat jokseenkin säädeltyjä eikä vapaaehtoinen kompensaatio ole juurikaan käytössä. Valtion lisäksi myös useilla kunnilla ja alueilla on tavoitteita päästövähennyksiin liittyen. Näitä tavoitteita on viety eteenpäin kompensaatiotoimilla esimerkiksi Lahdessa ja Joensuussa. (Niemistö ym. 2021, 29, 43–48.)

Vapaaehtoisilla markkinoilla tapahtuva päästökompensaatio on toistaiseksi keskittynyt pääasiassa yritysten sisäisen toiminnan päästöjen kompensoimiseen sekä ilmastokompensoitujen tuotteiden tarjoamiseen. Kysyntä suomalaisille päästövähennyshankkeille on kasvussa yrityksiensä lisäksi myös organisaatio- sekä kuluttajatasolla. Vapaaehtoisilla markkinoilla toimivien palveluntarjoajien määrä on tuplaantunut vuosina 2019–2020. Lähes kaikki kotimaiset kompensaatiohankkeet liittyvät maankäyttöön. Vapaaehtoinen kompensaatio on Suomessa vielä niukkaa ja kattoi päästökompensaatiopalveluita tarjoaville yrityksille teetetyin kyselyn mukaan noin puoli

prosenttia valtion kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2019. (Niemistö ym. 2021, 43, 50, 54–55.)

Vapaaehtoisten kompensatiomarkkinoiden sääntelyä tulisi lisätä ja markkinoita yhtenäistää (Laine ym. 2020, 2). Sääntelyn kehitykseen vaikuttaa valtio sekä tuottamalla tietoa aiheesta että asettamalla rajoja toimintaympäristöön. Tiedontarpeita on pyritty kartoittamaan ja tietoa lisäämään teettämällä tutkimusta aiheesta. (Niemistö ym. 2021, 45, 48.) Voimakkaasti kasvavat markkinat voivat olla vaikeasti hallittavissa ja säädeltävissä, mikäli toimiin ei ryhdytä mahdollisimman pian.

4.2.4. Biohiileen pohjautuvat kompensatiorankkeet

Kompensatioiden päätoiminen tarkoitus on elinkeinotoiminnan kestävyuden lisääminen. Kompensatiota ei ole tarkoitettu ensisijaiseksi menetelmäksi, vaan yhdeksi keinoksi vähentää esimerkiksi yrityksen tai kansallisen toiminnan aiheuttamia ympäristöhaittoja. (MMM, 2022.) Kompensatioissa on iso potentiaali kasvaa merkittäväksi osaksi biohiilen markkinoita. Kompensatio vaikuttaisi biohiilen hintaan alentavasti lisäten biohiilen käyttömahdollisuuksia sellaisiin, jotka eivät ole tällä hetkellä taloudellisesti kannattavia. (Carbofex Oy.)

Suomessa biohiileen pohjautuvia kompensatiorankkeita tarjoaa esimerkiksi Puro.earth. Hankkeissa on yksinkertaisuudessaan kyse siitä, että maaperään lisätyllä biohiilellä muodostetaan pitkäaikainen hiilivarasto. (Laine ym. 2020, 7; Puro.earth, 2022.) Päästökompensoinnin lisäksi biohiilellä on monia muita, jo aiemmin esitettyjä, myönteisiä vaikutuksia ympäristöön ja se tarjoaakin ratkaisuja useampaan kestävyysaasteeseen. Biohiilihankkeilla voidaan päästökompensoinnin lisäksi muun muassa kompensoida monimuotoisuutta sekä vaikuttaa maaperän kulumiseen (Laine ym. 2020, 27; Lehmann & Joseph 2009, 5). Sääntelyä parantamalla biohiilihankkeiden kysyntä kompensatiomarkkinoilla voitaisiin saada kasvuun, sillä tämän hetken standardit eivät huomioi biohiilen kaikkia ympäristöhyötyjä kattavasti.

5. Biohiilen kestävyys ja kiertotalousmallin taloudellinen potentiaali

Tarve siirtyä kiertotalouteen on kasvanut, sillä lineaarinen talousmalli johtaa useisiin kestävyys- ja resurssihaasteisiin. Ekologisten tavoitteiden ja kestävyysaasteisiin vastaamisen ohella kiertotalousmallilla on arvioitu olevan merkittävää potentiaalia työllisyysvaikutuksiin sekä kansantaloudellisiin vaikutuksiin (Ellen McArthur Foundation ym. 2015a; Ellen McArthur Foundation ym. 2015b).

Jätteen ja sivuvirtojen hyödyntäminen kiertotalousmallin mukaisesti vaatii muun muassa teknologian ja palveluiden kehittämistä. Teknologian kehitys parantaa resurssitehokkuutta ja vaikuttaa sitä kautta kasvattavasti kansantalouteen. Lisäksi teknologian kehitys luo talouskasvua investointien avulla. (Simons ym. 2018, 1–2.) Luvussa 3.1. käsiteltiin tuotteen muuttamista palveluksi. Muun muassa tämä kiertotalouteen pohjaava liiketoimintamalli kasvattaa tarvetta palveluiden kehittämiseen ja tuottaisi sitä kautta hyötyä kansantaloudelle.

Kiertotalouden edistäminen arvoketjun eri vaiheissa on tärkeää. Jotta sivuvirtoja hyödynnettäisiin ja kiertotaloutta edistettäisiin, olisi tuotannon oltava kannattavampaa kiertotalousmallia hyödynnettäessä kuin lineaarisella tuotantomallilla. Polkuriippuvuus kuitenkin vaikuttaa kiertotalousmalliin pohjautuvien innovaatioiden menestymiseen. Vaikka kiertotalous olisi muihin talousmalleihin verrattuna ekologisesti, taloudellisesti sekä sosiaalisesti kestävin tuotantomalli, se joutuu kilpailemaan valmiiden ja vakiintuneiden rakenteiden kanssa. Korhonen ym. (2018, 44) arvelee artikkelissaan, että edes teknologinen tai hallinnollinen ylivoima ei takaa menestystä valtavirrasta poikkeavalla liiketoimintamallilla. (Korhonen ym. 2018, 44.)

Biohiilen kokonaisvaltaista taloudellista potentiaalia voidaan tarkastella myös perinteisen talouskäsitteen ulkopuolelta. Biohiilen monipuoliset ympäristövaikutukset tuovat paljon lisäarvoa, joka ei ole määriteltävissä tämän hetken talousmallin avulla. Siirtyminen esimerkiksi donitsitalouden (Raworth 2018) mukaiseen malliin, kasvaisi biohiilen

taloudellinen potentiaali merkittävästi. Donitsitaloudessa on kyse planetaaristen rajojen huomioimisesta tuotteita ja palveluita tarjotessa.

5.1. Kannattavuuden nykytilanne

Biohiilen kannattavuuden ja ilmastohyödyllisyyden yhdistäminen on nykytilanteessa vaikeaa. Monipuolisia käyttökohteita ja hyötyjä esitellään markkinoinnissa tuotteen arvon kasvattamiseksi, mutta haasteena on biohiilen laadun ylläpitäminen jatkuvassa tuotannossa. (Riikonen 2019, 4.) Esimerkiksi suomalaisen Carbofexin tuotannon kannattavuus pohjautuu siihen, että biohiilen ohella sivutuotteena muodostuvaa lämpöenergiaa myydään kaukolämpöverkkoon (Korpijärvi ym. 2021, 27). Biohiilituotteen myyntikate ei siis ole yksin riittävä.

5.2. Kilpailukyky markkinoilla

Biohiilen kilpailukykyyn vaikuttaa ennen kaikkea hinta muihin hiilensidontamenetelmiin verrattuna. Tämänhetkinen biohiilen kauppahinta ylittää kannattavan kompensatiotuotteen hinnan. Biohiilen kannattavuus riippuu suurilta osin raaka-aineiden hinnasta (Siipola ym. 2018, 29). Vaikka sivuvirtojen hyödyntäminen olisikin kiertotalouden kannalta keskeistä, se saattaa tuottaa lisäkustannuksia.

Vaikka biohiili onkin tällä hetkellä suhteellisen kallis kompensatiomenetelmä, kiihtyvä tarve hiilikompensaatiolle on nyt jo lisännyt kiinnostusta tuotetta kohtaan. On siis mahdollista, että biohiilen käyttöä lisätään tulevaisuudessa esimerkiksi erilaisten tukien tai biohiiliohjelmien voimin sen sijaan, että hinnan laskemista odoteltaisiin.

5.3. Tuotannon skaalaus

Mahdollisuuksia biohiilituotannon toteuttamiseen laajalla skaalalla on. Sivutuotteiden potentiaali biohiilen raaka-aineena on merkittävä, sillä biohiilen raaka-aineeksi soveltuvia

sivutuotteita on olemassa lukuisia. Raaka-aineista ei siis ole pulaa, mutta tarkastelussa ei olla otettu huomioon esimerkiksi logistiikkakustannuksia. Aiemmin esitetyn HTC-menetelmän eli niin kutsutun märkähiillon mahdollisuuksia biohiilen ja biokaasun yhteistuotannossa on myös selvitetty. HTC-menetelmä on helposti skaalattavissa. (Siipola ym. 2018, 29; Siipola ym. 2021, 8.) Yhdistelmätuotanto vakauttaisi kumpaakin tuotantoprosessia ja näin ollen lisääisi biohiilen houkuttelevuutta.

Siipola ym. tutkimusraportissa (2018, 34) tutkittiin myös toimintakonseptia, jossa aktivoidun biohiilen tuotanto yhteensovitettiin biomassaa energianlähteenä käyttävän voimalaitoksen kanssa. Biohiilen rinnakkaistuotanto parantaa voimalan kannattavuutta ja tasapainottaa toimintaa voimalan lämmöntarpeen ollessa kausiluontoista. Raportissa esitetty alustava tutkimus näyttää, että biohiilen tuotanto rinnakkain voimalaitoksen kanssa olisi taloudellisesti potentiaalinen vaihtoehto. (Siipola ym. 2018, 34.)

Vaikka biohiilen kaltaiselle tuotteelle olisi kysyntää suuremmissakin erissä, biohiiliprosessin skaalaus ylöspäin eli tuotannon laajentaminen vaatisi teknologian kehitystä. Tällä hetkellä biohiilen kehittymispotentiaali on pienemmän mittakaavan laitoksissa. (UEF, 2021.) Kuitenkin isotkin laajennukset tämänhetkisistä tuotantolaitoksista ovat tulevaisuudessa mahdollisia. Lisäksi edellä kuvatuissa yhteistuotannoissa on potentiaalia kasvattaa toiminnanharjoittajien määrää markkinoilla.

5.4. Biohiili kestäväenä tuotteena

Biohiilen lukuisat positiiviset ympäristövaikutukset parantavat tuotteen asemaa kompensatiomarkkinoilla. Biohiili on myös pysyvämpi ja varmempi hiilinielu kuin monet muut maanmuokkaukseen perustuvat kompensatiorankkeet. (Lehmann & Joseph 2009, 320.) Biohiili on pitkäikäinen ratkaisu hiilivarastoksi sen säilyessä maaperässä aina 100 vuodesta 1000 vuoteen saakka (Niemistö ym. 2021, 36).

Kiertotalousmallin huomioiminen tuottaa lisäarvoa biohiilelle. Vaikka esimerkiksi sivuvirtojen hyödyntäminen biohiilen valmistamisessa edistää kiertotaloutta, voi sillä olla

myös toisenlaisia seurauksia. Korhonen ym. (2018, 44) esittää artikkelissaan mahdollisuuden sille, että kiertotaloustuotteiden lisääntyminen markkinoilla voi aiheuttaa kasvua kokonaiskulutuksessa ja jopa uudenlaisen polkuriippuvuuden. Kiertotaloustuotteiden kysynnän kasvaessa raaka-aineiden saatavuus ei välttämättä kohtaa tarpeita. Tällöin yritykset joutuisivat lisäämään neitseellisten materiaalien käyttöä tuotteiden valmistuksessa pitääkseen asemansa markkinoilla. Polkuriippuvuuskyseymys olisikin huomioitava myös organisaatiokulttuurissa, liiketoimintastrategiassa ja johtamismalleissa pelkästään tuotteen laadun ja elinkaaren sijaan. (Korhonen ym. 2018, 44.)

6. Keskustelu

Tässä kandidaatintyössä on pyritty selvittämään biohiilen arvoketjun kiertotalousmallia ja kokonaisvaltaista taloudellista potentiaalia. Erityiseksi tarkastelun kohteeksi valikoitui kompensatiomenetelmänä käytetty biohiili. Menetelmänä laadullinen tutkimus sopi työn toteuttamiseen hyvin. Kirjallisuuslähteiden avulla pystyttiin luomaan melko kattava kuva biohiilen markkinoista ja taloudellisesta kannattavuudesta. Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin huomioitava työn rajaukset ja laajuus. Tässä työssä on useita keskeisiä teemoja, kuten kiertotalous ja kompensatio, joten kaikkien teemojen yksityiskohtainen tarkastelu ei ole ollut joka kohdassa mahdollista työn laajuudesta johtuen. Lisäksi kattavampaa tutkimusta tehdessä sekundääristen kirjallisuuslähteiden ohella muunlaisen aineiston käyttö toisi tämänkaltaiselle työlle lisäarvoa.

Laajaa tutkittua tietoa biohiilen tuotantoprosessista ja biohiilestä kompensatiotuotteena on saatavilla melko niukasti. Varsinkin määrällistä tutkimusta ja dataa oli tätäkin työtä tehdessä hankala löytää. Lukujen väliset haarukat olivat usein niin suuria, että ne on päätetty jättää tarkoituksellisesti pois työstä. Erityisesti sääntelyä koskevissa osioissa asiaa on tarkasteltu Suomen näkökulmasta, sillä lainsäädäntö ei ole yhteneväistä kansainvälisellä tasolla. Suomi nostetaan esimerkiksi myös muissa kohdissa työtä ja lähteinä on käytetty paljon Suomen tasolla tehtyjä, luotettaviksi arvioituja selvityksiä.

Epävarmuutta tähän kandidaatintutkielmaan aiheuttaa juuri kirjallisten lähteiden vähäisyys. Työssä pyrittiin kuitenkin käyttämään lähteitä monipuolisesti ja tarkastamaan niiden luotettavuus. Monet työssä käsiteltävät käsitteet, kuten kompensatiomarkkinat ja biohiili kompensatiotuhannat, ovat uudehkoja. Käsitteiden ja kompensatioiden vierauden huomaa myös edellisessä aluvuussa käsitellyistä sääntelyyn liittyvistä haasteista. Lisäksi markkinat ja säädäntö on erilaista eri puolilla maailmaa, joten työn yksinkertaistamiseksi on päädytty keskittymään aiheisiin Suomen näkökulmasta. Biohiilen moninaiset käyttökohteet ja ympäristöhyödyt vaikeuttivat osaltaan työn aiheessa pysymistä, sillä hiilensidonnan lisäksi muistakin tavoista käyttää biohiiltä löytyi paljon tietoa. Rajauksia tähän työhön olisi

voinut tehdä enemmänkin ja työn aiheen laajuuden pystyykin huomaamaan paikoitellen keskeisienkin teemojen suppeasta käsittelystä.

Sekä laadullista että määrällistä tutkimusta biohiilestä on edelleen tarpeen tehdä. Aiheesta voisi tehdä laajempaa tutkimusta esimerkiksi vertailemalla eri maiden käytäntöjä ja biohiilen markkinoiden nykytilaa. Toisaalta tarvetta kvantitatiiviselle tutkimukselle on, joten biohiilen taloudellista potentiaalia olisi hyvä tutkia erilaisten case-laskuesimerkkien avulla.

7. Johtopäätökset ja yhteenveto

Ihmiskunnan kestävä raaka-aineiden ja energiankulutus on johtanut planetaaristen rajojen ylittymiseen ja ilmastonmuutoksen vaikutusten voimistumiseen. Päästöleikkausten tekemisen ohella tarvitaan hiilinielujen lisäämistä. Hiilidioksidipäästöjen kompensoiminen on yksi tapa lisätä hiilinieluja ja nopeuttaa hiilineutraaliustavoitteiden toteutumista. Hiilikompensatioon liittyy kuitenkin ongelmia, sillä markkinat ovat sekavat eikä sääntelyä ole yhtenäistetty. Kompensatio pitäisi aina tehdä päästövähennysten yhteydessä, mutta tällä hetkellä markkinat luovat yrityksille mahdollisuuden saavuttaa hiilineutraaliustavoitteensa pelkällä kompensatioyksiköiden ostamisella.

Yhtenä keskeisenä syynä luonnonvarojen kestävä käyttöön ja ilmastonmuutoksen vaikutusten voimistumiseen pidetään nykyistä lineaarista talouskäsitystä. Suomessa kiertotaloutta on pyritty edistämään tekemällä tuotantoprosesseista resurssi- ja energiatehokkaampia, mutta syntyvän jätteen määrä on edelleen ongelma. Suomalaisista kohden muodostuvan yhdyskuntajätteen määrä onkin ollut kasvussa. Tarvetta jätteiden tehokkaampaan käsittelyyn siis on. Materiaalitehokkuuden edistämisen kannalta sääntelyn uudistaminen olisi tärkeää, sillä tällä hetkellä kierrätysmateriaalien hyödyntämiseen liittyy useita lainsäädännöllisiä ongelmia.

Biohiili on potentiaalinen menetelmä paitsi pitkäaikaisten hiilinielujen lisäämiseen kuin myös kiertotalouden edistämiseen. Ongelmaksi biohiilen tuotannon kasvamiselle on muodostunut liian kallis hinta. Tässä kandidaatintyössä esitetyn aineiston pohjalta voidaan kuitenkin sanoa biohiilen taloudellisen potentiaalin olevan merkittävä. Liiketoimintamallien kehittäminen erityisesti pienen skaalan toimijoille vaikuttaisi olevan kannattavaa. Kiertotalousmallin tai vaihtoehtoisten talouskäsitysten pohjalta arvioitu taloudellinen potentiaali on vielä huomattavasti suurempi kuin lineaarisen talouskäsitteen pohjalta arvioitu potentiaali.

Käyttökohteiden moninaisuuden huomioiminen kasvattaa biohiilen taloudellista potentiaalia. Kompensaatiokäytön yhdistäminen johonkin muuhun käyttökohteeseen, kuten maanmuokkaukseen, alentaa myös tuotteen hintaa ja mahdollistaa uudenlaisten käyttökohteiden kannattavuuden. Myös biohiilen tuotannon sivuvirtoja pystytään hyödyntämään kiertotalouskäsitteksen mukaisesti. Biohiilen elinkaaren päästöjä mallinnettaessa onkin tärkeää ottaa huomioon myös tuotannon sivuvirtojen hyödyntäminen mahdollisimman resurssitehokkaasti.

Kiertotalousnäkökulma on ristiriitainen, sillä vaikka se vastaakin kestäväen talouden haasteisiin, aiheuttaa esimerkiksi sivuvirtojen hyödyntäminen mahdollisesti paljonkin lisäkuluja. Jätteen luokiteltu sivuvirta tulee todistaa raaka-aineeksi soveltuvaksi. Tähän liittyvät analyysit, mittaukset ja paperityö voivat lisätä elinkaaren alkupään kuluja merkittävästi. Lisäkulut taas luonnollisesti vaikuttavat negatiivisesti tuotteen taloudelliseen potentiaaliin. Lisäksi jatkuvan biohiilituotannon haasteet vaikuttavat tuotteen laatuun ja sitä kautta sen ominaisuuksiin. Erilaisissa olosuhteissa tuotetun biohiilen ympäristövaikutukset ja käyttökohteet vaihtelevat. Näin ollen biohiilen taloudellinen potentiaali ei ole aina yhtä korkea, kuin optimaalisella tavalla tuotetulla biohiilellä.

Ilmastotoimilla on kiire ja kiinnostus biohiiltä kohtaan on kasvanut korkeasta hinnasta huolimatta. Hiilensidontapotentiaalisista tuotteista pitäisi tehdä yrityksille ja muille toimijoille houkuttelevampia tässä hetkessä ja tällä talouskäsitteellä. Biohiilen markkina-aseman edistäminen ja taloudellisen potentiaalin kasvattaminen lyhyellä aikavälillä vaatisikin hinnan laskua esimerkiksi teknologiaa ja tutkimusta kehittämällä, sääntelyä muuttamalla tai erilaisia tukiratkaisuja käyttämällä. Alaluvuissa 7.1.–7.3. pohditaan tässä työssä esiteltyjen teemojen pohjalta keskeisiä tapoja kasvattaa biohiilen markkina-asemaa.

7.1. Tuet

Nopeimpia tapoja lisätä biohiilen käyttöä, laajentaa markkinoita ja samalla mahdollistaa tuotteen ilmastovaikutusten sekä -potentiaalin tarkempi tutkimus olisi tukien lisääminen.

Biohiilen potentiaalisia hyödyntäjiä ovat esimerkiksi maatilat. Tilalliset toki saavat jo nyt biohiiltä käyttämällä lisätuloja, mikäli pellot ovat mukana kompensatiorahankkeessa. Tulot ovat kuitenkin toistaiseksi pieniä biohiilen käyttökustannuksiin nähden, joten biohiilen käytön laajentaminen vaatisi lisäkannustimia.

Erityisesti luomutilalliset viljelijät hyötyisivät biohiilen maanmuokkauksellisista ominaisuuksista. Lisäksi Venäjän helmikuussa 2022 aloittamat sotatoimet Ukrainaa kohtaan ovat vaikuttaneet esimerkiksi suomalaisten tilojen lannoitteiden saantiin. Tästäkin syystä lisääpu ravinteiden sitomiseen maatiloilla olisi tarpeen. Biohiilen maanmuokkauksellisten ominaisuuksien näkyminen sadossa voi kuitenkin kestää useita vuosia, joten pikaista apua sadon varmistamiseen ei sen avulla voida saavuttaa.

Tilojen sijasta tukea voitaisiin ohjata suoraan biohiiltä tuottaville toiminnanharjoittajille. Tällöin markkinoille tulevan tuotteen hinta saataisiin kilpailukykyiseksi ja houkuttelevaksi esimerkiksi maanomistajille ja viherrakentajille. Yritystoimintaan kohdistettu tuki vaikuttaisi myös teknologian kehitykseen. Tukijärjestelmässä voitaisiin ottaa huomioon sivuvirtojen hyödyntäminen ja näin edistää kiertotaloutta.

7.2. Sääntely

Sekä kompensatioon että kiertotalousmallin edistämiseen liittyy säädännöllisiä ongelmia. Vaikuttaakin siltä, ettei lainsäädäntö pysy kestävä kehityksen perässä, vaan tukee edelleen monilta osin kestäättömiä ratkaisuja. Suomi ei ole onnistunut päivittämään jätelainsäädäntöä EU:n vaatimalle tasolle ja suoriutuu useissa tilastoissa unionin keskitasoa huonommin mitä tulee kierrätykseen ja kiertotalouteen. Suomea kuitenkin usein markkinoidaan ympäristöasioiden edelläkävijänä, mikä voi osittain jarruttaa muutosten toteutumista. Nopeasti muuttuvat ympäristö- ja ilmastoasiat kaipaivat enemmän huomiota ja resursseja sääntelyn puolella, jotta olemassa olevia keinoja ilmastonmuutoksen hillitsemiseen voitaisiin ottaa käyttöön tehokkaammin.

7.3. Tutkimus

Keskeisimpiä keinoja alentaa biohiilen hintaa on tieteen ja tutkimuksen lisääminen. Tutkimuksen avulla tuotantoprosessia pystyttäisiin tehostamaan ja resurssitehokkuutta parantamaan. Paljon tutkittujen, perinteisten lannoitteiden ja viherrakennuksen ollessa tällä hetkellä etulyöntiasemassa, tutkimukseen ja tuotantokehitykseen tulisi panostaa.

Lähteet

Adams, T., Winters, B., Carney, M., Nazareth, A. Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.3.2022]. Saatavissa: https://www.iif.com/Portals/1/Files/TSVCM_Consultation_Document.pdf

Alaranta, J., Ryynänen, E. 2015. Biotalouteen vaikuttavat jäte-, tuote- ja kemikaalilainsäädännön rajapinnat. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2022]. Saatavissa: https://wiivi.uef.fi/crisyp/dis/_/fi/cr_redir_all/fet/fet/sea?direction=2&id=45784118

Alasuutari, P. 2011. Laadullinen tutkimus 2.0. 4. painos. Tampere: Vastapaino. 331 s. ISBN: 978-951-768-385-2

Berg, J. 2016. ETL:n jäte- ja sivuvirtaselvitys 2016. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2022]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/39796653-Etl-n-jate-ja-sivuvirtaselvitys-jenny-berg.html>

Boguta, P., Sokołowska, Z., Skic, K., Tomczyk, 2019. A. Chemically engineered biochar – Effect of concentration and type of modifier on sorption and structural properties of biochar from wood waste. Elsevier Ltd. ISSN: 0016-2361

Carbofex Oy. Biohiili Natural 1.75 m³ suursäkki. [verkkosivu]. [viitattu 10.4.2022]. Saatavissa: <https://biohiili.selz.com/item/5ebd1a2d9b0b860e20917d1a>

Das, O., Bhattacharyya, D., Sarmah, A.K. 2016. Sustainable eco-composites obtained from waste derived biochar: a consideration in performance properties, production costs, and environmental impact. Journal of cleaner production, 2016-08-15. ISSN: 0959-6526

Ellen MacArthur Foundation. 2015a. Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.1.2022]. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>

Ellen MacArthur Foundation. 2015b. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.1.2022]. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>

Ellen MacArthur Foundation. 2022. Circular economy diagram. [verkkosivu]. [viitattu 20.1.2022]. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>

Euroopan parlamentti. 2018. Jätehuolto EU:ssa faktoina ja lukuina. [verkkosivu]. [viitattu 14.2.2022]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/priorities/kiertotalous/20180328STO00751/jatehuolto-eu-ssa>

European Union Policy Playbook. Negative Emissions Technologies (NETs) [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2022]. Saatavissa: https://www.breakthroughenergy.org/~/_Media/Files/BEV/Playbooks/EU/Cross-Cutting/EUCCPNETs.pdf

Forest Trends' Ecosystem Marketplace. 2019. Financing Emissions Reductions for the Future - State of the Voluntary Carbon Markets 2019. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 26.5.2020]. Saatavissa: <https://app.hubspot.com/documents/3298623/view/63001900?accessId=eb4b1a>

Fuss, S., Lamb, W., Callaghan, M., Hillaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G., Rogelj, J., Smith, P., Vincente, J., Wilcox, J., Dominguz, M., Minx, J. 2018. Negative emissions Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental research letters*, 2018: 13. 063002. ISSN 1748-9326.

Hakemulder, R. 2016. Value chain development for decent work: how to create employment and improve working conditions in targeted sectors. 2. painos. Geneva, Switzerland: International Labour Organization. 123 s. ISBN 92-2-130510-4

HAMK. 2020. Puutarhatuotannon kasvisperäiset sivuvirrat hyödyksi. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2022]. HAMKIN E-JULKAISUJA 3/2020. 67 s. ISSN 1795-424X

HAMK. 2021. Biohiili edistää kiertotaloutta ja lisää liiketoimintaa – asiantuntijawebinaari 10.3. [verkkosivu]. [viitattu 8.3.2022]. Saatavissa: <https://www.hamk.fi/2021/biohiili-edistaa-kiertotaloutta-ja-lisaa-liiketoimintaa-asiantuntijawebinaari-10-3/>

Heinonsalo, J. Hiiliopas – katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyn perusteisiin. 2020. [opas]. [viitattu 28.3.2022]. Saatavissa: <https://carbonaction.org/wp-content/uploads/2020/01/BSAG-hiiliopas-1.-painos-2020.pdf>

HighBio – Interreg Pohjoinen. 2008–2011. Projekti-info. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.12.2021]. Saatavissa:

https://ciweb.chydenius.fi/project_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F27.pdf

Ilmasto-opas.fi. 2020. Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. [verkkosivu]. [viitattu 15.11.2021].

Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>

IPCC. 2021. Climate Change 2021 The Physical Science Basis. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2021]. Saatavissa:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

Jaakkola Puutarhakeskus. Biohiili 4 L. [verkkosivu]. [viitattu 10.4.2022]. Saatavissa:

https://www.puutarhakasvit.fi/biohiili-4-l/p/7311610441019/?gclid=Cj0KCQjwxtSSBhDYARIsAEn0thRNM9UZXPz4BulGbv1GAe_ZqE4vBo7lwIx4IGJUJvcNo2NY-SJgyvAaAo80EALw_wcB#description

Jindo, K., Audette, Y., Higashikawa, F.S., Silva, C.A., Akashi, K., Mastrolonardo, G., Sánchez-Monedero, M.A., Mondini, C. 2020. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. *Chemical and biological technologies in agriculture*. ISSN: 2196-5641

Kauppila, J., Turunen, T., Häkkinen, E., Salminen, J., Lazarevic, D. 2018. Jätteen luokittelun päättämisen hyödyt ja haitat. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.4.2022]. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/160560>

Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J. 2018. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological economics*, 2018-01. 37-46 s. ISSN: 1873-6106

Korpijärvi, K., Björnström, M., Karlsson, M., Raitila, J., Virkkunen, M., Hurskainen, M. 2021. Biohiilen valmistus ja käyttö turvetta korvaavana tukipolttoaineena bioenergian tuotannossa. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.5.2022]. Saatavissa: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/52613617/VTT_Tutkimusraportti_BioTur21_VTT_R_717_21_Final.pdf

Kwapinski, W., Byrne, C.M.P., Kryachko, E., Wolfram, P., Adley, C., Leahy, J.J., Novotny, E.H., Hayes, M.H.B. 2010. Biochar from Biomass and Waste. Waste and biomass valorization, 2010-06-12. ISSN: 1877–2641

Laine, A., Auer, J., Halonen, M., Horne, P., Karikallio, H., Kilpinen, S., Korhonen, O., Airaksinen, J., Valonen, M., Saario, M. 2020. Esiselvitys maankäyttösektorin hiilikompensaatiohankkeista. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.3.2022]. Saatavissa: <https://mmm.fi/-/esiselvitys-maankayttosektorin-hiilikompensaatiohankkeista>

Laine, A., Airaksinen, J., Yliheljjo, E., Ahonen, H.M., Halonen, M. 2021. Vapaaehtoisten päästökompensaatioiden sääntely. 2021. [selvitys]. [viitattu 8.3.2022]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163347/YM_2021_26.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Lehmann, J., Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management, science and technology. 1. painos. London: Earthscan. 450 s. ISBN 978-1-84407-658-1

Leppäkoski, L., Marttila, M., Uusitalo, V., Levänen, J., Halonen, V., Mikkilä, M. 2021. Assessing the Carbon Footprint of Biochar from Willow Grown on Marginal Lands in Finland. Sustainability (Basel, Switzerland), 2021-09-09. ISSN: 2071-1050

Libra J.A., Ro S.K., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. Biofuels 2(1). ISSN: 1759-7269

Liu, J., Huang, S., Chen, K., Wang, T., Mei, M., Li, J. Preparation of biochar from food waste digestate: Pyrolysis behavior and product properties. Bioresource technology, 2020–04. ISSN: 0960–8524

Maaseudun tiede. 2007. Kaliumista tehokkuutta ja kestävyyttä kasvuun. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/maaseuduntiede/pdf/mtt-mt-v64n02s13a.pdf>

Metsämuuronen, J. 2008. Laadullisen tutkimuksen perusteet. 3. painos. Helsinki: International Methelp. 74 s. ISBN: 978–952–5372–24–3

- Maa- ja metsätalousministeriö MMM. Ympäristövaikutusten kompensatio. [verkkosivu]. [viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://mmm.fi/luonto-ja-ilmasto/kompensaatiomekanismit>
- Niemistö, J., Seppälä, J., Karvonen, J., Soimakallio, S. 2021. Päästökompensaatiot ilmastonmuutoksen hillinnän keinona Suomessa – nyt ja tulevaisuudessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.3.2022]. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162987>
- Probst, L., Frideres, L., Cambier, B., PwC Luxembourg & Solberg, S., Lidé, S., PwC Sweden. 2016. Sustainable supply of raw materials: Optimal recycling. Contract No 190/PP/ENT/CIP/12/C/N03C01
- Puro.earth. 2022. Biochar – Finland. [verkkosivu.] [viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/biochar-finland-100008>
- Raworth, K. 2018. Donitsiloustiede: seitsemän tapaa ajatella kuin 2000-luvun taloustieteilijä. Helsinki : Terra Cognita. 353 s. ISBN : 978-952-5697-91-9
- Ramseur, J. 2009. Voluntary Carbon Offsets: Overview and Assessment. Congressional Research Service. [verkkojulkaisu]. [viitattu: 23.3.2020]. Saatavissa: <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL34241.pdf>.
- Rebens. 2021. Mikä arvoketju on todellisuudessa? [verkkosivu]. [viitattu 27.12.2021]. Saatavissa: <https://www.rebens.fi/mika-arvoketju-on-todellisuudessa/>
- Riikonen, A. 2019. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.4.2022]. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-19-19.pdf>
- Salo, E. 2019. Biohiili Suomessa – Suomen biohiiliyhdistys. [diaesitys]. [viitattu 28.3.2022]. Saatavissa: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Esko-Salo.pdf>
- Schmidt, HP., Wilson, K. 2014. The 55 uses of biochar. The Biochar Journal 2014, Arbaz, Switzerland. ISSN: 2297-1114.

Siipola, V., Källi, A., Wendling, L., Karlsson, M., Björnström, M., Koukkari, P. 2018. Biohiilen valmistus ja käyttö vedenpuhdistukseen – metsäteollisuuden sivuvirtojen jatkojalostus ja hyödyntäminen ei-energiakäyttöön. [raportti]. [viitattu 10.1.2021].

Saatavissa:

https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/Siipola+VTT_R_05608_18_CoCarbon.pdf/d91543c

[8-1c96-c0b4-0b0c-9b8579800c1f/Siipola+VTT_R_05608_18_CoCarbon.pdf](https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/Siipola+VTT_R_05608_18_CoCarbon.pdf)

Siipola, V., Koukkari, P., Hakala, J., Seppälä, O., Björnström, M., Karlsson, M. 2021. Metsäteollisuuden sivuvirroista valmistetun biohiilen käyttö jätevesien puhdistukseen-PurCar. [raportti]. [viitattu 4.4.2022]. Saatavissa:

[https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/PurCar_loppuraportti_VTT-R-293-](https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/PurCar_loppuraportti_VTT-R-293-21+(1).pdf/1a278b94-c273-596c-c659-e3eb7a558095/PurCar_loppuraportti_VTT-R-293-21+(1).pdf?t=1622460744362)

[21+\(1\).pdf/1a278b94-c273-596c-c659-e3eb7a558095/PurCar_loppuraportti_VTT-R-293-21+\(1\).pdf?t=1622460744362](https://mmm.fi/documents/1410837/12500944/PurCar_loppuraportti_VTT-R-293-21+(1).pdf/1a278b94-c273-596c-c659-e3eb7a558095/PurCar_loppuraportti_VTT-R-293-21+(1).pdf?t=1622460744362)

Simons, S., Honkatukia, J., Antikainen, R., Hippinen, I., Merenheimo, T., Lehtomaa, J., Kautto, P., Mikkola, M., Tikkanen, S., Salmenperä, H. 2018. Taloudelliset ohjaukeinot kiertotalouden arvoketjuissa. [raportti]. [viitattu 20.3.2022]. Saatavissa:

<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/160994>

Sitra. 2020. Onko päästöjen kompensointi rahastusta? [verkkosivu.] [viitattu 23.3.2022].

Saatavissa: <https://www.sitra.fi/blogit/onko-paastojen-kompensointi-rahastusta/>

Sitra. 2021. Kiertotalouden kiinnostavimmat 2.1. Mistä on kyse? [verkkosivu]. [viitattu 3.3.2022].

Saatavissa:

[https://www.sitra.fi/hankkeet/kiertotalouden-](https://www.sitra.fi/hankkeet/kiertotalouden-kiinnostavimmat/#mista-on-kyse)

[kiinnostavimmat/#mista-on-kyse](https://www.sitra.fi/hankkeet/kiertotalouden-kiinnostavimmat/#mista-on-kyse)

Sitra. 2022. Tulevaisuussanasto, sivuvirta. [verkkosivu]. [viitattu 20.1.2022]. Saatavissa:

<https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/sivuvirta/>

Suomen biohiiliyhdistys. Biohiilikartta. [verkkosivu]. [viitattu 8.4.2022]. Saatavissa:

<https://www.suomenbiohiili.fi/biohiilikartta/>

Tilastokeskus. 2021. Yhdyskuntajätteen määrä jatkoi kasvuaan vuonna 2020 – suurin osa jätteistä hyödynnettiin edelleen energiana. [verkkosivu]. [viitattu 3.4.2022]. Saatavissa:

https://www.stat.fi/til/jate/2020/13/jate_2020_13_2021-12-09_tie_001_fi.html

UEF. 2021. Biohiileen rakentuvan liiketoiminnan läpimurto on mahdollinen. [verkkosivu]. [viitattu 15.5.2022]. Saatavissa: <https://www.uef.fi/fi/artikkeli/biohiileen-rakentuvan-liiketoiminnan-lapimurto-on-mahdollinen>

Varpula, V. 2020. Biohiilen mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen kompensoinnissa. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/161723>

Yle. 2019. Tampereella tehdään biohiiltä ja kaukolämpöä ensimmäisten joukossa maailmassa – uusi laitos kymmenkertaistaisi tuotannon. [uutinen]. [viitattu 20.1.2022]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10873372>

Ympäristö.fi. 2021. Vapaaehtoisen päästökompensoinnin toimijat haluavat alalle selkeät pelisäännöt. [verkkosivu]. [viitattu 24.1.2022]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Vapaaehtoisen_paastokompensoinnin_toimij\(60282\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Vapaaehtoisen_paastokompensoinnin_toimij(60282))

Zhang, Y., Wang, X., Liu, B., Liu, Q., Zheng, H., You, X., Sun, K., Luo, X., Li, F. 2020. Comparative study of individual and Co-Application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality. *Chemosphere (Oxford)*, 2020–05. ISSN: 0045-6535